Fotometria e Imageamento THz de Fontes Térmicas e Não-térmicas

Arline Maria Melo

Campinas, 2007

Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica

Fotometria e ImageamentoTHz de Fontes Térmicas e Não-térmicas

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica

> Autora:Arline Maria Melo Orientador: Dr. José Alexandre Diniz

Campinas, 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -UNICAMP

M491f	Melo, Arline Maria Fotometria e imageamento THz de fontes térmicas e não- térmicas / Arline Maria Melo Campinas, SP: [s.n.], 2007.
	Orientadores: José Alexandre Diniz, Pierre Kaufmann. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
	 Infravermelho distante. 2. Filtros de malha ressonante. 3. Microbolômetro. 4. Sensoriamento remoto. I. Diniz, José Alexandre. II. Kaufmann, Pierre. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.
Títul	o em Inglês: THz imaging and photometry of thermal and non-ther sources.
Palav Área	ras-chave em Inglês: Remote sensoring, Metal mesh filters, Far infrared, Bolometers, THz imaging. de concentração: Eletrônica Microeletrônica e Optoeletrônica
Titul	ação: Doutor em Engenharia Elétrica
Banc	a examinadora: Mirabel Cerqueria Rezende, Marta Maria Cassiano Maria Beny Pinto Zakia, Jacobus Willibrordus Swa
	Hugo Enrique Hernandez Figueroa.
Data	da defesa: 07/11/2007
Data	

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidata: Arline Maria Melo

Data da Defesa: 7 de novembro de 2007

Título da Tese: "Fotometria e Imageamento THz de Fontes Térmicas e Não-Térmico"

Prof. Dr. José Alexandre Diniz (Presidente):
Profa. Dra. Mirabel Cerqueira Rezende:
Profa. Dra. Marta Maria Cassiano: Marta Maria Cassiano
Dra. Maria Beny Pinto Zakia: have Beng Pinto Lalia
Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart: Paca Sees (b). Leser
Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa:

Este trabalho é dedicado às pessoas mais importantes de minha vida

meu Pai (em memória), minha Mãe e meu Irmão.

A sua ausência fazendo silêncio em todo lugar... Fernando Anitelli

Segue o teu destino, rega as tuas plantas, ama as tuas rosas. O resto é a sombra de árvores alheias.

Fernando Pessoa

Aqui completo uma etapa importante de minha vida e durante todos estes longos anos diversas pessoas estiveram presentes, cada qual com sua contribuição indispensável para que tudo acontecesse.

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart por viabilizar esta pesquisa e ao meu orientador acadêmico Prof. Dr. José A. Diniz por acreditar em nosso trabalho.

Agradeço a todos os funcionários do CCS e CRAAM que colaboram diariamente para que todas as outras atividades possam ser executadas. Agradeço aos funcionários do CASLEO pela contribuição em nossos experimentos, em especial aos engenheiros Adolfo Marun e Pablo Pereyra.

Algumas pessoas contribuíram de forma especial neste trabalho, Maria Helena Piazzetta, Emilio Carlos Bortolucci, Maria Beny Zakia, Alexandre M. P. A. da Silva, Amauri S. Kudaka, Marta M. Cassiano e Rogério Marcon. Todos são também responsáveis por estes resultados.

Agradeço aos membros da comissão julgadora, professores Dra. Mirabel Cerqueira Rezende, Dra. Marta Maria Cassiano, Dra. Beny Pinto Zakia, Dr. Jacobus Willibrordus Swart e Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueiroa por todos os comentários construtivos e pela maneira respeitosa de avaliarem meu trabalho.

Aos meus amigos, agradecimentos não seriam suficientes para expressar minha felicidade em compartilhar junto com vocês momentos inesquecíveis.

Agradeço especialmente a Neide por sua feliz presença em diferentes momentos e a minha comadre Alessandra que dividiu comigo sonhos e ansiedades desta carreira. Aos amigos do CCS, Fábio, Leonardo, Leandro, Marcelo, Emílio, Cleber, Felipe, Roberto e Regina obrigada por tornar mais prazerosos meus dias de rotina.

Finalmente meu agradecimento especial ao Dr. Pierre Kaufmann que acreditou em mim desde o início, depositando confiança e dedicação em nosso trabalho. Foi, e ainda é, um privilégio aprender com este grande profissional, ser orientada por ele e principalmente ter a oportunidade de conhecer uma pessoa tão íntegra que teve grande influência não só em meu trabalho, mas em minha vida.

Este trabalho só foi possível devido ao suporte parcial das agências financiadoras FAPESP, CAPES, CNPq, MackPesquisa e CONICET (Argentina). Agradeço ao CST pela licença concedida à UNICAMP.

Figura 1.1: Ilustração do espectro eletromagnético (<u>www.mspc.eng.br</u>).

Figura 1.2: Curva de radiação de corpo negro emitida por corpos a diferentes temperaturas [http://sales.hamamatsu.com].

Figura 1.3: Ilustração da localização espectral da região THz representado por uma "lacuna" tecnológica entre microondas e visível.

Figura 1.4: Performance de diferentes fontes na região THz do espectro (Woolard et al., 2005).

Figura 1.5: Imagem em infravermelho médio de um corpo humano (à esquerda) e de um cubo de gelo derretendo (no meio) (http://coolcosmos.ipac.caltech.edu).

Figura 1.6: Curva da irradiância de um corpo negro a 6000 e 5500 K e a curva de emissão do Sol com suas raias de absorção (<u>http://www.physics.utoledo.edu</u>)

Figura 1.7: Representação gráfica da resposta espectral das principais fontes artificiais de IV [Jha, 2000].

Figura 1.8: Exemplos de imagens THz aplicadas a diferentes áreas: segurança, microeletrônica, biologia, medicina, entre outros.

Figura 2.1: Figura ilustrativa do mecanismo de excitação de elétrons nos detectores intrínsecos e extrínsecos

Figura 2.2: Ilustração de um sensor bolométrico e seu sistema de medida.

Figura 2.3: Principais avanços no desenvolvimento da tecnologia de sensores térmicos e de fótons.

Figura 2.4: Ilustração de um sistema de imageamento (FPA) tipo "staring" e de varreduras.

Figura 2.5: Ilustrações de um poço quântico (acima) (Liu, 2003) e de um nano-fio (abaixo) (Das e Singaraju, 2005), ambos utilizados como fotodetectores infravermelho.

Figura 2.6 : Curva de transmissão no infravermelho para o Teflon e Zitex G (Benford et al., 2003). O teflon transmite 80% da radiação a partir de 50 μm e o zitex transmite a partir de 100 μm também 80% da radiação

Figura 2.7: Transmissão de materiais para o IV distante (Goldsmith, 1992; Lamb, 1996; Griffths et al., 2001).

Figura 2.8: Transmissão de materiais para o IV distante (Goldsmith, 1992; Lamb, 1996 ; Griffths et al., 2001).

Figura 2.10: Placa de ouro com rugosidade de superfície de aproximadamente 1 μ m provocando o espalhamento da luz visível (Vollmer, 2004).

Figura 3.1: Exemplo de grades ressonantes (a) grade indutiva, passa-alto; (b) grade capacitiva, passa-baixo e (c) malha ressonante, passa-banda, resultante da junção das duas malhas anteriores (a) e (b).

Figura 3.2: Tabela com os parâmetros dos filtros e gráfico com as curvas de resposta medidas, conforme Porterfield et al. (1994).

Figura 3.3: Curvas de transmissão medidas para diferentes filtros com parâmetros de rede a e b diferentes (Chase e Joseph, 1983).

Figura 3.4: Medidas de transmissão para malhas ressonantes com freqüências na região submilimétrica do espectro conforme Page et al, 1994.

Figura 3.5 Imagem 3D do processo de fabricação das redes e do resultado final ampliado para um elemento apenas. As dimensões a, b e g para os diferentes filtros, A, B e C, e suas curvas de transmissão são mostradas abaixo (Möller et al., 1996).

Figura 3.6: Curvas de transmissão simuladas para uma rede ressonante com parâmetros G=20 μ m, a= 0.75 μ m e b= 1.5 μ m para diferentes espessuras do material metálico (Möller et al, 2002).

Figura 3.7: Resultado dos testes feitos na RPG para os filtros de 405 e 670 GHz (Arbex, 2006)

Figura 3.8: Gráfico com as variações dos parâmetros nas máscaras projetadas e nos respectivos filtros após sua fabricação.

Figura 3.9: Ilustração da lâmina após o processo fotolitográfico.

Figura 3.10: Etapas de fabricação dos filtros. Do topo para baixo temos a seqüência dos processos, preparação da lâmina (A), deposição de fotorresiste (A), revelação (B), eletrodeposição (C e D) e corrosão (E).

Figura 3.11: Fotos ampliadas dos diferentes filtros fabricados com suas respectivas dimensões

Figura 3.12: Micrografia eletrônica de alguns filtros fabricados obtidas através de um microscópio eletrônico (IG – UNICAMP)

Figura 3.13: Simulador CST Microwave Studio exemplificando as condições de contorno necessárias para as simulações de uma rede infinita de elementos (<u>www.cst.com</u>).

Figura 3.14: Curvas de resposta em freqüência simuladas com o software CST Microwave Studio (www.cst.com) para as freqüências de 405, 670, 850 GHz e 2, 4 e 8.5 THz, para os parâmetros da máscara e do filtro após sua fabricação.

Figura 3.15: Ilustração das características das malhas ressonantes fabricadas, espessura medida, comprimento de onda ressonante, λ_{FC} , e porcentagem da espessura em relação ao λ_{FC} . Ocorre o aumento excessivo da espessura do filtro para as freqüências mais elevadas, chegando a 70% do comprimento de onda.

Figura 3.16: Foto do laboratório de medidas no Instituto Max Planck para física Extraterrestre, Garching, Alemanha com o instrumento *Spectrometer Fourier Transformer* (FTS) utilizado ao fundo.

Figura 3.17: Diagrama mostrando o *setup* óptico de medidas do espectrômetro por transformada de Fourier, utilizado na realização das presentes medidas (Kornberg, 2006)

Figura 3.18: Curvas medidas de resposta em freqüência para os filtros de 405, 670, 850 GHz e 2, 4 e 8,5 THz,

obtidos com setup experimental do experimento PACS do satélite Herschel.

Figura 3.19: Largura de banda a meia potencia em função da freqüência central de resposta dos filtros construídos e para filtros produzidos por outros autores.

Figura 3.20 Comparação entre curvas de resposta em freqüência simuladas com o software CST Microwave Studio e os testes experimentais obtidos para as freqüências de 405, 670, 850 GHz e 2 e 4 THz.

Figura 4.1: Imagem da câmera para imageamento no infravermelho médio, Wuhan IR928.

Figura 4.2: Primeiros ensaios experimentais para a formação de imagem no plano focal da câmera IV: (a) projeção em superfície metálica, (b) observação da imagem projetada através de material semi-transparente, (c) observação direta em telescópio Newtoniano e (d) observação de imagem difratada por pequeno orifício.

Figura 4.3: Imagens do disco solar utilizando os seguintes procedimentos: (a) projeção através de material semitransparente (arseneto de gálio), (b) Reflexão em placa de alumínio despolida colocada no foco primário de um telescópio newtoniano e (c) Observação direta do sol através de um diafragma tipo pinhole.

Figura 4.4: Fotos dos ensaios feitos em laboratório apropriado (Observatório Solar Bernard Lyot, Campinas) para a obtenção das primeiras imagens do disco solar.

Figura 4.5: Fotos ilustrativas dos sítios observacionais, OSBL (à esquerda) e CASLEO (à direita).

Figura 4.6: Diagrama em blocos do arranjo óptico utilizado, composto por um celóstato, espelho côncavoconvexo-côncavo, janela de germânio e câmera IV.

Figura 4.7: Foto dos instrumentos utilizados nos experimentos realizados no Observatório Solar Bernard Lyot, Campinas, Brasil.

Figura 4.8: Diagrama simplificado do celostato (A) e do arranjo óptico (cassegrain B-C, espelho plano S, espelho côncavo D, Janela de Ge E e câmera IV F) utilizado na obtenção das imagens solares com alinhamento afocal no sítio de El Leoncito, Argentina.

Figura 4.9: Foto do corpo negro calibrador com termopar acoplado, instalado na entrada do sistema óptico.

Figura 4.10: Medidas realizadas com o calibrador a diferentes temperaturas.

Figura 4.11: Imagem Infravermelho para 17 de Setembro de 2005, no canto superior esquerdo, com uma mancha solar e seu mapa de temperatura ao lado, abaixo vemos seu perfil de temperatura, mostrando a queda provocada pela mancha, mais fria.

Figura 4.12: Imagens mostrando uma região brilhante ao redor da mancha escura ("plage like region") para a região ativa NOAA AR 0808 do dia 17 de setembro de 2005 em 10 µm, obtida no OSBL, Campinas (à esquerda) e imagem na linha do cálcio K do Observatório de Meudon, França (à direita).

Figura 4.13: Três imagens de 500" x 500" de duas manchas solares da RA 0826 do dia 4 de dezembro de 2005. O perfil temporal abaixo corresponde a um evento de raios-X classe A detectado pelo satélite GOES. As imagens (1), (2) e (3) se correlacionam ao evento em raios-X, com o desaparecimento da mancha superior durante o máximo do evento em raios -X.

Figura 4.14: Três imagens em 30 THz (no topo da Figura) da região ativa NOAA RA 0826 no dia 01 de dezembro de 2005, correspondentes aos horários indicados pelas linhas 1, 2 e 3 nos perfis temporais (abaixo na Figura). Os perfis A, B e C indicados correspondem ao perfil temporal das regiões brilhantes indicadas nas fotos acima, subtraindo a média do retângulo maior.

Figura 4.15: Nas imagens acima temos a imagem de mercúrio, em 10 microns, durante seu transito sobre a superfície solar em três diferentes momentos e abaixo encontramos o perfil de temperatura indicando a queda provocada por sua temperatura inferior a da superfície solar.

Figura 5.1: Fotos da câmera sem a lente de germânio e do arranjo de medidas de desempenho do sistema câmera/filtros.

Figura 5.3: Primeiras imagens THz de uma resistência aquecida.

Figura 5.2: Transmitância de um filme de germânio com diferentes espessuras (1 a 3.5 µm) em função do número de onda (<u>http://www.irfilters.reading.ac.uk/library/technical_data/infrared_materials</u>)

Tabela 1.1.: Diferentes faixas convencionadas na região infravermelha do espectro e suas respectivas freqüências, comprimentos de onda e energia [Chamberlain, 2004].

Tabela 1.2: Tabela de aplicações cientificas, industriais, médicas e militares da radiação THz [Mittleman, 1999; Rogalski, 2002; Federici, 2005; Shur, 2005].

Tabela 2.1: Resumo esquemático dos sensores IV disponíveis atualmente e suas subdivisões (Sizov, 2000).

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros k, l e g para as máscaras e malhas ressonantes de todas as freqüências.

Tabela 3.2: Tabela resumida com os procedimentos de fabricação das malhas ressonantes.

Tabela 3.3: valores comparativos para os resultados simulados para os filtros de 405, 670, 850 GHz e 2 e 4 THz.

Tabela 4.1: Quadro resumido das principais informações técnicas da câmera utilizada.

Lista de Símbolos

а	Parâmetro da malha ressonante (µm)		
А	Área ativa do sensor (cm²)		
A _e	Área efetiva (m²)		
b	Parâmetro da malha ressonante (µm)		
B _f	Irradiância monocromática (Wm ⁻² sr ⁻¹ Hz ⁻¹)		
С	Velocidade da luz (299 792 458 m / s)		
\mathbf{C}_{t}	Capacitância térmica (J kg ⁻¹ K ⁻¹)		
D^{*}	Detectividade normalizada (cmH ^{1/2} W ⁻¹)		
f	Freqüência (Hz)		
\mathbf{f}_{\max}	Freqüência máxima (Hz)		
F_{C}	Freqüência central (Hz)		
G	Parâmetro da malha ressonante correspondente à periodicidade das cruzes (µm)		
G _t	Condutância térmica (W m ⁻² K ⁻¹)		
h	Constante de Planck (6,626068 × 10-34 m2 kg / s)		
I	Corrente (A)		
I _N	Corrente equivalente ao ruído (A)		
k	Constante de Boltzmann (1,3806503 × 10^{-23} m ² kg s ⁻² K ⁻¹)		
К	Parâmetro da malha ressonante correspondente à espessura da cruz (μ m)		
L	Parâmetro da malha ressonante correspondente ao comprimento da cruz (μ m)		
NEP	Potência equivalente de ruído (WHz ^{-1/2} ou W)		
NETD	Diferença de temperatura equivalente ao ruído (K)		
P ₀	Potência incidente (W)		
R	Responsividade (V/W ou I/W)		
\Re_{N}	Responsividade equivalente ao ruído (V/W ou I/W)		
S/N	Relação sinal ruído		
Т	Temperatura (K)		
T_B	Temperatura de fundo (K)		
T_S	Temperatura da fonte (K)		
T_{sis}	Temperatura do sistema (K)		
T _M	Temperatura média de Mercúrio – lado escuro (70 K)		

V	Tensão (V)
V_{N}	Tensão equivalente ao ruído (V)
V_{S}	Tensão do sinal relativo à fonte (V)
∆t	Tempo de integração (s)
ΔS	Variação de fluxo (Wm ⁻² Hz ⁻¹)
ΔT_{rms}	Temperatura equivalente de ruído
Δυ	Banda passante (Hz)
τ	Tempo de resposta do sensor (s)
λ	Comprimento de onda (µm)
λ_{FC}	Comprimento de onda ressonante (µm)
η	Eficiência
θ_{M}	Tamanho angular de Mercúrio para a data
θ_{B}	Tamanho angular do feixe

do trânsito (9,97")

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vi
Resumo	01
Abstract	02
Introdução	03
Capítulo 1	
Introdução à Radiação Infravermelha	05
1.1 Características	05
1.2 Formulação Básica	07
1.3 Fontes de radiação	08
1.3.1 Fontes de IV Naturais	09
1.3.2 Fontes artificiais	11
1.3.2.1 Fontes de banda larga.	11
1.3.2.2 Fontes de bandas estreitas	12
1.4 Aplicações	13
Capítulo 2	
Detecção de Radiação Infravermelha	18
2.1 Processos Físicos e Tipos de Detectores	18
2.1.1 Detectores Quânticos	18
2.1.2 Detectores Térmicos	19
2.2 Figuras de Mérito	21
2.2.1 Responsividade, R	22
2.2.2 Potência Equivalente de Ruído, NEP	22
2.2.3 Detectividade Normalizada, D*	23
2.2.4 Diferença de temperatura equivalente ao ruído, NETD	23
2.2.5 Tempo de Resposta	24
2.3 Histórico da Tecnologia de Detecção IV	24
2.4 Focal Plane Array – FPA	
2.5 Novas tecnologias e tendências para o IV próximo, médio e distante	29
2.6 Materiais utilizados no Infravermelho	31

2.6.1 Materiais atenuadores	31
2.6.2 Materiais refletores	35
Capítulo 3	
Sintonia em Rádio-Freqüência na Faixa THz	37
3.1 Introdução à sintonia no IV	38
3.2 Malhas Ressonantes – Revisão dos resultados conhecidos	39
3.3 Projeto e Fabricação	45
3.4 Simulações	51
3.5 Medidas Experimentais	56
3.6 Comparação Resultados versus Simulação	60
Capítulo 4	
Ensaios e Caracterização com Câmera para Infravermelho Médio	63
4.1 Descrição da câmera utilizada para o IV	63
4.2 Primeiros Testes Experimentais	64
4.3 Ensaios integrados completos	66
4.3.1 Sítios observacionais	66
4.3.2 Arranjo óptico	66
4.3.3 Primeiros resultados	69
4.3.3.1 Sistema de calibração e conversão de temperatura em fluxo	69
4.3.3.2 Imageamento Solar – Experimentos e Resultados	71
4.3.3.3 Trânsito de Mercúrio e determinação do NEP do sistema	75
Capítulo 5	
Imageamento THz: Prova de conceito com FPA de câmera comercial	79
Conclusões	
Trabalhos Futuros	
Referências	
Apêndices	
Anexos	

Este trabalho apresenta importantes informações sobre tecnologia THz, atualmente considerada um desafio tecnológico e estado da arte em diversas áreas de desenvolvimento. Com o objetivo de formar um sistema imageador THz, ainda indisponível comercialmente, foram dispensados esforços em diferentes frentes.

Câmeras para o infravermelho médio $(8 - 14 \ \mu m)$ foram adquiridas, caracterizadas e testadas, com resultados relevantes e inéditos em Física Solar, aplicação considerada para este trabalho. Filtros de malha ressonante para diversas bandas na região THz (centrados em 0,4, 0,67, 0,85, 2, 4 e 8,5 THz) foram projetados, fabricados e testados exibindo excepcional resposta.

E finalmente um primeiro protótipo imageador foi montado acoplando os filtros de malha ressonante a câmera IV sem sua óptica original de germânio. As primeiras imagens THz de uma resistência aquecida é apresentada, provando a funcionalidade do conceito original.

Os desenvolvimentos e estudos aqui apresentados estarão contribuindo para dois experimentos espaciais recentemente propostos, DESIR (*Detection of Solar eruptive Infrared Radiation*) e SIRA (*Submillimeter-wave to InfraRed solar Activity emissions*), prevendo a utilização de sistemas THz em observações de transientes em plasmas ativos solares em diferentes freqüências, a partir do solo e no espaço.

Abstract

This work presents important information on THz technology, currently considered a technological challenge and state of the art in different areas of development. To form a THz imaging system, still unavailable commercially, efforts in different fronts had been excused.

Cameras for medium IR (8 - 14 μ m) had been acquired, characterized and tested, with excellent and unknown results in Solar Physics, application considered for this work. Filters of resonant metal mesh for diverse bands in the THz region (centered in 0,4, 0,67, 0,85, 2, 4 and 8,5 THz) had been projected, manufactured and tested showing excellent results.

Finally a first imaging system was mounted connecting the filters of resonant mesh to the IR camera without its original optics of germanium. The first THz images of a warm resistance are presented, proving the functionality of the original concept.

The developments and studies presented here will contribute for two space experiments recently considered, DESIR (*Solar Detection of eruptive Infrared Radiation*) and SIRA (*Submillimeter-wave you the solar InfraRed Activity emissions*), requiring the use of THz systems for observations of transient in solar active plasmas in different frequencies, from the ground and in the space.

Experimentos na faixa THz (Terahertz, 1 THz = 10^{12} Hz) têm sido o foco de muitos desenvolvimentos em diferentes áreas desde a eletrônica até a óptica. Todos esses esforços se justificam pelo crescente número de aplicações da tecnologia THz.

A maioria dessas aplicações faz uso de sistemas de fotometria/termometria e imageamento que por sua vez requerem o desenvolvimento e aprimoramento de fontes, sensores, filtros, lentes, circuitos de leitura, entre outros dispositivos.

A faixa THz do espectro encontra-se na região do infravermelho médio e distante, região esta muito voltada a experimentos militares desde seus primeiros desenvolvimentos. A capacidade de visualizar objetos em ambientes sem luz e através de diferentes materiais trouxe novos atrativos para objetivos bélicos. Outras aplicações vêm sendo também exploradas, por exemplo, nas áreas biomédicas, prospecção mineral e sensoriamento aeroespacial. A importância estratégica destas aplicações fazem com que a maior parte dos experimentos e informações tecnológicas em THz sejam de difícil acesso e tratadas como confidenciais.

Para a realização do presente trabalho foram superadas estas restrições às informações. Concentrou-se em questões estratégicas para a definição do projeto de um sistema imageador para infravermelho médio e distante, utilizando câmeras comercialmente disponíveis, um arranjo óptico e um sistema de captura e leitura de dados, permitindo testes experimentais utilizando o Sol como fonte intensa de radiação IV.

Por outro lado, a faixa THz apresenta particular interesse nos estudos dos processos de aceleração de partículas de altíssimas energias em plasmas instáveis, por exemplo, através de observações solares. Sabe-se que, tais processos físicos ocorrem durante as explosões solares, que são atualmente observadas em diferentes porções do espectro, porém permanecem ainda desconhecidas suas características na faixa do infravermelho, onde observações recentes indicaram atividade de altíssima energia. Processos físicos semelhantes acontecem em grandes

aceleradores de partículas, cujo diagnóstico também se faz na faixa THz do espectro eletromagnético, para o qual os sensores se fazem necessários.

A sintonia em rádio freqüência destes dispositivos constitui parte crítica para o projeto de sistemas fotométricos/imageadores. Para a realização dos objetivos aqui propostos um importante desenvolvimento destacado neste trabalho foi o projeto, fabricação, testes e aplicações de filtros de malha ressonante para esta faixa espectral. Filtros para seis diferentes freqüências foram fabricados com sucesso e acoplados a um sistema óptico e câmera IV produzindo nossas primeiras imagens THz, provando o conceito de uso de câmeras comerciais adaptadas e adequados arranjos ópticos.

Parte dos resultados observacionais em infravermelho médio obtidos neste trabalho é inédita tornando-se importante ferramenta para a compreensão e modelagem dos fenômenos físicos presentes em explosões solares.

Capítulo 1 Introdução à Radiação Infravermelha

Neste primeiro capítulo serão apresentadas brevemente as principais informações sobre a região espectral conhecida como infravermelho, que inclui a faixa terahertz.

Um panorama geral das possibilidades de fontes irradiando na faixa THz do espectro será apresentado, citando diferentes referências para posterior consulta, porém sem detalhamento das diferentes técnicas existentes que não fazem parte do escopo do presente estudo. As principais aplicações de imageamento IV em diferentes áreas com maior destaque serão apresentadas.

1.1 Características

Os átomos são formados por partículas carregadas, os elétrons e prótons, e partículas neutras, os nêutrons. Estes elementos, constituintes atômicos, encontram-se em contínuo movimento. A medida de temperatura pode ser considerada como a medida do grau deste movimento e o zero absoluto seria o menor nível de agitação, onde todas as partículas se encontrariam paradas. Portanto, toda a matéria está formada por partículas em movimento, com cargas elétricas aceleradas, mudando de velocidade e/ou direção. Desta maneira toda matéria irradia energia e esta grandeza está diretamente relacionada com a temperatura do objeto e sua capacidade de emitir radiação em todo o espectro eletromagnético (ver Figura 1.1). Esta descrição simplificada se aplica para corpos que estejam em equilíbrio termodinâmico, gases, estendendo-se a plasmas neutros a temperaturas até cerca de 10⁶ K.



Figura 1.1: Ilustração do espectro eletromagnético (www.mspc.eng.br).

A Lei de Planck descreve a emissão de radiação eletromagnética desses objetos. Para comprimentos de onda mais longos do que o visível (λ >0,5 µm), convencionou-se denominar a radiação como radiação infravermelha ou radiação térmica.

A faixa infravermelha se localiza no espectro eletromagnético entre o visível e rádio e pode ser subdividida em três, infravermelho próximo, médio e distante, em relação ao visível (ver Tabela 1.1).

Tabela 1.1.: Diferentes faixas convencionadas na região infravermelha do espectro e suas respectivas freqüências, comprimentos de onda e energia [Chamberlain, 2004].

	freqüência	Comprimento de onda	energia
IV próximo	$300 \ \mathrm{THz} - 30 \ \mathrm{THz}$	1 μm – 10 μm	1,24 eV - 124 meV
IV médio	$30 \mathrm{~THz} - 3 \mathrm{~THz}$	$10 \ \mu m - 100 \ \mu m$	124 meV – 12.4 meV
IV distante	$3 \ \mathrm{THz} - 300 \ \mathrm{GHz}$	100 μm – 1mm	12,4 meV – 1,24 meV

Algumas características importantes da radiação infravermelha são:

- A energia na região do infravermelho irradiada aumenta proporcionalmente com a quarta potência da temperatura absoluta do corpo.
- A emissividade é função da estrutura molecular e características de superfície de um objeto e expressa a eficiência de sua emissão comparando-se a um emissor perfeito, ou corpo negro ideal, à mesma temperatura.
- Alguns materiais refletem radiação infravermelha muito melhor do que outros e isto define a sua refletividade.
- A transmissividade define a transparência de alguns materiais à radiação infravermelha.
- Define-se como corpo negro aquele que absorve toda a radiação incidente e que para uma dada temperatura emitirá a quantidade máxima possível de radiação térmica.

1.2 Formulação Básica

A irradiância monocromática, ou seja, a irradiância por unidade de comprimento de onda, emitida por um corpo negro é determinada por sua temperatura e pelo comprimento de onda considerado, conforme descrito pela Lei de Planck.

$$B_{f} = \frac{2hf^{3}}{c^{2}} \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kt}\right) - 1} \qquad [Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1}]$$
(1.1)

onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura do corpo negro emissor, c é a velocidade da luz e h é a constante de Planck.

A Equação (1.1) apresenta um máximo para uma dada temperatura T em uma certa freqüência, f_{max}. A chamada lei de Wien permite prever esta freqüência:

$$f_{\max} = \frac{3kT}{h} \quad [Hz] \tag{1.2}$$

Na região de freqüências correspondentes a comprimentos de onda menores do que do infravermelho admite-se a seguinte aproximação, hf>>kT. A Equação 1.1 se reduz para:

$$B_f \approx \frac{2hf^3}{c^2} \exp\left(-\frac{hf}{kT}\right) \quad [\text{Wm}^2\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}]$$
(1.3)

Para comprimentos de ondas maiores esta aproximação é inadequada.

A Figura 1.2 mostra a radiação do corpo negro para diferentes temperaturas, desde 200 até 6000 K, entre 0,1 e 100 micrometros.



Figura 1.2: Curva de radiação de corpo negro emitida por corpos a diferentes temperaturas [http://sales.hamamatsu.com].

1.3 Fontes de radiação

Apesar do grande interesse científico desde a década de vinte, a banda THz do espectro (correspondente ao intervalo de freqüências entre o infravermelho próximo e microondas) representa ainda uma faixa muito pouco explorada. Nos últimos 25 anos, aproximadamente, o único nicho mais desenvolvido de tecnologia THz foi a espectroscopia de alta resolução e o sensoriamento remoto, onde técnicas de transformadas de Fourier e de receptores heterodinos foram utilizados por astrônomos e químicos para catalogar linhas de emissão de uma grande variedade de moléculas [Siegel, 2002]. O interesse comercial em sensores e fontes THz encontrase apenas em seu início e tem avançado exponencialmente em anos recentes com o avanço da tecnologia de microfabricação.

A região THz do espectro, como ilustrado nas Figuras 1.1 e 1.3, encontra-se na transição de duas regiões espectrais envolvendo tecnologias diferentes, trazendo desafios tecnológicos para o desenvolvimento de fontes e sensores de radiação (Lisauskas et al., 2005; Williams, 2006). Nesta região espectral as potências irradiadas por fontes convencionais são pequenas. Por exemplo, uma fonte de corpo negro em 1400 K emite uma potência da ordem de nanowatts mesmo integrado em toda a região THz do espectro, enquanto que, na região de microondas, a potência dos osciladores também diminui para as freqüências mais elevadas, Figura 1.4 (Williams, 2006; Woolard et al., 2005).



Figura 1.3: Ilustração da localização espectral da região THz representado por uma "lacuna" tecnológica entre microondas e visível.

Introdução à Radiação Infravermelha



Figura 1.4: Performance de diferentes fontes na região THz do espectro (Woolard et al., 2005).

Esta ausência de fontes de alta potência com baixo custo, portáteis e não refrigeradas é uma limitação significante dos sistemas IV modernos. Porém, já existe uma grande quantidade de fontes cada uma com sua vantagem e os avanços em eletrônica, lasers e materiais continuam a promover novas possibilidades (Ferguson, 2002).

A seguir as fontes de IV estão divididas em naturais, fontes de banda larga e fontes de banda estreita.

1.3.1 Fontes de IV Naturais

Como já mencionado, no início deste capítulo, a mais comum fonte de radiação infravermelha é de origem térmica, produzida pelo movimento aleatório dos átomos e moléculas em um material. Portanto, qualquer material a certa temperatura irradia no infravermelho. Mesmo objetos muito frios, como um cubo de gelo (ver Figura 1.5), mostram importante emissão no IV.

Um exemplo de emissor de radiação infravermelha próxima a um corpo negro são os resistores elétricos, onde uma corrente elétrica atravessa o material, aumentando a energia cinética das cargas elétricas, ocasionando um aumento em sua temperatura. Este fenômeno é muito utilizado como fonte de radiação controlada em calibradores térmicos.

Introdução à Radiação Infravermelha



Figura 1.5: Imagem em infravermelho médio de um corpo humano (à esquerda) e de um cubo de gelo derretendo (no meio) (<u>http://coolcosmos.ipac.caltech.edu</u>).

Os seres humanos pela sua temperatura natural (ou 36,5 °C) emitem radiação no infravermelho, apresentando seu pico de emissão em 10 micrometros (ou 30 THz). A Figura 1.5 mostra a emissão infravermelha de um ser humano, onde a área vermelha é a mais quente e a verde/azul a mais fria.

As estrelas, assim como o Sol, também são emissores de infravermelho, porém sua curva de emissão não é sempre exatamente igual à curva de um corpo negro ideal, pois a emissão proveniente da fotosfera atravessa uma atmosfera constituída por muitos gases, contendo elementos químicos neutros e ionizados que apresentam bandas de emissão e absorção específicas, resultando em um espectro com desvios em relação à emissão de corpo negro, Figura 1.6.



Figura 1.6: Curva da irradiância de um corpo negro a 6000 e 5500 K e a curva de emissão do Sol com suas raias de absorção (<u>http://www.physics.utoledo.edu</u>)

1.3.2 Fontes artificiais

As fontes artificiais disponíveis atualmente podem ser classificadas em fontes de banda larga (largo espectro de emissão) e estreita (espectro de emissão estreito). A resposta espectral de algumas destas fontes estão mostradas na Figura 1.7.

1.3.2.1 Fontes de banda larga.

Entre os exemplos de fontes de banda larga mais comuns encontramos uma fonte comercialmente conhecida como Globar, que consiste em uma barra de carboneto de silício (SiC) eletricamente aquecida de 1000 a 1650 °C emitindo radiação de 4 – 15 microns, aproximadamente, com comportamento espectral próximo a um corpo negro (http://en.wikipedia.org). Lâmpadas de vapor mercúrio também são muito utilizadas.

A maioria das fontes pulsadas de banda larga é baseada na excitação de diferentes materiais com pulsos ultracurtos de laser. Diferentes mecanismos para a geração de radiação THz têm sido explorados, incluindo aceleração de cargas em antenas fotocondutivas, efeitos de segunda ordem não-lineares em cristais eletro-ópticos, oscilação de plasmas e linhas de transmissão eletrônica não linear (Fergusson, 2002). Atualmente, as eficiências de conversão em todas estas fontes são muito baixas, e conseqüentemente, a média da potência gerada é da ordem de nano a microwatts.

O mecanismo físico para a geração de feixes THz em antenas fotocondutivas inicia-se com um pulso de laser ultra rápido (com energia maior do que o *bandgap* do material, ou seja, variação entre as bandas de valência e condução do material) que cria um par de elétron-lacuna no material fotocondutor. As cargas livres são aceleradas por um campo elétrico formando uma corrente que variada rapidamente irradia ondas eletromagnéticas. Diferentes parâmetros do material afetam a intensidade e largura de banda da radiação THz resultante. Emissores fotocondutivos são capazes de apresentar potências de 40 µW e larguras de banda de até 4 THz [Ferguson, 2002; Pospiech, 2003].

Em outro método, a radiação THz é diretamente gerada pela excitação de um material com um pulso rápido de laser. Muitas pesquisas estão focadas na otimização desta técnica pelo estudo de propriedades eletro-ópticas de diferentes materiais, incluindo semicondutores tradicionais, tais como GaAs e ZnTe, e cristais orgânicos.



Figura 1.7: Representação gráfica da resposta espectral das principais fontes artificiais de IV [Jha, 2000].

1.3.2.2 Fontes de bandas estreitas

Fontes THz de banda estreita são muito importantes para aplicações em espectroscopia de alta resolução, com aplicações potenciais em telecomunicações, e comunicação entre satélites. Por estas razões houve um grande interesse em seu desenvolvimento nas últimas décadas. Diferentes técnicas estão em desenvolvimento, incluindo a conversão de fontes de radiofreqüência, conversão de fontes ópticas e lasers.

A técnica mais utilizada para gerar radiação THz contínua é através da conversão de freqüências mais baixas em osciladores de microondas. Algumas pesquisas mostram o aumento da freqüência de osciladores com diodos Gunn e IMPATT (*IMPact ionization Avalanche Transit-Time*) para a

região THz usando materiais semicondutores alternativos e aprimorando a técnica de fabricação. Lasers a gás são outro tipo de fontes THz, onde um laser de dióxido de carbono bombardeia uma cavidade gasosa a baixa pressão, que excita moléculas do gás emitindo em diferentes linhas de freqüências.

Emissões de altíssimas potências também foram demonstradas usando lasers de elétrons livres e aceleradores lineares. O laser de elétrons livres utiliza um feixe de agrupamentos eletrônicos de alta velocidade se propagando no vácuo através de um forte campo magnético que varia espacialmente. O campo magnético causa a oscilação dos agrupamentos eletrônicos que por sua vez emitem fótons THz.

O mais recente avanço nesta área é a utilização de lasers de cascata quântica, demonstrado pela primeira vez em 1994 (Ferguson, 2002). Um laser deste tipo consiste em camadas periódicas de dois materiais semicondutores, que formam uma série de poços quânticos e barreiras, que são usualmente camadas da ordem de nanômetros de GaAs e AlGaAs. O confinamento nos poços quânticos causa um número finito de sub-bandas no material. Através da transição de cargas de um estado mais energético para outro menos energético a radiação é emitida. A diferença de energia entre os níveis é determinada pela espessura das camadas, portanto as freqüências de emissão podem ser determinadas através do projeto do dispositivo. Uma desvantagem deste método é a necessidade de baixas temperaturas de operação (Gallerano, 2004; Chamberlain, 2004).

1.4 Aplicações

O imageamento THz apresenta duas vantagens principais bem estabelecidas sobre a tecnologia milimétrica: (a) resolução espacial, até dez vezes melhor e (b) características espectrais de determinados materiais exclusivamente nesta faixa espectral.

A radiação THz é facilmente transmitida através de muitos meios materiais não metálicos e não polares, portanto são capazes de "enxergar" através de barreiras como: roupas, sapatos, bolsas,

malas, etc. Metais bloqueiam ou refletem completamente esta radiação. Materiais não polares líquidos também apresentam transmissividade nestas freqüências, enquanto líquidos polares como a água são altamente absorvedores (Federici, 2005).

Dados experimentais sugerem que vários materiais relevantes para aplicações em segurança possuem transmissão e reflexão característica nesta faixa do espectro, incluindo explosivos e agentes químicos e biológicos, que podem ser utilizados como "impressões digitais" para suas identificações. Podemos citar como exemplo, explosivos como C-4, HMX (*cyclotetramethylene-tetranitramine*), RDX (*Cyclotrimethylenetrinitramine*) e TNT (*Trinitrotolueno*) e drogas ilegais como metanfetamina (Federici, 2005).

A pele humana, devido à alta quantidade de água que contém, absorve toda a radiação THz e a energia será dissipada como calor nos primeiros 100 microns da pele portanto, a aplicação de radiação THz apresenta risco mínimo a saúde (Federici, 2005).

Sherwin et al. (2004) apresentam uma revisão muito completa sobre todas as aplicações presentes e futuras dos desenvolvimentos THz. Alguns pontos principais citados em seu trabalho são: Pequenas moléculas rotacionam em freqüências altas apresentando características nesta faixa espectral; Modos coletivos de proteínas vibram em freqüências THz; Elétrons em semicondutores e suas nano-estruturas ressoam em freqüências THz; Bandas de energia em supercondutores encontram-se em freqüências THz; Propriedades de nanoestruturas em semicondutores na região visível e IV próximo do espectro podem ser controladas com radiação THz; Semicondutores possuem importantes ressonâncias na faixa THz (fônons, estados de impurezas, transições de excitons, plasmons em materiais dopados); Técnicas THz permitem estudar materiais em condições extremas de temperatura, campo elétrico e magnético; A região THz também é fundamental para investigações em óptica, diagnósticos de plasma, química, ciência atmosférica e astrofísica; A escala de tempo de colisões em gases é da ordem de 10⁻¹² segundos, justificando o estudo na faixa THz; Fônons em cristais orgânicos e inorgânicos possui espectro na faixa THz; A banda entre 100 GHz e 20 THz é uma faixa promissora para o imageamento médico; A radiação THz é bem absorvida pela água, mas diferenças entre tecidos,

arquitetura e componentes químicos pode contribuir para um melhor contraste; Estudos recentes com dentes, pele e mama sugerem que o imageamento THz pode revelar características não aparentes em outras técnicas; A radiação THz poderá propiciar imagens de materiais biológicos com resolução espacial de 100 μ m utilizando mecanismos de contraste; A espectroscopia THz irá contribuir no estudo de agentes farmacêuticos e diferenciar drogas polimórficas, com diferentes atividades farmacêuticas. A Tabela 1.2 também apresenta um quadro de diversas aplicações desta tecnologia.

Existem, ainda, importantes raias de emissão térmica de gases que aparecem na estratosfera terrestre e na alta troposfera (água, oxigênio, compostos de nitrogênio e cloro). O estudo destas linhas serve como apontadores de abundância, distribuição e taxa de reação de espécies envolvidas na destruição do ozônio, efeitos de aquecimento global, balanço total de radiação e monitoramento da poluição [Siegel, 2003].

Segundo Siegel (2003) operações na estratosfera (telecomunicação entre satélites) são particularmente vantajosas na faixa THz, ou com sistemas de radares, devido ao baixo espalhamento da radiação comparando-se a comprimentos de onda IV e ópticos, além de apresentarem uma boa penetração em nuvens e aerosóis.

Talvez uma das aplicações mais interessantes para a tecnologia THz comercializável neste momento é o imageamento THz. Atualmente, existem várias companhias comerciais, como Picometrix nos EUA e Teraview na Inglaterra, fazendo medidas "*in situ*" de radiação THz transmitida ou refletida por uma amostra determinando componentes espectrais, índice de refração, amplitude e fase e espessura da amostra, Figura 1.8 [Siegel, 2003].



Figura 1.8: Exemplos de imagens THz aplicadas a diferentes áreas: segurança, microeletrônica, biologia, medicina, entre outros.

Tabela 1.2: Tabela de aplicações científicas, industriais, médicas e militares da radiação THz [Mittleman, 1999; Rogalski, 2002; Federici, 2005; Shur, 2005].

Cientifico • Medidas de temperaturas estelar, planetária e lunar; • Sensoriamento remoto atmosférico; Estudo da transferência de calor em plantas; Medidas do balanço de calor do planeta: • Determinação dos constituintes das atmosferas terrestres e planetárias • Detecção de vegetação ou vida em outros planetas Análises de terreno • Exame e procura de recursos terrestres Localização e mapeamento de córregos Detecção via satélite de incêndios florestais Estudo de vulções Detecção e estudo de poluição aquática Localização de rachaduras • Reconhecimento de geleiras Exploração de petróleo • Determinação de espessuras de filmes epitaxiais Determinação dos constituintes da superfície lunar e de planetas • Identificação de pedras • Análise da qualidade da água Detecção de satélites Navegação de veículos espaciais e controle de vôo Orientação de instrumentos Comunicação

espacial

• Fotografia noturna

Industrial Deteminação dimensional sem contato • Controle de processos • Medidas de temperatura em linhas de potência e ferramentas de solda • Detecção de turbulência em céu claro Análise orgânica de produtos químicos • Análise de gases • Imageamento de rupturas em encanamentos • Detecção de presença de óleo em água • Teste não destrutivo Inspeção • Localização de encanamentos em paredes e solo Inspeção de materiais ópticos • Estudo de eficiência em materiais térmicos Fiscalização industrial e prevenção de crimes • Detecção de doenças em arvores e colheitas • Detecção de incêndio em florestas • Guia para mísseis anti-incêndio • Monitoramento de estacionamentos • Prevenção de colisões de automóveis • Sensores de velocidade entre veículos Aterrisagem de aeronaves

Médico Medidas de temperatura da pele Detecção precoce de câncer Biosensores remotos • Estudos do aquecimento da pele e sensação de calor • Monitor de cura de feridas sem remoção de curativos • Detecção e monitoramento da poluição do ar • Determinação da presença de dióxido de carbono no sangue e na respiração Detecção precoce de câncer • Determinação precisa do local de amputação Estudos da eficiência de roupas de inverno • Localização de um bloqueio em uma veia Monitoramento do movimento ocular • Estudo dos hábitos noturnos de animais • Exame do olho através da opacidade córnea Monitor nos processos de cicatrização Detecção de obstáculos • Terapia com calor • Detecção de obstáculos ofuscados

Militar • Identificação de alvos • Análise do terreno • Detecção de gases tóxicos • Detecção de gases combustíveis Detecção de contaminantes • Reconhecimento e fiscalização • Mapeamento térmico • Detecção de submarinos Deteccão subterrânea de armas, veículos,fogo, pessoas • Avaliação de danos • Visão noturna • Detecção de camuflagem • Defesa anti-bomba · Guia mísseis • Controle de vôo e navegação • Controle de incêndio • Detecção de mina Aviso anti-colisão em aviões Comunicação terrestre • Contramedidas de sistemas de infravermelho

Capítulo 2 Detecção de Radiação Infravermelha

Neste capítulo os aspectos mais relevantes relacionados à detecção da radiação infravermelha serão abordados, enfatizando os diferentes tipos de sensores disponíveis para as faixas do IV próximo, médio e distante, assim como o estado da arte de novas tecnologias. Materiais atenuadores e refletores para esta faixa espectral utilizados em sistemas de imageamento também serão apresentados.

2.1 Processos Físicos e Tipos de Detectores

Os sensores de radiação infravermelha são comumente classificados em térmicos e quânticos e estes por sua vez são subdivididos em outras classes, onde existe desde termopares até poços quânticos (ver Tabela 2.1). Esta subdivisão dos sensores refere-se ao tipo de interação da radiação com o material sensível, que será descrita a seguir.

2.1.1 Detectores Quânticos

Nos detectores de fótons ou quânticos, os fótons são convertidos diretamente em cargas livres pela excitação dos elétrons da camada de valência, através da energia de "*bandgap*" do semicondutor. Esta excitação é causada pela interação direta da radiação com os átomos da rede cristalina do material. Neste caso, a temperatura do detector deve ser suficientemente baixa para que as cargas excitadas termicamente sejam insignificantes. Esta corrente de cargas livres excitadas gera uma variação de resistividade no material que pode ser medida por um circuito elétrico externo. Geralmente a sensibilidade destes detectores depende da eficiência de absorção do material e da excitação espectral, que por sua vez depende da energia de "*bandgap*" do material semicondutor.

Os detectores quânticos podem ser divididos de duas maneiras diferentes:

 Considerando as transições eletrônicas excitadas pela radiação incidente que ocorrem através do "*bandgap*" fundamental do material sensível (detectores intrínsecos) ou

Detecção de Radiação Infravermelha

através dos níveis energéticos gerados no material pela adição de elementos dopantes (detectores extrínsecos), Figura 2.1.



Figura 2.1: Figura ilustrativa do mecanismo de excitação de elétrons nos detectores intrínsecos e extrínsecos

• Considerando o mecanismo de detecção, variação da condutividade do material (fotocondutivos) ou variação de tensão em uma barreira de potencial (fotovoltaicos).

A Tabela 2.1 resume os principais mecanismos e materiais utilizados em sensores infravermelhos. As tecnologias mais recentes são discutidas a seguir.

2.1.2 Detectores Térmicos

Neste caso, a radiação incidente absorvida pela estrutura do material provoca uma mudança em sua temperatura que causará a variação de alguma propriedade física ou elétrica no detector. Desta maneira, qualquer material ou objeto que possua alguma propriedade dependente da temperatura pode ser usado como um sensor térmico.

A maior parte dos detectores pode operar em temperatura ambiente e apresenta resposta espectral plana já que esses absorvem a radiação como um corpo negro. Devido ao processo de variação de temperatura do material, esses sensores possuem resposta lenta e menor sensibilidade comparada aos detectores de fótons. Atualmente, os principais exemplos deste tipo de detectores incluem bolômetros, termopares e detectores piroelétricos.

- Os termopares consistem de uma junção de dois materiais metálicos, onde a tensão de junção é proporcional à diferença de temperatura nesta região (efeito termoelétrico descoberto por Seebeck.). As termopilhas são basicamente uma série de termopares conectados que apresentam uma maior tensão de resposta (Sizov, 2000).
- Outro tipo de detectores térmicos são os bolômetros formados por um material absorvedor/resistor de radiação, que usualmente possui um alto valor de TCR (ou seja, uma grande variação de resistência em função da temperatura) e um material isolante que conecta o sensor ao ambiente com um substrato de suporte. A variação de resistividade do material provoca uma variação de corrente ou tensão que pode ser amplificada e medida (Figura 2.2) (Sizov, 2000).



Figura 2.2: Ilustração de um sensor bolométrico e seu sistema de medida.

- Os detectores piroelétricos consistem de um material polarizado que, quando sujeito as mudanças de temperatura apresenta uma variação de polarização da estrutura cristalina, que por sua vez provoca uma variação na corrente aplicada que pode ser monitorada externamente (Sizov, 2000).
- Existem, ainda, os detectores chamados de células de Golay onde ocorre uma expansão de um recipiente com gás (geralmente xenônio) devido ao seu aquecimento. Esta expansão provoca uma variação de pressão que afeta a posição de espelhos localizados
entre a fonte de radiação e a fotocélula. Variações no fluxo recebido pela fotocélula informam a quantidade de radiação incidente (Sizov, 2000).

Tabela 2.1: Resumo esquemático dos sensores IV disponíveis atualmente e suas subdivisões (Sizov, 2000). Sensores infravermelho



2.2 Figuras de Mérito

As figuras de mérito são parâmetros definidos com o objetivo de caracterizar e comparar diferentes detectores. Durante as últimas décadas um número diferente de figuras de mérito foi introduzido para atender a caracterização dos detectores IV. Muitas vezes encontram-se diferentes definições para o mesmo parâmetro, portanto aqui se apresentam as definições mais importantes segundo o trabalho de Datskos e Lavrik (2003): Responsividade (R), Potência equivalente de ruído (NEP), Detectividade normalizada (D*), Diferença de temperatura equivalente ao ruído (NETD) e tempo de resposta (τ).

2.2.1 Responsividade, R

O parâmetro de responsividade, R, pode ser aplicado a todos os detectores, reflete seu ganho e é definido como o sinal de saída do detector (tipicamente tensão ou corrente) produzido em resposta à potência radiante incidente.

$$\Re = \frac{V}{P_0} [V/W] \quad ou \quad \Re = \frac{I}{P_0} [A/W]$$
(2.1)

onde, V é a tensão de saída (em Volts) e I é a corrente de saída (em Ampères) e P₀ é a potência radiante incidente (em Watts)

A responsividade é um parâmetro útil que permite prever o sinal de resposta do sensor para uma dada potência ou comprimento de onda, ou como resultado da radiação de um objeto a uma dada temperatura e emissividade. Porém, este parâmetro não leva em consideração os ruídos intrínsecos do dispositivo não informando, portanto a sensibilidade do mesmo.

2.2.2 Potência Equivalente de Ruído, NEP

Uma forma conveniente de caracterizar a sensibilidade de um detector IV é especificar seu NEP, definido como a mínima potência incidente no detector que produz um sinal igual ao seu ruído rms. O NEP considera tanto o ganho do sistema quanto os parâmetros de ruído do detector e pode ser relacionado com a responsividade da seguinte forma:

$$NEP = \frac{V_N}{\mathfrak{R}_N} \quad ou \quad NEP = \frac{I_N}{\mathfrak{R}_N} \quad [W]$$
(2.2)

onde V_N é a tensão de ruído medida, I_N é a corrente de ruído medida e R_N é a responsividade correspondente ao sinal rms do ruído.

Segundo o trabalho de Phillips (1987) encontra-se o NEP relacionando a relação sinal ruído (S/N), a potência incidente (P₀) e o tempo de integração (Δt), da seguinte maneira:

Detecção de Radiação Infravermelha

$$NEP = \frac{P_0}{S_N} \sqrt{\Delta t} \qquad \begin{bmatrix} W \\ \sqrt{Hz} \end{bmatrix}$$
(2.3)

Aplicando-se a aproximação de Rayleigh-Jeans:

$$NEP = \frac{2kT\Delta\upsilon}{S_N}\sqrt{\Delta t} \qquad \begin{bmatrix} W_{\sqrt{Hz}} \end{bmatrix}$$
(2.4)

onde $\Delta \upsilon$ é a banda passante em Hz.

Acima nas Equações 2.2 e 2.3, o parâmetro NEP, assim como várias outras figuras de mérito, podem ser definidas numericamente por diferentes formas, dependendo das variáveis disponíveis para tal avaliação da performance.

2.2.3 Detectividade Normalizada, D[.]

O parâmetro NEP é geralmente suficiente para calcular e comparar a performance de um único detector prevendo a potência mínima detectável. Porém, uma figura de mérito diretamente proporcional à performance do detector é mais conveniente, permitindo avaliar da mesma maneira detectores com características diferentes. A detectividade normalizada (ou específica) é definida como o inverso do NEP considerando também a área ativa do sensor (região de absorção), A, e a banda de freqüências do sinal, Δf .

$$D^{*} = \frac{(A\Delta \upsilon)^{\frac{1}{2}}}{NEP} \quad [cmHz^{\frac{1}{2}}W^{-1}]$$
(2.5)

2.2.4 Diferença de temperatura equivalente ao ruído, NETD

É definido como a variação de temperatura do alvo acima (ou abaixo) da temperatura necessária para produzir um sinal igual ao ruído rms do detector. Alternativamente defini-se como a diferença de temperatura entre dois corpos negros que corresponde à razão sinal ruído de 1. Este parâmetro pode ser determinado experimentalmente para uma dada área, absorção, óptica e banda de freqüências.

$$NETD = \frac{V_N}{V_S} (T_s - T_B) \quad [K]$$
(2.6)

onde V_N é a tensão do ruído rms, V_S é a tensão do sinal, T_s é a temperatura do alvo e T_B é a temperatura de fundo.

2.2.5 Tempo de Resposta

De forma similar aos outros sensores ou transdutores, qualquer detector IV exibe um transiente característico quando uma variação de potência ocorre. O tempo de resposta pode ser calculado pela razão da capacidade térmica e sua condutância térmica.

$$\tau = \frac{C}{G} \qquad [s] \tag{2.7}$$

onde C é a capacidade térmica da região ativa do sensor e G é a condutância térmica total entre a região ativa e o suporte da estrutura.

2.3 Histórico da Tecnologia de Detecção IV

A história dos detectores térmicos inicia-se com Langley, em 1880, com a fabricação do primeiro bolômetro, seguido pelo descobrimento do efeito termoelétrico e fabricação do primeiro termopar por Seebeck, em 1921. Em 1929, Nobili constrói a primeira termopilha conectando em série vários termopares. E em 1947, Golay constrói uma nova versão de um detector IV pneumático (Rogalski, 2002).

Durante as décadas seguintes sensores bolométricos foram muito utilizados na detecção da radiação de fontes frias, porém sabia-se que a performance dos detectores térmicos apresentava limitações no tempo de resposta e sensibilidade tornando os detectores de fótons os mais utilizados e foco dos desenvolvimentos durante décadas.

Inúmeros desenvolvimentos tecnológicos envolvendo os detectores de fótons ocorreram durante o século XX. O inicio desta fase foi marcada pelo desenvolvimento do primeiro fotocondutor por Case em 1917 (Rogalski, 2002). Ele descobriu que o sulfeto de tálio exibia uma variação de condutividade quando exposto à radiação. Este primeiro dispositivo respondia para radiação infravermelha na faixa entre 1,3 e 7 μm. Mais tarde verificou-se que adicionando oxigênio a este material sua resposta era otimizada. Por volta dos anos 40, outros materiais também eram utilizados como material fotocondutivo, como por exemplo, o sulfeto de chumbo (Rogalski, 2003).

Entre as décadas de 40 e 50, uma variedade de novos materiais foram desenvolvidos como PbSe e PbTe para a faixa de 3-5 μm. Levinstein e seu grupo na universidade de Syracuse descobriram que o uso de dopantes em germânio permitia uma variação na resposta do sensor. Entre os materiais dopantes utilizados incluiu-se ouro, mercúrio, cobre e zinco com freqüências de corte de 8 μm, 12 μm, 24 μm e 35 μm, respectivamente (Levinstein e Mudar, 1975).

Foi na década de 50 que os primeiros sensores baseados em HgCdTe foram demonstrados. O sucesso deste material inspirou o desenvolvimento de três gerações de dispositivos detectores. A primeira geração foram arranjos lineares de detectores fotocondutivos que foram produzidos em grande escala, seguido pela segunda geração, matrizes bi-dimensionais de detectores fotovoltaicos e terceira geração de dispositivos, por exemplo, detectores capazes de captar duas cores.

O primeiro detector fotocondutivo extrínseco foi reportado no início dos anos 50 quando as técnicas para controlar a introdução de impurezas tornaram-se disponíveis para o germânio. A resposta fotocondutiva do germânio dopado com cobre, ouro e zinco permitiu sensores para a faixa (LWIR - *Long wavelength IR*) de 8 – 14 micrometros e (VLWIR - *Very long wavelength IR*) de 14 – 30 micrometros.

Durante a Segunda Guerra Mundial houve um crescimento exponencial no desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao imageamento infravermelho, devido às suas aplicações potenciais na área militar. Pode-se dizer que o grande avanço desta tecnologia teve e ainda tem implicações militares importantes.

No final dos anos 50 e início dos anos 60 houve a introdução de outros compostos como InAsSb e PbSnTe. Em 1959, pesquisas feitas por Lawson e co-autores (1959) impulsionou os desenvolvimentos de novos compostos de HgCdTe com "*bandgap*" variável.

No início dos anos 60, o desenvolvimento dos sensores para a faixa do infravermelho distante ou faixa THz do espectro, foi muito motivado pela astrofísica, com o interesse no estudo do

espectro rotacional de alguns gases. Nesta mesma época, quando as técnicas modernas de fotolitografia tornaram-se disponíveis, o desenvolvimento de matrizes lineares de sensores tornou-se possível. Esta tecnologia foi primeiramente demonstrada com detectores de PbS, PbSe e InSb.

No final da década de 60 e início da década de 70 foi desenvolvida a primeira geração de matrizes lineares com 60, 120, 180 e 240 elementos detectores baseados em HgCdTe.

Em 1973, Shepherd e Yang (1973) propuseram detectores formados por uma barreira Schottky de metal/siliceto/silício. Ao mesmo tempo, rápidos avanços foram feitos em semicondutores de "*bandgap*" estreito (Rogalski, 2003).

Em 1975, um trabalho de fotocondutividade em silício com resposta da ordem de picosegundos permitiu o desenvolvimento de métodos fotocondutivos e opto-eletrônicos para a geração e detecção de radiação na faixa THz do espectro. Nos anos 80, com o avanço das técnicas de micro-fabricação, matrizes bidimensionais com muitos elementos sensores começaram a ser demonstradas.

Durante as quatro últimas décadas, o HgCdTe tornou-se o semicondutor mais importante para fotodetectores no infravermelho médio e distante entre 3 e 30 micrometros e o infravermelho próximo foi dominado por InGaAs,InAsSb e InGaSb (Rogalski, 2002).

Até os anos 90, os detectores térmicos foram consideravelmente menos explorados comercial e militarmente em comparação com os detectores de fótons. A razão para esta disparidade é que os detectores térmicos são popularmente conhecidos por apresentar uma resposta mais lenta e pouco sensível em comparação com os detectores de fótons, merecendo menos iniciativas de investimento em pesquisas e fabricação. Na última década, porém foi mostrado que imageamento de excelente qualidade pode ser obtido através de arranjos de sensores térmicos não refrigerados, geralmente bolômetros ou sensores piroelétricos.

Nos últimos anos muitos países incluindo, EUA, Reino Unido, Japão, China, Suécia, Coréia e França estão desenvolvendo sistemas de imageamento IV não refrigerados (Rogalski, 2003). Segundo o trabalho de Rogalski, as maiores empresas fabricantes de FPA para IV são: Raytheon, Rockwell/Boeing, Mitsubishi, BAE Systems, Sofradir, Sarnoff, Eastman-Kodak, Marconi, AEG, JPL e Sensors Unlimited (Rogalski, 2002).

As principais etapas dos desenvolvimentos em sensores IV estão dispostas na Figura 2.3.



Figura 2.3: Principais avanços no desenvolvimento da tecnologia de sensores térmicos e de fótons.

O desenvolvimento de novos materiais e tecnologias foi e continua sendo principalmente direcionado para aplicações militares. Nos Estados Unidos da América, a guerra do Vietnã

causou o desenvolvimento de sistemas de imageamento que poderia produzir imagens sensíveis à emissão térmica de veículos terrestres, construções e pessoas.

Um aspecto negativo do financiamento e suporte das agências de defesa tem sido a necessidade de sigilo dos desenvolvimentos prejudicando colaborações entre novos grupos de pesquisa principalmente em nível internacional.

2.4 Arranjos Focais (Focal Plane Array – FPA)

Duas famílias de arranjos de sensores podem ser consideradas, uma utilizada para sistemas de varredura e outro para sistemas bidimensionais fixos (Rogalski, 2002). O mais simples conjunto linear de sensores para varreduras consiste de um único detector onde uma imagem é gerada por varreduras da mesma cena usando, normalmente, através de um sistema mecânico. Já um arranjo fixo é formado por uma matriz 2D de sensores que são lidos eletronicamente, Figura 2.4.

O sistema de varreduras, sem muitas funções pertence à primeira geração de FPA. Um exemplo típico é um conjunto linear (PbS, PbSe, HgCdTe) no qual um contato elétrico para cada elemento é trazido para fora do sistema de resfriamento, onde há um canal eletrônico a temperatura ambiente para cada elemento sensor (Rogalski, 2002).



Figura 2.4: Ilustração de um sistema de imageamento (FPA) tipo bidimensional fixo e de varreduras.

Os avanços tecnológicos vêm proporcionando um maior número de sensores por FPA e um aumento de funções relacionadas a cada sensor. Porém, uma das limitações para as próximas gerações de sensores é o próprio comprimento de onda da radiação IV, da ordem de micrometros. Segundo o trabalho de Rogalski (2003), os menores *pixels* já construídos são da ordem de 17 – 18 micrometros.

2.5 Novas tecnologias e tendências para o IV próximo, médio e distante.

Entre o material bibliográfico consultado encontram-se três tecnologias mais recentes que estão sendo pesquisadas, aperfeiçoadas e aplicadas na fabricação de novos dispositivos optoeletrônicos, são essas: poços quânticos, pontos quânticos e nano-fios.

Os poços quânticos utilizados como fotodetectores (ou QWIPs – *Quantum Well Infrared Photodetector*) foram sugeridos na década de 70 porém sua realização pratica só foi possível recentemente. Nesses sensores, a radiação é absorvida em um poço quântico dopado, excitando um elétron e transportando-o para uma mini-banda (ou sub-banda) até que esse seja coletado ou recapturado. Neste caso, os níveis energéticos estão confinados em apenas uma direção, por exemplo, na direção do crescimento dos poços (Figura 2.5).

Pela variação da largura do poço e de seu material pode-se detectar radiação até 20 μm (Schacham, 2005). Para sua fabricação costuma-se utilizar em sua maioria materiais baseados em GaAs, pois é um composto bem conhecido e com tecnologias de fabricação disponíveis.

Uma alternativa para os detectores QWIPs são os pontos quânticos, QDIPs (*Quantum Dot Infrared Photodetector*), que teoricamente podem apresentar uma performance muito superior, com maior detectividade e operando a temperaturas mais elevadas, devido à sua baixa corrente de escuro (Bhattacharya et al., 2002; Yakimov et al., 2001; Gunapala et al., 2006; Razeghi et al., 2002).

Os QDIPs são similares aos QWIPs com pontos quânticos nos lugares dos poços quânticos, apresentando confinamento de energia nas três dimensões (Figura 2.5). O processo de detecção inicia-se com a absorção de um fóton (o coeficiente de absorção é afetado pelo tamanho e formato do ponto quântico, assim como, pela polarização da luz incidente). Quando os fótons incidentes possuem energia igual ou superior ao "*gap*" energético da sub-banda ocorre a excitação de elétrons. As principais vantagens dos QDIPs sobre os QWIPs são: (a) Permite a detecção de radiação incidente normal à estrutura; (b) apresentam baixa corrente de escuro permitindo a operação em temperaturas mais elevadas e (c) maior responsividade. Os futuros desenvolvimentos desta tecnologia estão voltados para a fabricação de pontos quânticos menores e mais densos (para o aumento da eficiência de absorção) e para o melhor controle na implantação de dopantes.



Figura 2.5: Ilustrações de um poço quântico (acima) (Liu, 2003) e de um nano-fio (abaixo) (Das e Singaraju, 2005), ambos utilizados como fotodetectores infravermelho.

Existem ainda dispositivos baseados na utilização de nano fios contendo uma junção formada por dois nano fios, um ativo e um de barreira, ambos com contatos ôhmicos. A radiação IV incidente na região ativa promove a passagem de elétrons do nível energético E₁ para E₂ (ver Figura 2.5). Esses elétrons com maior energia podem atravessar facilmente a camada de barreira resultando em uma foto-corrente entre os terminais (Das e Singaraju, 2005).

Estas três diferentes tecnologias apresentadas acima constituem o estado da arte em sensores para a região do infravermelho, complementando o histórico da detecção IV exposta na seção 2.2.

2.6 Materiais utilizados no Infravermelho

Sistemas imageadores no infravermelho geralmente utilizam além dos elementos sensíveis à radiação, materiais refletores (p.e. espelhos de conjuntos ópticos) e materiais semitransparentes (para atenuadores, lentes, etc). Portanto, foi necessária a realização de uma vasta pesquisa bibliográfica para selecionar materiais com estas características na faixa THz, para que pudessem ser utilizados em parte de nossos experimentos.

Em imageamento THz é muitas vezes interessante utilizar materiais transparentes/refletores para as altas freqüências porém, que sejam bloqueadores de radiação no IV próximo. Desta forma, o aquecimento dos componentes devido à incidência da radiação IV de menor comprimento de onda é reduzido evitando a re-emissão de radiação IV proveniente do próprio sistema.

2.6.1 Materiais atenuadores

Entre os materiais mais utilizados na região infravermelha do espectro encontram-se o quartzo, o polietileno, polipropileno, TPX (polimetilpenteno) e PTFE (Teflon) (Afsar e Chantry, 1977).

O polietileno preto muito citado nas literaturas de IV (subdividido em alta densidade-HDPE e baixa densidade-LDPE), comumente usado para sacos de coleta de lixo, torna-se útil como filtro

óptico, pois ele absorve a maior parte da energia acima de 600 cm⁻¹ (16,7 μm ou 18 THz) e apresenta uma transmitância superior a 50 % abaixo de 200 cm⁻¹ (50 μm ou 6 THz). Porém, a transmitância do polietileno é dependente do tamanho, concentração e forma do carbono (negro de fumo) utilizado para torná-lo escuro, o que varia suas propriedades no IV (Benford et al., 2003).

O teflon é um bom bloqueador da radiação infravermelha, transmitindo na banda de 5 -10 micrometros e acima de 50 micrometros, limitando seu uso nestas bandas de freqüência. Muitos outros materiais absorvedores, como o "fluorogold" e "fluorosint", tem sido utilizado em aplicações para baixas freqüências (Benford et al., 2003).

O Zitex é um teflon com porosidade variando entre 1 e 60 micrometros e um fator de preenchimento de aproximadamente 50%. Com uma espessura de 200 μ m transmite menos de 1% entre 1-50 μ m enquanto atenua menos de 10% em comprimentos de onda maiores que 200 μ m. Existem diferentes variedades disponíveis deste material, por exemplo, o Zitex A é projetado para reproduzir filtros de papel, rugoso porém maleáveis (Figura 2.6).



Figura 2.6 : Curva de transmissão no infravermelho para o Teflon e Zitex G (Benford et al., 2003). O teflon transmite 80% da radiação a partir de 50 μ m e o zitex transmite a partir de 100 μ m também 80% da radiação

Existe também a qualidade de Zitex G com esferas pequenas de Teflon, resultando em um material mais denso e liso (Benford et al., 2003). Na Figura 2.6 estão as curva de transmissão para o Teflon convencional e para o Zitex tipo G. Abaixo de 3 THz estes materiais apresentam ótima transmissão tornando-se opaco para a região do infravermelho próximo e médio (Benford et al., 2003).

A seguir, as Figuras 2.7 e 2.8 mostram as curvas para os seis materiais mais citados na literatura, segundo três diferentes autores (Goldsmith, 1992; Lamb, 1996 ; Griffths et al., 2001).



Figura 2.7: Transmissão de materiais para o IV distante (Goldsmith, 1992; Lamb, 1996; Griffths et al., 2001).

Detecção de Radiação Infravermelha



Figura 2.8: Transmissão de materiais para o IV distante (Goldsmith, 1992; Lamb, 1996; Griffths et al., 2001).

Segundo as Figuras 2.7 e 2.8:

- Brometo de potássio é transparente para o IV médio bloqueando o intervalo de comprimentos de onda entre 50 e 500 micrometros, aproximadamente.
- O polietileno denso apresenta raias de absorção no IV próximo e médio transmitindo muito bem a partir de 20 micrometros.
- O teflon transmite bem para freqüências acima de 3 THz bloqueando o IV próximo e médio.

- O TPX transmite acima de 80% a partir de 50 micrometros.
- O polietileno de baixa densidade aparentemente é muito semelhante ao polietileno de alta densidade, transmitindo bem acima de 20 micrometros.
- E o quartzo bloqueia parte do IV médio e distante transmitindo abaixo de 5 micrometros e acima de 100 micrometros.

2.6.2 Materiais refletores

Como mencionado anteriormente, além de materiais atenuadores, a óptica utilizada em experimentos no IV também faz uso de materiais refletores otimizados para esta faixa de freqüências e para o experimento desejado.



Figura 2.9: Imagem no visível (à esquerda) e no infravermelho médio (à direita) mostrando uma placa de ouro com rugosidade de superfície de aproximadamente 1 µm provocando o espalhamento da luz visível (Vollmer, 2004).

A supressão da radiação térmica é uma condição importante para sensores destinados a medidas de fontes intensas de radiação. Um método proposto utiliza um aparato refletor com superfície rugosa (Deming et al., 1991 e Kostiuk e Deming, 1991).

Na Figura 2.9 tem-se um exemplo do uso de uma superfície metálica com deposição de ouro rugoso como refletor da radiação IV. Este material é um péssimo espelho para a luz visível, porém apresenta boa refletividade no infravermelho, devido à relação da rugosidade de superfície e o comprimento de onda da radiação incidente. Se o comprimento de onda, λ , é

menor ou da ordem da dimensão da rugosidade de superfície, a luz é espalhada difusamente e nenhuma imagem pode ser formada. Para comprimentos de onda maiores que as dimensões da rugosidade (bem acima do limite de 20λ), a radiação é refletida como em um espelho convencional (dependendo do ângulo de incidência, naturalmente).



Figura 2.10: Micrografia eletrônica de um espelho rugoso de alumínio "super-evaporado" (a) e superfície com ranhuras em uma placa de alumínio.

No decorrer deste trabalho foi evidenciada a necessidade de um bloqueador de IV próximo para possíveis aplicações em experimentos espaciais de imageamento THz. Desta forma, duas amostras de superfícies rugosas foram fabricadas por Rogério Marcon (Instituto de Física Glebb Watting – IFGW, UNICAMP e Observatório Bernard Lyot, OSBL, Campinas) e Thomas Rose (*Radiometer Physics*, RPG, Alemanha). A Figura 2.10 exibe micrografias eletrônicas das duas amostras exibindo rugosidades de 0,5 e 50 µm, aproximadamente.

Capítulo 3 Sintonia em Rádio-Freqüência na Faixa THz

Para a realização e aplicações dos sensores fotométricos/imageadores considerados neste estudo, torna-se essencial adotar técnicas que permitam delimitar bandas passantes centradas em diferentes freqüências – ou seja, definir sintonia de RF na região THz. Neste trabalho optamos pelas redes ressonantes. Essas apresentam vantagens sob os outros dispositivos, já que seu método de fabricação é relativamente mais simples do que os outros e pode-se adequar o projeto da malha à resposta desejada.

Aqui se apresenta o estudo, projeto e fabricação de malhas ressonantes para freqüências na região intermediária entre o limite superior da região espectral submilimétrica e a região do infravermelho distante.

Os primeiros estudos de filtros a malha ressonante no Centro de Componentes Semicondutores (UNICAMP) foram realizados por Cristiano J. N. Arbex em 2002 com resultados preliminares encorajadores (Arbex, 2007). Aproveitando em parte a experiência adquirida, procuramos aqui aprofundar o conhecimento sobre os fenômenos e processos envolvidos nesta tecnologia, para promover sua melhor fabricação para várias outras freqüências de interesse aplicado. Especial atenção foi dedicada no estudo de outros trabalhos de pesquisa que serão citados abaixo, para definir a utilização de um só processo de fabricação idêntico para todos os filtros, adequando apenas algumas características específicas de processo para as diferentes freqüências e concentramos esforços para que as curvas de transmissão fossem medidas com precisão em toda a banda de freqüência.

Este capítulo está dividido em uma breve revisão bibliográfica das principais publicações estudadas junto aos quais os resultados aqui apresentados podem ser comparados, detalhamento dos cálculos de projeto e fabricação, e finalmente as simulações e testes experimentais.

3.1 Introdução à sintonia no IV

Diferentes filtros quase ópticos têm sido desenvolvidos para aplicações nesta faixa do espectro eletromagnético. Segundo Goldsmith (1992) esses podem ser classificados em quatro categorias: estruturas bidimensionais, tridimensionais, interferômetros de feixe duplo e múltiplos feixes.

Na primeira categoria encontram-se estruturas planares que interagem com a radiação em virtude do padrão de condutores que são periódicos em duas dimensões (*FSS Frequency Seletive Surface*). Isto inclui geometrias básicas como fios orientados paralelamente ao campo elétrico, com espaçamento maior que $\lambda/2$, agindo como filtros passa alta em transmissão. Estruturas complementares possuem transmissão inversa à estrutura original, ou seja, neste caso seria um filtro passa baixa em transmissão. Existem diversas referências de diferentes geometrias que exibem comportamento ressonante tais como, anéis, cruzes, tripolos, e outras geometrias mais complexas (Goldsmith, 1992).

A segunda categoria de filtros inclui estruturas tridimensionais que são periódicas em duas dimensões, mas que possuem extensão arbitrária na terceira dimensão. Nesta categoria estão matrizes de guia de ondas ou filtros dicróicos. Cada guia de onda exibe uma freqüência de corte que é propriedade da matriz, portanto o comportamento é de um filtro passa alta em transmissão (Goldsmith, 1992).

Interferômetros de duplo feixe são derivados do interferômetro de Michelson, cujo principio básico é dividir o feixe incidente em duas partes, atrasar um em relação ao outro e então recombiná-los. Já os interferômetros de múltiplos feixes são baseados em repetidas reflexões entre espelhos parcialmente refletores, geralmente chamados interferômetros Fabry-Perot. A resposta destes dispositivos depende da refletividade dos espelhos assim como de suas separações (Goldsmith, 1992).

Existem também diferentes tipos de antenas planares microfabricadas juntamente como os detectores infravermelhos, que aumentam a diretividade, possibilita a medida de polarização e seleção de bandas passantes (González et al., 2004).

3.2 Malhas Ressonantes – Revisão dos resultados conhecidos

Os filtros de malha ressonante ou superfícies seletoras de freqüência podem exibir respostas em freqüência de filtros passa alta, passa baixa, passa banda e rejeita banda. Para transformar um filtro passa alta em um filtro passa baixa, os espaços condutivos e não condutivos da malha são trocados. Na literatura duas geometrias básicas são estudadas. A primeira refere-se a uma matriz indutiva exibindo performance de filtro passa alta. O segundo caso é a matriz capacitiva que exibe resposta passa baixo. Se os elementos periódicos de uma matriz possuir características de ressonância, a matriz indutiva irá transmitir os comprimentos de onda próximos ao comprimento de onda de ressonância enquanto a matriz capacitiva exibirá total reflexão.



Figura 3.1: Exemplo de grades ressonantes (a) grade indutiva, passa-alto; (b) grade capacitiva, passa-baixo e (c) malha ressonante, passa-banda, resultante da junção das duas malhas anteriores (a) e (b).

A junção de uma matriz capacitiva e outra indutiva nos permite produzir um filtro passa banda com padrões de cruzes (ver Figura 3.1c). Estes filtros são compactos, relativamente fáceis de fabricar comparando-se com outras técnicas de filtragem, exibem boa transmissão de freqüência central, banda passante estreita e ajustável no projeto e boa rejeição das freqüências indesejáveis (Porterfield et al., 1994).

Na Figura 3.1 os parâmetros da rede G (período entre cruzes), L (comprimento da fenda) e K (largura das cruzes) definem a geometria e resposta espectral da malha (Lee et al., 1982; Chase e Joseph, 1983; Porterfield et al., 1994; Möller et al., 1996; Winnewiser et al., 1999;). Na literatura também encontramos os parâmetros a, b e g, equivalentes. Para unificar e tornar possível comparações entre diferentes trabalhos considera-se:

$$a = \frac{G-L}{2} \qquad e \quad b = \frac{K}{2}$$

O projeto das malhas ressonantes pode utilizar a técnica de escalonamento linear das dimensões G, K e L (Porterfield et al., 1994). Este foi o método adotado em nossos desenvolvimentos baseando-se nesta literatura para obter os valores numéricos iniciais dos parâmetros acima citados (ver Figura 3.2).



Figura 3.2: Tabela com os parâmetros dos filtros e gráfico com as curvas de resposta medidas, conforme Porterfield et al. (1994). Neste trabalho o parâmetro K refere-se ao comprimento à J a largura das cruzes.

Porterfield et al. (1994) também apresentam importantes considerações sobre o desempenho dos filtros, tais como:

- A largura de banda do filtro a meia potência varia inversamente com G/K e G/L;
- As perdas são causadas principalmente por perdas ôhmicas no material metálico;

- Como as aberturas individuais são sempre menores do que o comprimento de onda de interesse, os processos de espalhamento e difração não são considerados;
- Os filtros não exercem efeito de polarização da radiação;

Na Figura 3.2 tem-se os resultados obtidos no trabalho citado para filtros de 585 GHz, 1,17, 1,523 e 2,084 THz, composto por uma superfície de cobre sem a material polimérico de suporte ao metal (ex. Mylar ®). Estes filtros exibiram transmissão superior a 90% com largura de banda entre 15 e 19% da freqüência central.

Em alguns trabalhos encontram-se correspondências entre as razoes de a/G e b/G com a resposta de transmissão. Os resultados representados na Figura 3.3 demonstram que a freqüência de transmissão não é determinada apenas pela escolha da periodicidade. Chase e Joseph (1983) também mostram que a razão entre o comprimento de onda central (λ_m) e o comprimento L das fendas é aproximadamente 2,1 para (b/a)>1 e decresce com o aumento de b/a sendo que a largura de banda aumenta com a razão b/a.



Figura 3.3: Curvas de transmissão medidas para diferentes filtros com parâmetros de rede a e b diferentes (Chase e Joseph, 1983).

No trabalho de Chase e Joseph foram fabricados filtros de duas diferentes maneiras denominados: "*freestanding*" (suspenso) e "*supported*" (suportado) porém, não há distinção sobre a diferença dos resultados nem tão pouco a qual malha se refere as curvas medidas. O primeiro consistia de uma camada de Níquel de 4 micrometros corroído nos padrões de cruzes e o segundo seria a corrosão de filme fino de Mylar® com 1,5, 10 e 5 micrometross de espessura

O uso de Mylar® ou outros materiais poliméricos como suporte para filmes metálicos, com espessura de alguns micrometros ou mais, é muito satisfatório para longos comprimentos de onda. Porém, estes materiais introduzem níveis indesejáveis de absorção para comprimentos de onda menores que 30 micrometros aproximadamente (Ulrich, 1967). Para evitar tais problemas alguns trabalhos utilizam o processo de eletrodeposição de material metálico já no formato desejado sem que seja necessária a utilização de material para suporte. Neste caso a espessura do filme crescido será proporcional à dimensão K da malha. Este é o método "*freestanding*" citado acima.

Além desta limitação no uso dos filmes plásticos outros fatores podem influenciar a resposta dos filtros como falhas e defeitos causados durante o processo de fabricação tais como, irregularidade no filme de fotorresiste, contato ruim entre a máscara e o fotorresiste durante o tempo de exposição à radiação UV e falhas durante o processo de revelação do fotorresiste. Estes defeitos causam baixa definição das bordas das fendas e irregularidades em diferentes áreas na superfície, ocasionando variações na curva de transmissão esperada, como diminuição do máximo de transmissão, baixa rejeição juntamente com o aumento da freqüência central de transmissão e aumento da largura de banda. (Tomaselli et al., 1981; Möller et al., 1996). A maioria dos filtros apresenta pequenos "*pinholes*" no filme metálico, mas usualmente são muito menores do que o comprimento de onda da radiação de interesse.

Os resultados do trabalho de Page et al. (1994) estão dispostos na Figura 3.4 onde mostram-se curvas de transmissão medidas para malhas ressonantes entre freqüências de 138 a 510 GHz. Estes filtros consistem de um filme de Mylar® de 25 micrometros de espessura com uma fina camada de aproximadamente 800 Å de alumínio. Para estes filtros os picos de transmissão ocorrem entre 65 e 90% e larguras de banda entre 16 e 46 % da freqüência central de transmissão.



Figura 3.4: Medidas de transmissão para malhas ressonantes com freqüências na região submilimétrica do espectro conforme Page et al, 1994.

Möller et al., (1996) demonstraram que filtros fabricados com a mesma máscara podem apresentar respostas em freqüência diferentes, veja os exemplos A e B na Figura 3.5. Segundo o autor estas diferenças são causadas por variações no processo de fotolitografia durante a fabricação. Diferenças na espessura do material metálico também podem interferir nas respostas de transmissão.

As imagens mostradas na Figura 3.5 ilustram o método de fabricação de Möller et al. (1996) para filtros suspensos, também adotados por nós nesta fase do projeto (detalhes do processo de fabricação encontram-se na seção 3.3).

Em outro trabalho mais recente Möller et al. (2002) apresentaram simulações para filtros (entre 7,5 e 15 THz) com os mesmos valores de a, b e G, variando apenas as espessuras do material metálico. Como resultado encontrou-se múltiplos picos de transmissão, variáveis com a espessura do metal. Segundo os autores o primeiro pico ocorre aproximadamente no valor do parâmetro de G (Figura 3.6). Estes efeitos poderão ser vistos também em nossas simulações na seção 3.4.



Figura 3.5 Imagem 3D do processo de fabricação das redes e do resultado final ampliado para um elemento apenas. As dimensões a, b e g para os diferentes filtros, A, B e C, e suas curvas de transmissão são mostradas abaixo (Möller et al., 1996).



Figura 3.6: Curvas de transmissão simuladas para uma rede ressonante com parâmetros G=20 μ m, a= 0,75 μ m e b= 1,5 μ m para diferentes espessuras do material metálico (Möller et al, 2002).

O estudo destes métodos e respectiva literatura técnica foram essenciais para a compreensão de aspectos práticos para realização do projeto e fabricação dos nossos filtros.

3.3 Projeto e Fabricação

As primeiras pesquisas visando o desenvolvimento de filtros de malha ressonante para 405, 670 e 850 GHz, foram realizadas no CCS utilizando materiais poliméricos metalizados e processo de fotolitografia para a corrosão dos padrões geométricos. Na seqüência foram realizadas as primeiras tentativas de fabricação por eletrodeposição metálica (Arbex, 2006). As malhas fabricadas foram parcialmente testadas na empresa RPG, *Radiometer Physics*, Mackenheim, Alemanha. Poucos pontos discretos de freqüência foram medidos, porém os resultados qualitativos foram encorajadores, ver Figura 3.7. Porém, estes resultados parciais não permitiram estimar as respectivas freqüências centrais, nem as bandas passantes (aparentemente bem extensas).

Na presente fase dos desenvolvimentos optou-se pela técnica de eletrodeposição, pelas razões discutidas. Através de processos de litografia prepara-se um substrato para a deposição do material metálico. Desta maneira dispensa-se o uso de materiais plásticos como suporte, otimizando a transmissão dos filtros e ainda melhorando suas características mecânicas, pois os primeiros filtros fabricados apresentaram uma grande fragilidade ao manuseio assim como degradação com o tempo.



Figura 3.7: Resultado dos testes feitos na RPG para os filtros de 405 e 670 GHz (Arbex, 2006).

O projeto das máscaras utilizou o escalonamento a partir dos valores obtidos por Porterfield et al. (1994), supondo variação linear das constantes K, L e G com a freqüência. Desta maneira obtive-se os valores mostrados na Tabela 3.1, onde encontram-se as dimensões dos parâmetros de rede para todas as freqüências (405, 670 e 850 GHz e 2, 4 e 8,5 THz), divididos entre os valores das máscaras projetadas e ao lado os valores medidos da malha após sua fabricação, através do microscópio.

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros K, L e G, em micrometros, para as máscaras e malhas ressonantes de todas as freqüências.

	405 GHz		670 GHz		850 GHz		2 THz		4 THz		8,5 THz	
	máscara	filtro										
L	322,5	370	225	225	175	175	75	76	35	38	15	18
к	105	110	60	60	50	50	20	22	7,5	10	5	4
G	580	590	375	350	270	302,5	115	120	50	60	26	28

A Figura 3.8 mostra um gráfico da variação dos valores de L, K, e G da máscara e do filtro onde se pode verificar que houve algumas variações nas dimensões durante o processo de fabricação, que poderia resultar em mudanças na curva de resposta esperada.



Figura 3.8: Gráfico com as variações dos parâmetros nas máscaras projetadas e nos respectivos filtros após sua fabricação.

As máscaras utilizadas foram fabricadas no Centro de Pesquisas Renato Archer (CENPRA), para as seis diferentes freqüências, e o processo de fabricação das malhas foi desenvolvido no Centro de Componentes Semicondutores (CCS – Unicamp) e no Laboratório de Microeletrônica (LME) do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, LNLS, em Campinas. A realização deste trabalho teve a colaboração direta da professora Dra. Maria Beny Zakia (CCS), Emílio C. Bortolucci (CCS) e Maria Helena Piazzetta (LNLS).

Na fabricação foram utilizadas laminas de silício recém preparadas com a deposição de filmes finos de óxido de silício (1,5 μ m), titânio (200 Å) e ouro (600 Å). O titânio apresenta a aderência necessária para a deposição de ouro, que possui condutividade excelente para o posterior processo de eletrodeposição de níquel.

O processo fotolitográfico utilizou o fotorresiste SU-8 pra todas as lâminas, depositado com rotação de 1000 rpm por 30 segundos para as freqüências de 405, 670 e 850 GHz e 2 THz e rotação de 1500 rpm por 30 segundos para as malhas de freqüências mais elevadas (4 e 8,5 THz).

Após esta etapa todas as lâminas foram submetidas a um tratamento térmico dividido em 3 fases: 5 minutos a 65°C, 15 minutos a 95°C e 5 minutos a 65°C. A primeira e última fase a 65°C evita que as lâminas sofram algum choque térmico provocando bolhas e rugosidades no filme de fotorrestiste depositado.

As lâminas foram a seguir expostas à radiação ultravioleta (lâmpada 9,5 mJ/cm², 350W) por 40 segundos e 30 segundos para os dois diferentes grupos de máscaras acima citados e então um novo tratamento térmico idêntico ao anterior. Para a retirada do fotorresiste foram testados diferentes tempos de revelação, fixando-se em 2 minutos (freqüências mais baixas) e 1 minuto e 20 segundos (freqüências mais elevadas). Finalmente as lâminas foram expostas a mais um tratamento térmico. Todo este processo encontra-se resumido na Tabela 3.2 e ilustrado na Figura 3.10.

Amostras de 405,	Amostras de 4 e 8,5 THz			
670, 850 GHz e 2 THz				
Lâmina preparada	Lâmina preaparada			
Fotorresiste SU8 – 25	Fotorresiste SU8 – 25			
Spinner 1000 rpm por 30s	Spinner 1500 rpm por 30s			
Cura 5 min a 65°C	Cura 5 min a 65°C			
15 min a 95°C	15 min a 95°C			
5 min a 65°C	5 min a 65°C			
Exposição UV 40 s	Exposição UV 30 s			
Cura 5 min a 65° C	Cura 5 min a 65° C			
15 min a 95°C	15 min a 95°C			
5 min a 65°C	5 min a 65°C			
Revelador $\approx 2 \min$	Revelador $\approx 1:20 \text{ min}$			
Cura 15 min a 95°C	Cura 15 min a 95°C			

Tabela 3.2: Tabela resumida com os procedimentos de fabricação das malhas ressonantes.

O processo descrito, na Tabela 3.2, resulta em uma lâmina preparada com SiO₂, Ti e Au e "paredes" depositadas de fotorresiste no formato dos padrões da máscara assim como mostra a Figura 3.9.

Após o processo fotolitográfico as lâminas estão prontas para a eletrodeposição do material metálico que formará o filtro. Para a eletrodeposição do níquel, faz-se uso de banho WATTS a 50°C composto por sulfato de níquel, cloreto de níquel, ácido bórico e água. A densidade de corrente aplicada foi de 3 A/dcm².



Figura 3.9: Ilustração da lâmina após o processo fotolitográfico.

A última etapa consiste na corrosão das camadas de ouro, titânio e óxido de silício para a retirada da malha metálica, utilizando Cianeto de Potássio (KCN) para a remoção do ouro e Buffer de HF para a remoção do óxido de silício e titânio. Todas estas etapas estão mostradas graficamente na Figura 3.10.



Figura 3.10: Etapas de fabricação dos filtros. Do topo para baixo temos a seqüência dos processos, preparação da lâmina (A), deposição de fotorresiste (A), revelação (B), eletrodeposição (C e D) e corrosão (E).

Os resultados são mostrados na Figura 3.11 com fotos dos diversos filtros fabricados, realizadas com a ajuda de um microscópio. Para os filtros de 405, 670, 850 GHz e 2 THz o formato das cruzes aparentemente permanece retangular, com ótimo perfil de bordas e cantos. Para as freqüências mais

elevadas (4 e 8,5 THz) os filtros apresentaram arredondamento das bordas, ainda mais acentuado para 8,5 THz.



Figura 3.11: Fotos ampliadas dos diferentes filtros fabricados com suas respectivas dimensões

A Figura 3.12 mostra o perfil tridimensional das cruzes para 405, 670, 850 e 2 THz obtidos por microscopia eletrônica. Nestas imagens confirma-se que para as freqüências mais baixas de 405 e 670 GHz o processo de fabricação foi totalmente satisfatório, resultando em cantos e bordas muito bem definidas. Porém, já para as freqüências de 850 GHz e 2 THz, que nas imagens da Figura 3.12 pareciam também com bom perfil de borda, as imagens mostram um efeito arredondado não apenas nos cantos, mas também nos "*braços*" horizontais das cruzes. Deve-se salientar que os filtros de maior freqüência, 4 e 8THz, não puderam ser inspecionados pela micrografia eletrônica pois se encontravam em testes na Alemanha, não havendo outra amostra disponível.



Figura 3.12: Micrografia eletrônica de alguns filtros fabricados (405, 670, 850 GHz e 2 THz) obtidas através de um microscópio eletrônico (IG – UNICAMP).

Estes efeitos podem ter sido ocasionados durante diferentes estágios do processo fotolitográfico, que poderá ser otimizado futuramente para sua eliminação ou ainda pode-se re-projetar a máscara considerando estes efeitos.

3.4 Simulações

Durante o processo de fabricação desses filtros houve a possibilidade de simular o perfil de resposta esperado das malhas ressonantes já fabricadas para posterior comparação com os testes efetuados (descritos na próxima seção).

Estas simulações de sintonia, para verificação de curva de resposta, freqüência central e banda passante, foram realizadas com o software CST Microwave Studio utilizando as facilidades do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado e Computacional da UNICAMP (LEMAC) com a colaboração do estudante de doutorado Alexandre M. P. Alves da Silva e do Prof. Hugo Figueroa, seu orientador. O software utiliza o método numérico FIT, *Finite Integration Technique*, proposto primeiramente por Weilland (1977). Nesse método, diferentemente da maioria dos métodos numéricos, as equações de Maxwell são discretizadas na sua forma integral, ao invés da forma diferencial, sendo uma formulação alternativa para o método de diferenças finitas.

Na simulação, uma onda plana atinge uma face do filtro, onde, em uma determinada faixa de freqüência, o sinal é refletido e, em outra, é transmitido através do mesmo. Para simular uma rede infinita de elementos foram definidas, como condições de contorno laterais a um elemento único, paredes elétricas (Et=0) e paredes magnéticas (Ht=0). Como o sentido de propagação da onda plana é perpendicular ao plano da estrutura, não há diferença de fase do sinal que atinge um elemento em relação aos outros elementos do filtro, assim sendo, pode-se obter a resposta de um filtro infinito com a simulação de um único elemento, ver Figura 3.13.

Foram considerados os valores de G, L e K, projetados para as máscaras e os valores reais obtidos na malha fabricada, medidas através do microscópio após a fabricação. Na Figura 3.14 encontram-se as duas curvas de resposta simuladas para as freqüências de 405, 670, 850 GHz e 2, 4 e 8,5 THz.

As larguras de banda a meia potência (3dB) obtidas nas simulações variam entre aproximadamente 14 e 24% da freqüência central. Na Tabela 3.3 estão dispostas, em porcentagem, as variações dos valores das freqüências centrais (Fc) em relação à freqüência original de projeto. Não existem variações significativas para as simulações dos filtros após a fabricação. Na Figura 3.14 estão dispostas as curvas de resposta em freqüência simuladas para todos os filtros. Considerando que os filtros de 4 e 8.5 THz fabricados apresentaram um certo perfil arredondado, nessas simulações incluiu-se também esta característica para estas freqüências.



Figura 3.13: Simulador CST Microwave Studio exemplificando as condições de contorno necessárias para as simulações de uma rede infinita de elementos (www.cst.com).

Tabela 3.3: Valores comparativos para os resultados simulados para os filtros de 405, 670, 850 GHz e 2 e 4 THz.

Freqüência Central (GHz)	λ _{FC} (μm)	Espessura (µm)	∆B Filtro (% Fc)	ΔB Máscara (% Fc)	Fc filtro (GHz)	ΔFc
405	740	42	24,2	15,4	413	2%
670	448	27	18,8	22,6	665	0,7%
850	353	26	14,8	22,7	845	0,6%
2000	150	23	16,7	14,9	2030	1,5%
4000	75	16	14,7	12,2	4067	1,7 %



Figura 3.14: Curvas de resposta em freqüência simuladas com o software CST Microwave Studio (www.cst.com) para as freqüências de 405, 670, 850 GHz e 2, 4 e 8.5 THz, para os parâmetros da máscara e do filtro após sua fabricação.

Na Figura 3.15 pode-se verificar as diferentes espessuras e sua relação com as dimensões das fendas. Através destas medidas analisa-se a relação da espessura com o comprimento de onda da radiação, ou seja, com o λ da freqüência central da banda.



Figura 3.15: Ilustração das características das malhas ressonantes fabricadas, espessura medida, comprimento de onda ressonante, λ_{FC} , e porcentagem da espessura em relação ao λ_{FC} . Ocorre o aumento excessivo da espessura do filtro para as freqüências mais elevadas, chegando a 70% do comprimento de onda.

Para os filtros de 405, 670 e 850 GHz a espessura é da ordem de 6% do comprimento de onda. Porém, conforme a freqüência ressonante aumenta constata-se a importância de se considerar a espessura do filme uma das variáveis relevantes de projeto. Para 2 THz a espessura corresponde a 15% do λ_{FC} , para 4 THz, 21,3% do λ_{FC} e finalmente para 8.5 THz temos 74% do λ_{FC} .

Este aumento na espessura do filme em relação ao comprimento de onda deve ocasionar perdas e interferências da radiação durante sua passagem através do material. E pode explicar a presença de bandas duplas de ressonância para as freqüências mais elevadas.

Para que a relação entre a espessura e λ_{FC} mantenha-se em aproximadamente 6%, como para as freqüências mais baixas, os filtros de 2, 4 e 8,5 THz deverão possuir 9,2, 4,5 e 2,1 micrometros de espessura, respectivamente. Para os próximos filtros fabricados devem-se considerar estes valores.

Para as freqüências mais elevadas, 4 e 8 THz, também foram feitas simulações para a avaliação da importância do arredondamento de bordas e de espessura do material metálico depositado, que foram observados durante a inspeção das malhas no microscópio.

3.5 Medidas Experimentais

Uma amostra de cada filtro, para as seis freqüências fabricadas, foram submetidos a testes completos de resposta em freqüência no Instituto Max-Planck para Pesquisas Extraterrestres, em Garching na Alemanha.

Nesse laboratório foram utilizados os instrumentos para os ensaios destinados aos testes do projeto PACS – Photodetector Array Câmera & Spectrometer, um dos experimentos que estarão a bordo do satélite Herschel destinado a pesquisas de objetos celestes no infravermelho distante e faixa submilimétrica do espectro eletromagnético. As faixas de freqüências destinadas as observações pelo PACS são: 57 – 210 μ m (para imageamento), 60 – 85 μ m, 85 – 130 μ m e 130 – 210 μ m (fotometria) (Poglitsch, 2006).

A realização destes testes contou com a colaboração direta do Dr. Mariano Kornberg, pesquisador do projeto, com apoio dos Drs. Otto Bauer (diretor do laboratório) e Albrecht Poglitsch (Principal Investigador do experimento PACS).

Nos testes a energia de uma fonte de infravermelho (usualmente uma lâmpada de vapor de Hg sob pressão) é colimada em direção a um *beamsplitter*, que idealmente deverá refletir 50% da luz
incidente e transmitir os outros 50%, criando dois feixes separados. O *beamsplitter* é um material semi-refletor, geralmente feito de um filme fino de Germânio depositado em um substrato de brometo de potássio, KBr. Em um dos caminhos o feixe é refletido por um espelho fixo de volta para o *splitter* onde é parcialmente refletido para a fonte e parcialmente focado no detector. O outro feixe formado é também refletido, por um espelho móvel que pode ser transladado paralelamente. O feixe refletido por este espelho também retorna para o *splitter* onde é parcialmente transmitido de volta para a fonte e parcialmente refletido ao detector (Figura 3.16 e 3.17).



Figura 3.16: Foto do laboratório de medidas no Instituto Max Planck para física Extraterrestre, Garching, Alemanha com o instrumento *Spectrometer Fourier Transformer* (FTS) utilizado ao fundo.



Figura 3.17: Diagrama mostrando o sistema óptico de medidas do espectrômetro por transformada de Fourier, utilizado na realização das presentes medidas (Kornberg, 2006)

A energia que incide no detector é a somatória destes dois feixes. Se a distância do centro do *beamsplitter* até o espelho fixo é a mesma distância do *beamsplitter* para o espelho móvel, então os dois feixes viajarão distâncias iguais. Quando o segundo espelho é movimentado, a distância óptica percorrida torna-se diferente e ocorrem interferências destrutivas e construtivas entre os feixes, dando origem a um interferograma (intensidade versus posição do espelho móvel). Este interferograma possui a informação espectral da radiação. Conhecendo sua forma matemática e aplicando o método de transformadas de Fourier podemos conhecer suas componentes espectrais (intensidade *versus* comprimento de onda).

O feixe resultante de radiação atravessará uma amostra e incidirá posteriormente no detector. Quando a amostra é introduzida, o espectro exibe todas as características de absorção da amostra sobreposto às características do "*background*". Os filtros foram colocados em A e a medida comparativa de fundo foi realizada através do percurso B, sem nenhuma amostra, ver Figura 3.17.

Os testes foram realizados para os filtros de 405, 670, 850 GHz e 2, 4 e 8,5 THz. As curvas de resposta em freqüência estão dispostas na Figura 3.18.



Transmissão

Figura 3.18: Curvas medidas de resposta em freqüência para os filtros de 405, 670, 850 GHz e 2, 4 e 8,5 THz, obtidos com a instrumentação utilizada para testes do experimento PACS do satélite Herschel.

Verificou-se que a variação da freqüência central de transmissão foi de apenas 2,5%, 0,6%, 0,95%, 4,5% e 9,5% para 405, 670, 850 GHz e 2 e 4 THz, respectivamente. O filtro de 8,5 THz apresentava danos físicos aparentes, sendo esta a mais provável causa da fraca resposta.

Os valores encontrados de largura de banda a meia potência são de 17,6% para 405 GHz, 14,2% para 670 GHz, 14% para 850 GHz, 10,7% para 2 THz e 8,8% para 4THz em relação a freqüência central. As transmitâncias para os filtros foram de 88%, 87%, 84%, 75% e 67%, respectivamente. Os resultados podem ser considerados excelentes quanto à sintonia, e quanto às larguras de banda - as mais estreitas procuradas neste projeto.



Figura 3.19: Largura de banda a meia potencia em função da freqüência central de resposta dos filtros construídos e para filtros produzidos por outros autores.

Na Figura 3.19 encontram-se os valores de largura de banda a meia potência obtida por diferentes autores demonstrando coerência entre os resultados em freqüências próximas aos filtros fabricados. Filtros com larguras de banda acima de 30% e para altíssimas freqüências, próximas a 20 THz, também já foram fabricadas por outros autores.

Conclui-se que a delimitação de freqüências através do uso de malhas ressonantes pode ser adaptada em relação à sua freqüência ressonante assim como sua banda passante, dependendo das características exigidas pela aplicação.

3.6 Comparação Resultados versus Simulação

A comparação entre os resultados experimentais e as simulações para os filtros indicam diferenças nas larguras de banda, freqüência central e transmitância (veja Fig. 3.20). Enquanto que para os testes experimentais a largura de banda variou entre 14,7% e 24,2% e nas simulações a variação foi de 8,8% a 17,6%. A variação percentual da freqüência central foi de 4,4%, 1,3%, 1,5%, 2,9% e 7% para 405, 670, 850 GHz e 2 e 4 THz, e a variação na transmissão dos filtros foi de 10%, 8%, 11%, 15% e 21% para as mesmas freqüências citadas.

Para o filtro de 4 THz, a resposta simulada refere-se ao padrão arredondado (mostrado na Figura 3.15) pois, este se assemelha mais a estrutura real (ver Figura 3.12). Para esta mesma freqüência a resposta simulada apresenta um aumento de transmissão próximo a 5 THz, que não existe em nossos resultados experimentais.

Os resultados comparativos (Fig. 3.20) podem ser considerados como muito satisfatórios, para uma avaliação prévia aproximada. As diferenças encontradas podem estar relacionadas a alguns fatores, tais como: a simulação reproduz os testes para uma malha infinita e a estrutura simulada é perfeita, desconsiderando as imperfeições inerentes à estrutura real como, perfis de borda e contorno, estrutura da parede interna do filtro, pureza do material depositado e imperfeições na superfície do filtro.



Figura 3.20 Comparação entre curvas de resposta em freqüência simuladas com o software CST Microwave Studio e os testes experimentais obtidos para as freqüências de 405, 670, 850 GHz e 2 e 4 THz.

Capítulo 4 Ensaios e Caracterização com Câmera para Infravermelho Médio

Este capítulo descreve todas as etapas envolvidas nos ensaios experimentais que utilizaram câmeras comerciais para o IV médio (banda $8 - 14 \mu m$, ou centrada em 30 THz). A instrumentação utilizada é descrita e os primeiros resultados das aplicações serão discutidos a seguir.

4.1 Descrição da câmera utilizada para o IV

Foram realizados ensaios com câmera para o infravermelho médio, $8 - 14 \mu m$, da marca Wuhan, modelo IR-928, com um arranjo focal de 320 x 240 elementos sensores de silício amorfo não-refrigerado (ver Figura 4.1). A Tabela 4.1 mostra as principais características técnicas da câmera.



Figura 4.1: Imagem da câmera para imageamento no infravermelho médio, Wuhan IR928.

Tabela 4.1: Quadro resumido das principais informações técnicas da câmera utilizada.

Campo de visão
Resolução espacial
Sensibilidade térmica
Detectores
Banda de freqüências
(Óptica de germânio)
Temperaturas de operação

Wuhan IR-928 21° x 16° 1,2 mrad 0.08°C a 30°C 320 x 240 sensores de Si-a não refrigerados 8 – 14 μm

-20°C a 500°C \pm 2°C

4.2 Primeiros Testes Experimentais

Os primeiros ensaios de caracterização da câmera foram realizados em laboratório com a ajuda de Rogério Marcon (IFGW e IG – UNICAMP e OSBL, Campinas) e do engenheiro eletrônico Amauri S. Kudaka (Centro de Radioastronomia e Astrofísica Mackenzie, CRAAM – Mackenzie).

Estes experimentos utilizaram o Sol como fonte intensa de radiação IV, testando a possibilidade de imageamento por projeção da imagem solar ampliada em materiais refletores (alumínio ou cobre) e em materiais semitransparentes, onde a observação foi feita através de lâminas de silício e arseneto de gálio. Outra possibilidade testada foi a observação direta do Sol através de um telescópio Newtoniano e observação de sua imagem difratada por um pequeno orifício (ver Figura 4.2, 4.3 e 4.4).



Figura 4.2: Primeiros ensaios experimentais para a formação de imagem no plano focal da câmera IV: (a) projeção em superfície metálica, (b) observação da imagem projetada através de material semitransparente, (c) observação direta em telescópio Newtoniano e (d) observação de imagem difratada por pequeno orifício.

A Figura 4.3 mostra um exemplo das imagens do disco solar adquiridas através de: (a) projeção através de materiais semitransparentes, (b) observação direta em telescópio newtoniano e (c) observação de imagem difratada por pequeno orifício. Não foi possível obter imagem através da projeção em material metálico.



Figura 4.3: Imagens do disco solar utilizando os seguintes procedimentos: (a) projeção através de material semitransparente (arseneto de gálio), (b) Reflexão em placa de alumínio despolida colocada no foco primário de um telescópio newtoniano e (c) Observação direta do sol através de um diafragma tipo pinhole.



Figura 4.4: Fotos dos ensaios feitos em laboratório apropriado (Observatório Solar Bernard Lyot, Campinas) para a obtenção das primeiras imagens do disco solar.

As imagens obtidas através dos ensaios descritos tiveram importância qualitativa não apresentando boa resolução angular e pouco contraste para nossos objetivos. A experiência adquirida na qualificação da câmera foi utilizada para a definição do projeto de um novo sistema óptico adequado as nossas necessidades (ver seção 4.3.2).

4.3 Ensaios integrados completos

4.3.1 Sítios observacionais

Todos os experimentos foram realizados utilizando as facilidades instrumentais de dois observatórios: Observatório Solar Bernard Lyot, em Campinas, Brasil (altitude de 600 m acima do nível do mar) de propriedade de Rogério Marcon e Complexo Astronômico El Leoncito, em San Juan, nos Andes Argentinos (altitude de 2550 m acima do nível do mar). A Figura 4.5 mostra uma imagem de cada observatório.



Figura 4.5: Fotos ilustrativas dos sítios observacionais, OSBL (à esquerda) e CASLEO (à direita).

4.3.2 Arranjo óptico

Após os primeiros ensaios práticos (descritos no item 4.2) foi desenvolvido um conjunto óptico completo para os objetivos procurados (Figura 4.6). Este arranjo foi utilizado em testes nos dois observatórios acima citados, com importantes resultados que serão discutidos neste capítulo.

O conjunto óptico desenvolvido pode ser descrito da seguinte maneira: primeiramente os raios solares incidem em dois espelhos planos dispostos de maneira a refletir a radiação para dentro da sala de medidas. Este jogo de espelhos é conhecido como celostato e acompanha o deslocamento

solar diário em azimute e elevação, de maneira que o disco solar não gire em relação ao plano focal. Após esta etapa a radiação incide em um telescópio tipo Cassegrain clássico cujo espelho primário é um côncavo parabólico com abertura de 10,5 cm e o secundário é um convexo hiperbólico, resultando em uma distância focal de 12 m. Este arranjo óptico produz uma imagem do disco solar de aproximadamente 10 cm no plano focal de um terceiro espelho côncavo (distância focal de 70 cm) que por sua vez produz um feixe paralelo permitindo que a óptica de germânio original e não removível da câmera produza uma imagem sobre o arranjo de sensores, conhecido como alinhamento afocal. Os experimentos utilizaram uma janela de germânio adicional, para proteção da câmera.

A Figura 4.6 mostra um diagrama do arranjo óptico utilizado e nas Figuras 4.7 e 4.8 fotos do arranjo montado nos dois sítios de observação.



Figura 4.6: Diagrama em blocos do arranjo óptico utilizado, composto por um celóstato, espelho côncavoconvexo-côncavo, janela de germânio e câmera IV.



Figura 4.7: Foto dos instrumentos utilizados nos experimentos realizados no Observatório Solar Bernard Lyot, Campinas, Brasil.



Figura 4.8: Diagrama simplificado do celostato (A) e do arranjo óptico (cassegrain B-C, espelho plano S, espelho côncavo D, Janela de Ge E e câmera IV F) utilizado na obtenção das imagens solares com alinhamento afocal no sítio de El Leoncito, Argentina.

4.3.3 Primeiros resultados

4.3.3.1 Sistema de calibração e conversão de temperatura em fluxo

Em ambos os sítios de observação as variações na temperatura do céu em função do ângulo de elevação mostraram-se muito pequenas para serem medidas, indicando uma transmissão atmosférica melhor do que 98%.

Para estimar-se o valor preciso em temperatura das medidas efetuadas com a câmera faz-se necessário calibrar todo o sistema. Com este objetivo foi construído um corpo negro calibrador, consistindo em uma placa metálica coberta com carbono, com um resistor acoplado para seu aquecimento e um termopar monitorando sua temperatura. Uma foto deste calibrador encontrase na Figura 4.9.



Figura 4.9: Foto do corpo negro calibrador com termopar acoplado, instalado na entrada do sistema óptico.

O coeficiente de calibração (relação entre o sinal de entrada no sistema e de saída da câmera) foi determinado pela média de temperatura lida pela câmera durante observações do resistor a diferentes temperaturas (50, 100, 150, ..., 300°C). Duas séries de medidas estão mostradas na Figura 4.10 e o coeficiente de calibração obtido foi de aproximadamente 36 T_{calibrador}/T_{camera}, ou

seja, 1 grau medido como resposta da câmera corresponde a 36 graus na entrada do sistema. Através deste coeficiente pode-se calibrar a resposta da câmera em temperatura.



Figura 4.10: Medidas realizadas com o calibrador a diferentes temperaturas.

A partir disto converte-se temperatura em fluxo de radiação incidente, considerando que o sistema óptico utilizado amplia o diâmetro solar de 0,5 grau para 10 graus, ou seja, por um fator 20. Desta maneira, a área do disco solar aumenta 400 vezes e sua temperatura de brilho (medida da intensidade de radiação térmica emitida por um objeto) reduz-se na mesma proporção. Admitindo uma temperatura de brilho solar de aproximadamente 5000 K em 10 micrometros (Ohki e Hudson, 1975; Lindsey e Hudson, 1976), a temperatura na entrada da câmera é de 12,5 K, que é uma fração da temperatura ambiente.

Supondo que a aproximação de Rayleigh-Jeans para a lei de Planck seja ainda válida em 10 micrometros (hf \leq kT), o fluxo de radiação correspondente a uma variação de temperatura pode ser derivada da seguinte relação:

$$\Delta S = \frac{2k\Delta T}{A_e} \qquad \left[Wm^{-2}Hz^{-1}\right] \tag{4.1}$$

onde

k é a constante de Boltzmann

 A_e é a área efetiva de abertura, $A_e \approx A_P(1-\eta)$, onde A_P é a área física e η são as perdas ΔT é o excesso de temperatura

70

 ΔS é o fluxo correspondente a uma variação de temperatura ΔT .

No cálculo da área efetiva do sistema considera-se seis reflexões em espelhos com perdas de 0,02 em cada reflexão no alumínio em 10 micrometross (Vollmer et al., 2004), mais perda adicional de 0,003 na lente e janela de germânio, obtem-se desta maneira uma perda total de 0,15 (ou 0,85 de eficiência). Para um diâmetro de abertura de 10,5 cm (diâmetro do espelho primário da configuração cassegrain), obtem-se um fluxo de aproximadamente 3,7 x 10⁻²¹ x Δ T (Wm⁻²Hz⁻¹), ou, 37 Δ T unidades de fluxo solar (1 sfu = 10⁻²² Wm⁻²Hz⁻¹), para uma fonte com largura angular da ordem ou menor do que o feixe fotométrico do sistema de 25" determinado pelo limite de difração da abertura de 10,5 cm.

4.3.3.2 Imageamento Solar – Experimentos e Resultados

Campanhas para observações solares foram realizadas no OSBL entre os meses de maio e outubro de 2005, seguida de outra sessão em novembro e dezembro de 2005 no CASLEO.

Estas observações mostraram que as manchas no disco solar permanecem escuras em 10 micrometros, ou seja, são mais frias em relação ao Sol quieto, por algumas dezenas de Kelvins. Foi confirmada também a presença de regiões brilhantes ao redor das manchas, conhecidas em outras literaturas como "*plage-like regions*" que possuem uma boa associação com as praias de cálcio K (Turon e Lena, 1970; Gezari et al. 1999;).

A Figura 4.11 mostra um exemplo de imagem solar com uma mancha mais fria (no centro do quadrado na imagem superior) e na tela à direita, curvas de isotermas desta mesma área. A tela inferior apresenta um perfil de temperatura que sugere uma queda de 36 graus na mancha e um aumento de 12 graus na região brilhante ao redor (em valores não calibrados). Estas imagens foram analisadas pelo uso do software Maxim DL, adquirido especialmente para trabalhar com estas imagens.

Na Figura 4.12 encontra-se a comparação entre uma imagem em 10 micrometros e uma imagem na linha do cálcio K evidenciando a semelhança entre as praias aquecidas ao redor da mancha.



Figura 4.11: Imagem Infravermelho para 17 de Setembro de 2005, no canto superior esquerdo, com uma mancha solar e seu mapa de temperatura ao lado, abaixo vemos seu perfil de temperatura, mostrando a queda provocada pela mancha, mais fria.



Figura 4.12: Imagens mostrando uma região brilhante ao redor da mancha escura ("*plage like region*") para a região ativa NOAA AR 0808 do dia 17 de setembro de 2005 em 10 μm, obtida no OSBL, Campinas (à esquerda) e imagem na linha do cálcio K do Observatório de Meudon, França (à direita).

Três diferentes tipos de atividade solar foram encontradas durante as observações em 10 μm e ocorreram em associação às atividades em raios X detectados pelo satélite NOAA GOES (NOAA 2005), discutidas a seguir:



Figura 4.13: Três imagens de 500 x 500 segundos de arco de duas manchas solares da região ativa 0826 do dia 4 de dezembro de 2005. O perfil temporal abaixo corresponde a um fraco evento de raios X classe A detectado pelo satélite GOES. As imagens (1), (2) e (3) se correlacionam ao evento em raios X, com o desaparecimento da mancha superior durante o máximo do evento em raios X.

1. Foram observadas extensas regiões brilhantes, maiores do que o feixe fotométrico (25 segundos de arco), com variações temporais de intensidade que poderá ser associada às supergranulações, como sugeridos por Gerazi et al. (1999). Estas regiões apresentam flutuações com escalas temporais de minutos, aproximadamente 10 vezes mais rápidas do que as supergranulações observadas no visível.

2. Alguns abrilhantamentos ocorreram durante os eventos em raios X e encobriram quase totalmente as manchas escuras por durações de alguns minutos (ver Figura 4.13). Eventos similares foram observados no infravermelho próximo durante uma grande explosão solar (Li et al., 2004; Xu et al., 2006).

3. Abrilhantamentos rápidos foram observados em 10 μ m pela primeira vez, apresentando escalas temporais da ordem de dezenas de segundos e dimensões da ordem de ou menores do que o limite de difração do feixe fotométrico (25").

A Figura 4.14 mostra exemplos de eventos rápidos em 10 µm observados na região ativa NOAA AR 0826 em 01 de dezembro de 2005. A temperatura em excesso de cada evento corresponde a diferença entre a temperatura média das áreas sobre a região ativa e a temperatura média de um *"flat field*" no sol quieto próximo, região tracejada na figura. Esta subtração garante a exclusão de variações relacionadas ao Sol calmo ou ruído de fundo. Estes perfis estão mostrados na imagem inferior da Figura 4.14.

Para melhor quantificar e comparar os eventos observados a temperatura em excesso foi calibrada em fluxo (ver relação 4.1). As fontes B e C são da ordem do feixe fotométrico ou menores e produziram intensidades de 8 e 14 10⁻¹⁹ Wm⁻²Hz⁻¹, respectivamente. A fonte A é consideravelmente maior e produziu um pico de 1,8 10⁻¹⁸ Wm⁻²Hz⁻¹. Admitindo que 1 sfu = 10⁻²² Wm⁻²Hz⁻¹, os eventos observados apresentaram intensidades maiores que 8000 sfu, ou seja, apenas uma ordem de grandeza menor que os fluxos comumente atribuídos aos "*flares*" em luz branca (Ohki & Hudson, 1975).

Todas estas imagens foram gravadas com taxa de 1 quadro s⁻¹ e posteriormente analisadas com médias corridas de 20 quadros devido à grande quantidade de dados. Porém, antes de utilizar este método foram analisados trechos curtos para certificar que não haveria perda de informações.



Figura 4.14: Três imagens em 30 THz (no topo da Figura) da região ativa NOAA RA 0826 no dia 01 de dezembro de 2005, correspondentes aos horários indicados pelas linhas 1, 2 e 3 nos perfis temporais (abaixo na Figura). Os curvas A, B e C indicados correspondem ao perfil temporal das regiões brilhantes indicadas nas fotos acima, subtraindo a média do retângulo maior. Os perfis estão apresentados em temperatura de entrada em Kelvin e em horário universal.

4.3.3.3 Trânsito de Mercúrio e determinação do NEP do sistema

A potência equivalente de ruído (*Noise Equivalent Power* - NEP) do sistema é uma das mais utilizadas figuras de mérito para definir o desempenho de sensores de forma geral. Consiste na potência incidente necessária para produzir um sinal de saída igual ao ruído rms do sistema, como mencionado no Capítulo 2.

A oportunidade excepcional de observação do trânsito do planeta Mercúrio sobre o disco solar no dia 08 de novembro de 2006 utilizando a mesma instrumentação instalada no CASLEO descrita anteriormente permitiu uma avaliação independente da sensibilidade do sistema. As imagens da Figura 4.15 mostram ver Mercúrio em três diferentes posições obtidas através de um filme gerado a taxa de 30 quadros por segundo. A imagem inferior mostra o perfil de temperatura com a deflexão causada por Mercúrio no disco solar (fazendo uso do software Maxim DL).



Figura 4.15: As imagens acima mostram o planeta mercúrio, em 10 micrometros, durante seu trânsito sobre a superfície solar em três diferentes momentos e abaixo o perfil de temperatura indicando a queda provocada por sua temperatura inferior a da superfície solar.

A deflexão (negativa) devido a Mercúrio é evidente e é comparável à deflexão de uma mancha solar, que estava no limbo (da ordem de 30 - 50 K).

A variação de temperatura causada pela presença de Mercúrio relaciona o tamanho angular da fonte ao feixe com a temperatura real da fonte:

$$\Delta T = T_M \left(\frac{\theta_M}{\theta_B}\right)^2 \tag{4.2}$$

onde

T_M é a temperatura de Mercúrio do lado escuro, 70 K (Spaulding e Namowitz, 1994) $θ_M$ tamanho angular de Mercúrio para a data do trânsito (9,97 segundos de arco) $θ_B$ tamanho angular do feixe (25 segundos de arco).

Portanto

$$\Delta T = 70 \left(\frac{9.97''}{25''}\right)^2 = 0.27K \tag{4.3}$$

Pode-se extrapolar esta medida para a mínima variação detectável de temperatura, como sendo da ordem ou menor do que 0,1 K, apenas considerando que o ruído do sistema seja de aproximadamente 1/3 da deflexão causada pelo planeta. Pode-se determinar a temperatura radiométrica equivalente de ruído do sistema, definida pela temperatura equivalente ao sistema composto pelo detector, seus componentes e o telescópio, através da Equação 4.4:

$$\Delta T_{rms} = \frac{T_{sis}}{\sqrt{(\Delta v \Delta t)}} \tag{4.4}$$

onde

 ΔT_{rms} é a temperatura equivalente de ruído ($\Delta T_{rms} \approx \Delta T < 0.1 \text{ K}$) Δv é a banda passante em Hz, ($\Delta v = 3 \ 10^{13} \text{ Hz}$) Δt é o tempo de integração em segundos ($\tau = 1/30 \text{ s}$)

Encontra-se então, $T_{sis} \leq 10^5 \; K$

A partir da temperatura de sistema determina-se a relação sinal ruído ou figura de ruído S/N (Relação entre o nível do sinal e o nível de ruído, expressa em dB):

$$S_{N} = 1 + \left(\frac{T_{sis}}{T_{amb}}\right) \le 345 \qquad ou \qquad 25,4 \, dB \tag{4.5}$$

E, finalmente, estima-se a potência equivalente de ruído, NEP:

$$S_{N} = \frac{2kT_{sys}\Delta\nu\sqrt{\Delta t}}{NEP} \approx 410^{-8} \text{ WHz}^{-1/2}$$
(4.6)

É necessário recordar que o NEP calculado aqui representa a potência equivalente de ruído do sistema todo, considerando toda a óptica envolvida, e não apenas o NEP do elemento sensível como encontra-se na maior parte da literatura.

Capítulo 5 Imageamento THz: Prova de conceito com FPA de câmera comercial

Todos os conhecimentos adquiridos e experiências realizadas neste trabalho foram concatenadas em um projeto de imageador THz, utilizando matrizes de sensores comerciais e seus sistemas de aquisição e leitura de dados e filtros de malhas ressonantes para a delimitação de freqüências e óptica adequada para formação de imagem. Estes ensaios experimentais foram realizados utilizando as facilidades instrumentais do Observatório Bernard Lyot, em Campinas, com a participação direta de Rogério Marcon.

A câmera utilizada para estes testes é da marca FLIR (modelo A20 M), sueca, composta por uma matriz de 160 x 120 sensores não refrigerados de óxido de vanádio (VO_x), com óptica de germânio removível que delimita a banda do infravermelho médio, de $8 - 14 \mu m$.

Nos testes foi utilizada a radiação emitida por uma resistência aquecida a temperaturas próximas de 900 K. Sua imagem incide em um espelho que, por sua vez, retransmite a radiação em direção à câmera IV, sem a óptica de germânio, formando a imagem no plano focal. Os filtros de malha ressonante foram acoplados na entrada da câmera. A montagem está ilustrada na Figura 5.1. Para o bloqueio da radiação do infravermelho próximo foi interposto um filme fino de polietileno preto juntamente com os filtros ressonantes para garantir a ausência de radiação de maior freqüência ($\lambda \leq 30\mu$ m).



Figura 5.1: Fotos da câmera sem a lente de germânio e do arranjo de medidas de desempenho do sistema câmera/filtros.



Imageamento THz: Prova de conceito com FPA de câmera comercial

Figura 5.3: Primeiras imagens THz de uma resistência aquecida.

As imagens estão distribuídas da seguinte maneira, no topo da Figura está a primeira imagem formada pela câmera sem sua lente de Ge e em seguida com um filme fino de polietileno preto. A seguir estão as imagens formadas utilizando os filtros de malha ressonante de 405, 670, 850 GHz e 2, 4 e 8,5 THz.

Como podemos observar a qualidade, contraste e resolução, da imagem diminuem com o aumento da freqüência. Isto pode ser atribuído a algumas causas, a serem melhor estudadas.

Imageamento THz: Prova de conceito com FPA de câmera comercial

A Figura 5.1 mostra também uma foto ampliada da entrada da câmera sem sua óptica original de germânio. Durante esta inspeção foi observada uma película sobre o arranjo focal, ou "*focal plane array*", que consistia de uma fina camada de germânio segundo informações do fabricante. Portanto, todas as imagens obtidas nestes ensaios apresentam um importante fator de absorção, devido a este material, visto que, o germânio possui boa transmissão para a janela de 8 - 14 micrometros aproximadamente com características de forte absorção para freqüências mais elevadas, como se pode observar na Figura 5.2, onde estão dispostas curvas de transmitância de uma camada de germânio, de diferentes espessuras, em função do número de onda da radiação. Neste gráfico têm-se valores de transmissão de aproximadamente 42%, 38% e 12% para 2, 4 e 8,5 THz, respectivamente





As primeiras imagens THz obtidas com o sistema imageador estão dispostas na Figura 5.3.

Imageamento THz: Prova de conceito com FPA de câmera comercial

Para a imagem de 8.5 THz devemos considerar também o fato do filtro estar fisicamente danificando, comprometendo sua atuação como delimitador de banda passante. Os resultados qualitativos, no entanto, confirmaram a possibilidade de imageamento THz utilizando matriz de sensores de câmeras comerciais, bem como o seu sistema de leitura e processamento de imagem e filtros de malha ressonante para as faixas de freqüências de interesse. Este conceito deverá ser aprimorado, com a adoção de outros materiais para a película protetora do FPA, e adequados ajustes ópticos.

Conclusões

O desenvolvimento de sensores e imageadores para a faixa do infravermelho, especialmente para a região do infravermelho distante, implica na abordagem multidisciplinar de novas questões técnicas que estão sendo desenvolvidas em diversos países. Tendo em vista as inúmeras aplicações militares, médicas, industriais e de sensoriamento em geral, as informações e os desenvolvimentos relacionados a estes temas são de difícil acesso, geralmente classificados, especialmente em países como o Brasil.

O presente projeto se propôs a abordar pela primeira vez os desenvolvimentos estratégicos nesta faixa de freqüências. Para atingir nossos objetivos foram estudadas questões pertinentes a sensores bolométricos não-refrigerados e arranjos focais utilizados em câmeras comercialmente disponíveis, filtros de malha ressonantes para altas freqüências, calibradores de temperatura, processo de imageamento e tratamento de imagens, com fabricação específica de alguns subsistemas e a adaptação e qualificação de dispositivos comercialmente disponíveis (câmeras). Todos estes esforços resultaram na comprovação do conceito de sistema imageador fazendo uso de câmeras adaptadas e outros sistemas desenvolvidos.

Em nossos experimentos utilizamos o Sol, como fonte intensa de radiação, com oportunidades de caracterizar nossos sistemas e também de realizar importantes diagnósticos da radiação que produz a emissão nesta faixa espectral. Estes resultados trazem informações inovadoras e fundamentais neste campo de pesquisa.

O conhecimento e resultados obtidos neste projeto nas diferentes questões estratégicas do tema são fundamentais para dois diferentes projetos que estão em andamento, DESIR (*Detection of Solar eruptive Infrared Radiation*) e SIRA (*Submillimeter-wave to InfraRed solar Activity emissions*), prevendo a utilização de sistemas THz em observações de transientes em plasmas ativos solares em diferentes freqüências, a partir do solo e no espaço. Com a experiência já adquirida pretendemos contribuir com a caracterização e qualificação de dispositivos e subsistemas para fotometria/imageamento THz. A partir destas aplicações serão esperados

Conclusões

resultados inéditos no diagnóstico de mecanismos de aceleração de partículas que se manifestam através de emissões eletromagnéticas na faixa THz, principalmente em plasmas quentes solares, com importantes conseqüências para sua interpretação, sugerida como sendo similar aos processos equivalentes em grandes aceleradores de feixes de partículas em laboratório.

Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos em nossos desenvolvimentos e aqui apresentados podem-se propor algumas etapas subseqüentes. São elas:

- Aperfeiçoar as simulações de filtros de redes ressonantes na faixa THz. Um estudo mais aprofundado dos diferentes parâmetros de rede e sua influência na resposta dos filtros. Desta forma pode-se prever com precisão variações desejadas como por exemplo aumentar ou diminuir a largura de banda.
- Aprimorar a partir das informações e bibliografias aqui apresentadas, os conhecimentos de materiais atenuadores e refletores para faixas de freqüências na banda THz do espectro eletromagnético. Este estudo permitirá a composição de um sistema imageador aperfeiçoado.
- Novos ensaios experimentais do conjunto câmera/filtros/óptica deverão ser realizados e analisados com técnicas de tratamento de imagem.
- Os filtros de 670 e 850 GHz serão utilizados em um sistema imageador que será acoplado ao refletor de 1,5m de diâmetro, localizado nos Andes Argentinos, permitindo observações solares e atmosféricas inéditas.
- Diagnósticos de transientes solares na faixa THz e sua possível correlação com processos físicos em aceleradores de partículas deverão ser explorados.
- Preparar um sistema imageador THz completo capaz de ser utilizado em experimentos espaciais, em satélites e/ou balões estratosféricos.

Referências

Afsar M. N., Chantry G. W., "Precise dielectric measurements of low-loss materials at millimeter and submillimeter wavelenghts", IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol MTT25, no 6, 1997.

Arbex C. J. N., Tese de Mestrado em preparação, 2007.

Benford D. J., Gaidis M. C., Kooi J. W., "Optical properties of Zitex in the infrared to submillimeter", Apploed Optics, vol. 42, No 25, 2003.

Bhattacharya P., Stiff-Roberts A. D., Krishna S., Kennerly S., "Quantum Dot Long-Wavelength Detectors", Materials Research Society. Symp. Proc. Vol. 692, 2002.

Chamberlain J. M., "Where optics meets electronics: recent progress in decreasing the terahertz gap", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 362, 199-213, 2004.

Chase S. T, Joseph R. D., "Resonant array bandpass filters for the far infrared", Applied Optics, 22, 1983.

Das B., Singaraju P., "Novel quantum wire infrared photodetectors", Infrared Physics & Technology 46, 2005.

Davies A. G., Linfield E. H., Johnston M. B., "The development of terahertz sources and their applications", Phys. Med. Biol. 47, 3679-3689, 2002.

Datskos P. G., Lavrik N. V., "Detectors—Figures of Merit", Encyclopedia of Optical Engineering, 349, 2003.

Deming, D. et al., Bulletin of the American Astronomical Society, 23, 1991.

Federici J. F., Schulkin B., Huang F., et al., "THz imaging and sensing for security applicantions – explosives, weapons and drugs", Semiconductor Science and Technology, 20, 2005.

Ferguson B., Zhang X.-C., "Materials for terahertz science and technology", Nature 1, 26-33, 2002.

Gallerano G.P., Biedron S., "Overview of terahertz radiation sources", Proceedings of the FEL Conference, 216-221, 2004.

Gezari D., Livingston W., Varosi F., em ASP Conf. Ser. 183, High Resolution Solar Physics, ed. T. R. Rimmele, K. S. Balasubramaniam e R. R. Radick (San Francisco: ASP), 559, 1999.

Goldsmith P. F., "Quasioptical systems", Proceedings of the IEEE, Vol 80, No 11, 1729-1747, 1992.

González F. J., Porter J. L., Boreman G. D., "Antenna-coupled Infrared Detectors", Proc. of SPIE Vol. 5406, 2004.

Griffiths P. R., Homes C., "Instrumentation for Far-infrared Spectroscopy", Instrumentation for Mid- and Far-Infrared Spectroscopy, John Wiley & Sons Ltd, 2001.

Gunapala S. D., Bandara S. V., Hill C. J., et al., "Long wavelenght infrared (LWIR) quantum dot infrared photodetector (QDIP) focal plane array", Boletim do SPIE, vol 6206, 2006.

Hartwick T. S., Hodges D. T., Barker D. H., Foote F. B., "Far infrared imagery", Applied Optics, vol 15, no8, 1976.

Hudson H. S.," The solar-flare infrared continuum: Observational techniques and upper limits", Sol Phys., 45, 69, 1975.

Jha A. R., "Infrared Technology: aplications to eletrooptics, photonic devices and sensors", Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 2000.

Kaufmann P., "Diagnostics of Solar flares in the far infrared", Adv. Space Res., vol. 8, no. 11, 39, 1998.

Kaufmann P., Raulin J.-P., Correia E., Costa J. E. R., Giménes de Castro C. G., Silva A. V. R., Levato H., Bauer O. H., "Rapid Submillimeter brightenings associated wiht a large solar flare", ApJ, 2001.

Kaufmann P. et al., "A New Solar Burst Spectral Component Emitting Only in the Terahertz Range", ApJ, 603, L121, 2004.

Kornberg M., comunicação privada, 2006.

Kostiuk T. e Deming D., "A solar infrared photometer for space flight applications", Infrared Physics, 32, 1991.

Lamb J. W., "Miscellaneous data on materials for millimetre and submillimetre optics", International journal of infrared and millimeter waves, vol. 17, no12, pp. 1997-2034, 1996.

Lawson W.D., Nielson S., Putley E.H., Young A.S., "Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe", Journal of Physics and Chemistry of Solids, 9, 325–329, 1959.

Lee S.-W., Zarrillo G., Law C.-L., "Simple formulas for transmission trough periodic metal grids or plates", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP 30, No5, 1982.

Referências

Li J. P., Ding M. D., Liu Y. 2004, In Proc. IAU Symp. 223, Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, ed. A. V. Stepanov, E. E. Benevoleskaya, e A. G. Kosovichev (Cambridge Univ. Press), 119, 2004.

Lindsey C., Hudson H. S., "Solar limb brightening in submillimeter wavelengths", ApJ, 203, 753, 1976.

Lindsey C., Heasley J. N., "Far-infrared continuum observations of solar faculae", ApJ, 247, 348, 1981.

Lisauskas A., Löffer T., Hartmut G., "Photonics terahertz technology", Semicond. Sci. Technol. 20, 7, 2005.

Liu H. C., Gao M., et al., "Quantum dot infrared photodetectors", Applied Physics Letters, vol. 78, No 1, 2001.

Liu H. C., "Quantum dor infrared photodetector", Opto-Electronics Review, 11, 1-5, 2003.

Mittleman D. M., Gupta M., Neelamani R., et al., "Recent advances in terahertz imaging", Appl. Phys. B Lasers and Optics, 1999.

Möller K. D, Warren J. B., Heaney J. B., Kotecki, C., "Cross-shaped bandpass filters for the near- and mid-infrared wavelength regions", Applied Optics, vol. 35, No 31, 1996.

Möller K. D., Sternberg O., Grebel H., Lalanne P., "Thick inductive cross shaped metal mesh", Journal of Applied Physics, vol 91, No 12, 2002.

NOAA, Solar-Geophysical Data (Boulder: National Geophysical Data Center), http://www.sec.noaa.gov, 2005.

Ohki K., Hudson H. S., "The solar-flare infrared continuum", Sol. Phys., 43, 404, 1975.

Ogawa Y., Kawase K., Mizuno M., "Nondestructive and Real-time measurement of moisture in Plant", IEEE Trans. EIS, vol. 124, No. 9, 2004.

Page L. A., Cheng E. S., Golubovic B., et al., "Millimeter-submillimeter wavelength filter system", Applied Optics, vol 33, No 1, 1994.

Perkins W.D., "Topics in chemical instrumentation – Fourier transform infrared spectroscopy. Part I: Instrumentation", Journal of Chemical Education, 63(1), A5-A10, 1986.

Phillips T. G., "Techniques of submillimeter astronomy", Millimetre and Submillimetre Astronomy, 1-25, 1988.

Poglitsch A., Waelkens C., Bauer O. H., et al., "The photodetector array camera and spectrometer (PACS) for the Herschel Space Observatory", Proceedings of SPIE, 6265, 2006.

Porterfield D. W., Hesler J. L, Densing R., Mueller E. R., Crowe T. W., Weikle II R. M., "Resonant metal mesh bandpass filters for the far infrared", Applied Optics, vol 33, No 25, 1994.

Pospiech M., Terahertz Imaging, Script of the University of Sheffield, nd techniques, 2003.

Razeghi M., Wei Y., Gin A., Brown G. J., "Quantum dots of InAs/GaSb type II superlattice for infrared sensing", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol 692, 2002.

Rogalski A., "Infrared detectors: an overview", Infrared Physics & Technology, 43, 2002.

Rogalski A., Chrzanowski K., "Infrared devices and techniques", Opto-electronics review 10, 11-136, 2002.

Rogalski A., "Infrared detectors: status and trends", Progress in Quantum electronics 27, 2003.

Schacham S. E., Finkman E., "Is there phonon bottleneck in quantum dots?" Fourth Russian-Israeli Bi-National Workshop, 2005.

Shepherd F., Yang A., "Silicon Schottky retinas for infrared imaging", IEDM Technology Digist, 310–313, 1973.

Sherwin M. S., Schmuttenmaer C. A., Bucksbaum P. H., DOE-NSF-NIH Workshop on Opportunities in THz Science, Arlington, VA, 12–14, 2004.

Shur M., "Terahertz technology: devices and applications", Proceedings of ESSCIRC, França, 2005.

Siegel P. H., "Terahertz Technology", IEEE Trans. on microwave theory and techniques, 50, no 3, 2002.

Siegel P. H., "THz Technology: An Overview", International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2003.

Sizov F. F., "Infrared detectors: Outlook and means", Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, v. 3, 52-58, 2000.

Tomaselli V. P., Edewaard D. C., Gillan P., Moller K. D., "Far infrared bandpass filters from cross shaped grids", Applied Optics, vol 20, No 8, 1981.

Turon P. J., Léna P. J., Sol. Phys., 14, 112, 1970.

Ulrich R., "Far infrared properties of metallic mesh and its complementary structure", Infrared Phys. 7, 37-55, 1967.

Vollmer M. et al., in Proc. InfraMation Conf. 2004 (ITC 104A 2004-07-27: Boston: FLIR Systems), 2004.

Xu Y. et al., "High-Resolution Observations of Multiwavelength Emissions during Two X-Class White-Light Flares", ApJ, 641, 1210, 2006.

Weilland T., "A discretization method for the solution of Maxwell's equations for sixcomponent fields: Electronics and Communication", (AEÜ), vol. 31, pp. 116-120, 1977.

Williams G. P., "Filling the THz gap – high power sources and applications", Institute of Physics Publishing, Reports on Progress in Physics 69, 301-326, 2006.

Winnewiser C., Lewer F., Weinzier J., Helm H., "Transmission features of frequency seletive surface compoments in the far infrared determined by terahertz time domain spectroscopy", Applied Optics, vol 38, No 18, 1999.

Woolard D. L., Brown E. R., Pepper M. e Kemp M., "Terahertz Frequency Sensing and Imaging: A Time of Reckoning Future Applications?", Proceedings of the IEEE, vol.93, n 10, 2005.

Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I., Proskuryakov Y., "Interlevel Ge/Si quantum dot infrared photodector", Journal of Applied Physics, vol 89, n 10, 2001.

Zerov V. Y., Malyarov V. G., "Heat sensitive materials for uncooled microbolometer arrays", J. Opt. Technol., 68 (12), 2001.

Apêndice 1

Transparência Atmosférica

No capítulo 3, que descreve a fabricação de filtros de malha ressonante, foram escolhidas seis diferentes freqüências como freqüências centrais para tais filtros. Essa escolha não foi aleatória. Tendo em vista o interesse em aplicações deste sistema em ciências espaciais, devemos considerar a absorção causada pelo vapor de água atmosférico nos diferentes comprimentos de onda de interesse. Neste caso as três últimas "janelas atmosféricas" na região do submilimétrico que permitem observações de objetos extraterrestes são 405, 670 e 850 GHz, assim como mostra a Figura 1.1. Condições próximas a esta são encontradas em El Leoncito para cerca de 120 dias por ano. Os outros filtros de freqüências superiores, 2, 4 e 8.5 THz, serão destinados à observações fora da atmosfera, em balões estratosféricos e/ou em satélites.



Figura 1.1: Curva de transmissão atmosférica para um sítio com conteúdo de vapor de água precipitável de 1mm (soral.as.arizona.edu).

Apêndice 2

Considerações Experimentais sobre os Filtros de Malha Ressonante

Complementando o conteúdo do Capítulo 3 acrescentamos detalhes experimentais da fabricação dos filtros de malha ressonante inserindo aqui imagens de novos filtros fabricados.

A Figura 2.1 mostra uma micrografia eletrônica de uma das etapas de fabricação, onde encontramos, em alto relevo, postes de fotorresiste na forma de cruzes. Vê-se em detalhe o corte lateral da lâmina de silício, preparada para a eletrodeposição do metal que formará a malha ressonante.



Figura 2.1: Micrografia eletrônica da etapa do processo anterior à eletrodeposição de metal. A imagem mostra a lâmina de silício com "postes" de fotorresiste em alto relevo.

A imagem exposta na Figura 2.2 mostra em detalhe as etapas de eletrodeposição do níquel. Diferentes camadas de metal depositadas são vistas, isto ocorre devido à necessidade de controlar sua espessura, durante o processo de crescimento, com medidas seguidas tomadas em um perfilômetro.



Figura 2.2: Imagem ampliada do perfil das cruzes na malha ressonante. Este amostra corresponde a um filtro de 3 THz. Verificam-se diversas etapas do crescimento de níquel. Isto ocorre devido ao controle de espessura que é feito medindo seguidamente a espessura crescida utilizando um perfilômetro (espessura de 10 micrometros).

Uma das características presentes nos filtros para freqüências maiores, em virtude das menores dimensões envolvidas, são os arredondamentos de cantos e bordas. A Figura 2.3 apresenta uma micrografia eletrônica em detalhe de uma cruz para filtros de 10 THz. Podemos comparar a definição de cantos e bordas com a Figura 2.4 que apresenta a imagem, em detalhe, de um filtro de 850 GHz.
Apêndices



Figura 2.3: Micrografia eletrônica de uma estrutura em cruz para uma amostra de 10 THz, com menor dimensão de 4 micrometros (espessura de 7 micrometros).

Outra característica que foi observada nos processos de fabricação posteriores aos descritos no Capitulo 3, é a irregularidade na superfície do eletro-crescimento. Na Figura 2.4 vemos que a superfície em contato com a lâmina de silício permanece perfeita enquanto a superfície é crescida de maneira irregular.



Figura 2.4: Micrografia eletrônica de uma estrutura em cruz para um filtro de 850 GHz. Verifica-se diferença na superfície crescida e em contato com a lâmina de silício.

Apêndice 3

Esclarecimentos sobre as simulações de resposta em freqüência dos filtros

Nas simulações efetuadas utilizando o software CST apresentadas no Capítulo 3 utilizou-se uma onda plana, linearmente polarizada, incidindo perpendicularmente à superfície do filtro. Observase aqui que os ensaios experimentais efetuados no Instituto Max Planck em Garching utilizam uma fonte de radiação não polarizada. Portanto, as comparações realizadas são qualitativas devendo ser aprimoradas para um resultado mais próximo dos testes.

Anexos

Artigos °	A. M. Melo, P. Kaufmann, A. S. Kudaka, et al. "A new setup for ground-based measurements of solar activity at 10 microns", Publications of the Astronomical society of Pacific, vol. 118, pages, 1558-1563, 2006, DOI 10.1086/509267	1
0	A. M. Melo, P. Kaufman, C. G. Giménez de Castro, et al., "Submilimeter-wave atmospheric transmission at El Leoncito, Argentina Andes", IEEE Transactions on atomas and propagation vol. 53, pp. 4, 2005, DOI 10.1109/TAP.2005.844425	2
0	R. R. Neli, A. M. Melo, C. J. N. Arbex, et al., "The development of a submm-wave uncooled bolometric system and field test", Revista INATEL, vol. 7, no. 01, 2004.	3
Tushall	has Completes on Commences	
o O	A. M. Melo, O. H. Bauer, E. C. Bortolucci, et al., "Development of bandpass resonant mesh filters for the THz range", Proceedings of the International Workshop on Telecommunications, 256, 2007.	4
Resum	nos Completos em Congressos	
0	A. M. Melo, R. Marcon, P. Kaufmann, et al., "Desenvolvimento de filtros de radio freqüência com redes ressonantes para fotometria e imageamento na faixa THz", II Workshop de Nanotecnologia Aeroespacial, 2006.	5
Deeuw	na a Anvagantaçãos em Consumaçãos Internacionais	
o	P. Kaufmann, A. M. Melo, R. Marcon, et al., "Search for high energy particle acceleration signatures", Solar active regions and 3D magnetic structure, 26 th meeting of the IAU, JD03, 2006.	6
Deere	Anno 1	
Resum	IOS E Apresentações em Congressos Nacionais	
0	fabrication and tests", Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology - Seminatec 2007.	7
0	R. Marcon, M. Kornberg, T. Rose, et al., "Blockage of thermal radiation from intense sources using rough mirrors for far-infrared photometry", Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology - Seminatec 2007.	8
0	G. Fernandez, C. G. Gimenez de Castro, R. Godoy, et al., "Characterization of 10 microns imaging system from measurements of Mercury transit in the solar disk", We have a structure of the solar disk and	9
	Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology - Seminated 2007.	
0	K. IVIAICOII, IVI. KOIIIOEIG, I. KOSE, Et al., BIOQUEIO de l'adlação	
	fazendo uso de refletores rugosos", Sociedade Astronômica Brasileira,	10
0	2007. G Fernandez C G Gimenez de Castro R Godov et al "Caracterização de sistema	
0	imageador de 10 microns por medidas do transito de mercúrio sobre o disco solar", Sociedade Astronômica Brasileira, 2007.	11
0	A. M. Melo, R. Marcon, P. Kaufmann, et al., "Novo sistema óptico e primeiras medidas de atividade solar em 10 microns", Boletim da Sociedade Astronômica Brazileira vol 26 pol. 2006	12
0	M N Costa P Kaufmann A M Melo et al "A ocorrência de pulsações	
0	submilimétricas e a ejeção de massas coronais", Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira, vol 26, no1, 2006.	13
0	A. M. Melo, E. C. Bortolucci, M. B. Zakia, et al., "Project and Construction of THz Metal Mesh Filters", Workshop on Semiconductors and Micro & Nano-Technology - Seminatec 2006.	14

Anexos

0	A. M. Melo, P. Kaufmann, A. S. Kudaka, et al., "A new setup for ground-based	
	measurements of solar activity at 10 microns", Simpósio Brasileiro de Geofísica	15
	Espacial e Aeronomia, 2006.	
0	A. M. Melo, M. N. Costa, M. Cassiano, et al., "Solar submillimeter-wave pulsations	
	and coronal mass ejections (CME)", Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e	16
	Aeronomia, 2006.	

PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC, 118: 1558-1563, 2006 November © 2006. The Astronomical Society of the Pacific. All rights reserved. Printed in U.S.A.

A New Setup for Ground-based Measurements of Solar Activity at 10 µm

A. M. MELO,¹ P. KAUFMANN,¹ A. S. KUDAKA, AND J.-P. RAULIN

Center for Radio Astronomy and Astrophysics, Mackenzie Presbyterian University, Rua Consolação 896, 01302-907 São Paulo, Brazil; armame@gmail.com

R. MARCON²

Gleb Wataghin Physics Institute, Campinas State University, Campinas, Brazil

and A. Marun, P. Pereyra, and H. Levato

El Leoncito Astronomical Complex, San Juan, Argentina

Received 2006 June 28; accepted 2006 September 14; published 2006 November 10

ABSTRACT. Solar activity measurements in the far- to mid-IR range are receiving renewed interest as part of an effort to complement recent results obtained at submillimeter wavelengths. A new setup has been developed to measure solar activity in the infrared spectral region centered at 10 μ m (30 THz) by means of a camera with focal plane array of uncooled microbolometers. An optical arrangement of concave-convex-concave mirrors magnifies and focuses the full-disk solar image to fit into the field of view of the camera. Techniques were developed to characterize the camera and calibrate the measurements in brightness temperature and flux units. Test observations were made at the Bernard Lyot Solar Observatory, Campinas, Brazil, and were continued at El Leoncito Astronomical Complex, San Juan, Argentina. The sky was found to be almost transparent at 10 μ m at both sites. The first measurements of the solar disk have confirmed the presence of quiescent bright ring, or "plagelike," regions around sunspots, and "disappearances" of sunspots coincident with small soft X-ray bursts. Small mid-IR flares were found, consisting of multiple rapid brightenings (tens of seconds to several minutes) at different locations in the solar active regions, corresponding to soft X-ray bursts reported by *GOES* satellites. At a wavelength of 10 μ m, the sizes of some flare sources were found to be smaller than the diffraction-limited photometric beam of 25" set by the 10.5 cm diameter objective lens. The intensities of such small mid-IR flares were high, of the order of (8–14) × 10⁻¹⁹ W m⁻² Hz⁻¹ (or [8–14] × 10⁴ solar flux units).

Online material: color figures

1. INTRODUCTION

The frequency band corresponding to the middle- and farinfrared is almost unexplored in the solar spectrum. The existence of an atmospheric "window" in the mid-IR, centered at 10 μ m, combined with recent improvements in electronic and photonic technologies, have given us the opportunity to perform new ground-based observations. For this we used new detectors and optical arrangements that we located at sites with superior atmospheric transmission conditions.

Previous observations in the same mid-IR range have indicated the presence of quiescent, bright "plagelike" regions around sunspots that exhibit a brightness of 50–200 K above the nearby quiet-Sun surface (Turon & Léna 1970; Lindsey & Heasley 1981; Gezari et al. 1999).

Sunspot umbral regions appear tens to a few hundred kelvins

colder than the surrounding photosphere (Turon & Lena 1970; Lindsey & Heasley 1981). Temporal variations (several minutes) in temperature have been detected and attributed to photospheric granulation, although with dimensions and timescales that are different from those in the visible (tens of minutes; Gezari et al. 1999). The possibility of detecting small flaring activity in the mid-IR has been predicted, but attempts to measure it at 20 μ m have been inconclusive (Hudson 1975). These early negative results might be attributed to the observing technique, which used a single detecting bolometer at the telescope focus and required a long time for scanning active regions (ARs). Thus, enhancements that lasted less than several minutes at spatial locations that were several photometric beam sizes away were missed.

High-resolution flare observations in the near-IR continuum (centered at $1.56 \ \mu$ m) were reported in association with a large white-light flare (*GOES* X10). These were compared to *RHESSI* hard X-ray and SOHO MDI (Michelson Doppler Imager) images, with examples shown at a rate of one per minute (Xu et al. 2006). Near-IR continuum emissions in these events were

1558

¹ Also at the Center for Semiconductor Components, Campinas State University, Campinas, Brazil.

² Also at Bernard Lyot Observatory, Campinas, Brazil.

MEASURING SOLAR ACTIVITY AT 10 µm 1559



FIG. 1.—Simplified diagram of the coelostat and the optical arrangement used to obtain solar images with afocal alignment. [See the electronic edition of PASP for a color version of this figure.]

attributed either to high-energy electrons penetrating deeper into the solar atmosphere or to back-warming emission from the photosphere.

Recent observations of solar bursts at submillimeter wavelengths (i.e., 212 and 405 GHz) have shown the presence of a new spectral component whose flux increases with frequency. This component is expected to reach maximum emission somewhere in the far-IR (or THz) range (Kaufmann et al. 2004). These data may indicate particle acceleration at extremely high energies by mechanisms that are not well understood. Progress in these studies requires new observations in the far- to mid-IR range. In this paper, we describe a new system and optical setup for ground-based measurements of solar activity at 10 μ m, and show initial results in the detection of solar transients.

2. INSTRUMENTATION

The setup uses a commercial uncooled mid-IR camera with germanium optics set at an 8–14 μ m bandpass (Wuhan Guide model IR 928).³ The focal plane detection element is made up of an amorphous silicon 320' × 240' microbolometer array. It has a germanium lens providing a 21° × 16° field of view,

2006 PASP, 118:1558-1563

a thermal sensitivity of 0.08 K on snapshot images, and video output allowing frame cadence rates of 30 s⁻¹.

The camera has retained its original configuration, using the same Ge lens coupled to an optical system to image an area of 40' \times 50'. The optical arrangement is shown in Figure 1 and is organized as follows: solar rays are reflected by a flat mirror (A) to a Cassegrain telescope consisting of a spherical convex mirror with 110 cm aperture and a 450 cm focal length (B); a secondary concave mirror (C) provides a total effective focal length of 1200 cm and produces an image of the Sun about 10 cm diameter at the focal plane of a concave spherical mirror (D) with a 70 cm focal length. This arrangement produces a parallel beam for an afocal alignment that feeds the camera (F). A folding-flat mirror (S) was used to adapt the beam to the physical size available at the site. The camera's objective Ge lens, which has a diameter of 4 cm and a minimum focal length of 38 cm, was preceded by a flat-flat Ge disk 1 cm thick (E). The solar tracking was done by a 34 cm flat heliostat mirror in the first tests, and later by a coelostat using two 30 cm flat mirrors in a Jensch-Zeiss configuration.

3. CALIBRATIONS

The first series of test observations was obtained at the Bernard Lyot Solar Observatory in Campinas, São Paulo, Brazil (altitude 600 m above sea level). Several runs were carried out

³ See Wuhan Guide specifications online at http://www.scienscope.com.my/ IndustrialIRThermalCamera.pdf.

1560 MELO ET AL.



FIG. 2.—Left: Solar image showing a bright plagelike region surrounding the sunspot NOAA AR 0808 on 2005 September 17 at 10 μ m, obtained at Bernard Lyot Observatory, Campinas; right: calcium K IV image from Observatoire de Meudon, France, showing the nearly coincident plage. [See the electronic edition of PASP for a color version of this figure.]

in 2005 May–October to characterize the system performance and to conduct preparations needed for the following phase. Another observing session in 2005 November–December was carried out at El Leoncito Astronomical Complex in San Juan, Argentina, (altitude 2550 m above sea level) using a coelostat to direct the solar rays into the laboratory (Fig. 1).

A radiating blackbody was developed to calibrate the temperature response of the camera, as well as that of the whole system. This reference source consists of a metal plate that is covered by carbon and uses a resistor heater. A calibrated thermo-pair is used to monitor the plate temperature.

A measurement of atmospheric extinction was attempted using the "tipping" method at El Leoncito. The changes in sky temperature with elevation angle were too small to be measured within the camera sensitivity, indicating transmission better than 98% for the days measurements were made.

The optical setup enlarges the solar image by a factor of about 20. Therefore, the apparent observed solar surface temperature corresponds to the solar brightness temperature value reduced by a factor of about 400. Assuming a solar disk brightness of about 5000 K at 30 THz (Ohki & Hudson 1975; Lindsey & Hudson 1976), the input to the camera from the Sun results in 12.5 K, which is a fraction of the camera room temperature (300 K) and thus avoids damage. The temperature detection threshold obtained at the input of the complete optical setup was 36 K, corresponding to a camera input temperature sensitivity of about 1 K. Assuming the Rayleigh-Jeans approximation still remains close to the blackbody Planck law at 10 μ m, the sensitivity threshold can be derived from the wellknown relationship

$\Delta S \approx (2k\Delta T/A_e) \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1},$

where k is the Boltzmann constant, A_e is the effective area of the aperture, $A_e \approx A_p(1 - \eta)$ (where A_p is the physical area and η is the loss), ΔT is the measured excess temperature (in K), and ΔS the minimum detectable flux density. Assuming an aluminum reflectivity at 10 μ m of about 0.02 (Vollmer et al. 2004) and six mirror reflections, in addition to transmission losses of 0.003 in the Ge lens and disk, we obtain a total loss of 0.15 (or 0.85 efficiency). For the diameter of aperture used (10.5 cm), we obtain a detection

2006 PASP, 118:1558-1563

MEASURING SOLAR ACTIVITY AT 10 µm 1561



FIG. 3.—Three 500" \times 500" images of the two sunspots of AR 0826 on 2005 December 4, shown by arrows at left. The times are identified in the *GOES* X-ray time profile shown below. Panel (1) before a *GOES* class-A SXR burst, (2) eastern spot "disappears" precisely at the time of maximum of the SXR burst, and (3) it reappears later in the decay phase. Image 1 also shows the camera's target-searching cross.

threshold of about $\Delta S \approx (3.7 \times 10^{-21})\Delta T \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$, or $37\Delta T$ solar flux units (1 sfu = $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$), for a source with an angular width size that is roughly smaller than the system photometric beam of 25" set by the 10.5 cm aperture diffraction limit.

Test observations were carried out by tracking the full disk or taking discrete snapshots, or with continuous data recording. Due to the large amount of data that were recorded, the first measurements of solar flaring were carried out at 1 frame s^{-1} and were later smoothed to 20 frame running means.

4. SUNSPOTS AND BRIGHT, PLAGELIKE OBSERVATIONS AT 10 μm

Our observations show that sunspots on the solar disk are still dark at 10 μ m, which is colder with respect to the surrounding quiet-Sun areas by tens of kelvins. We have confirmed on nearly all runs the presence of bright quiescent regions broadly surrounding the spots, known as plagelike areas (Turon & Lena 1970; Lindsey & Heasley 1981; Gezari et al. 1999; Hudson 1975), that have a close association with the calcium K plages, as shown in Figure 2.

5. DETECTION OF SOLAR FLARES AT 10 μ m

Three different types of solar activity were found during the test observations. These occured close to active regions and when soft X-rays bursts were detected by NOAA *GOES* satellites (NOAA 2005):

1. Extended bright regions larger than the photometric beam, with intensities changing with time, that may be associated with enhanced supergranulation, as suggested by Gezari et al. (1999). However, these features fluctuate on timescales of minutes, nearly 10 times faster than supergranulation in the visible.

2. Brightenings that occurred when soft X-ray bursts were detected by *GOES* satellites. These exhibited extended bright emissions that almost entirely hid the dark spots for a duration of several minutes (see Fig. 3). Similar events have been observed in the near-IR for a large flare (Li et al. 2004; Xu et al. 2006)

3. Rapid flares that were observed at 10 μ m for the first time. These have timescales of tens of seconds and dimensions on the order of or smaller than the diffraction-limited photometric beam (25").

We show in Figure 4 examples of rapid flares at 10 μ m observed at NOAA AR 0826 on 2005 December 1. The flare time profiles in the bottom panels are in units of calibrated temperatures at the entrance of the optical setup. The flare temperature excess is the difference between the average temperature on the three 4 × 4 pixel areas over the flaring sites and the average temperature on the 20 × 20 pixel flat-field reference on the solar disk, away from the active region, as shown in the top left panel of the figure.

The flare sizes for sources B and C are similar to or smaller than the photometric beam and produced intensities of 8 \times

2006 PASP, 118:1558-1563

1562 MELO ET AL.



FIG. 4.—Three 30 THz images (*top*) of NOAA AR 0826 obtained on 2005 December 1 at times indicated by vertical bars in the panel below. East-west direction runs along the two large sunspots. The contour plots (*middle*), in relative scale, show a brightening across the whole AR in the last panel. The data were obtained with 1 frame s^{-1} resolution, 20 frame smoothed means. The time profiles correspond to the input temperature (i.e., at the entrance of the optical setup) averaged over the small squares on the flaring sites and after subtraction of the average temperature over the rectangle shown at the top away from the AR.

2006 PASP, 118:1558-1563

 10^{-19} and 14×10^{-19} W m⁻² Hz⁻¹, respectively. Source A is considerably larger in size and produced a peak intensity of $1.8 \times 10^{-18} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. There were numerous events observed at 10 µm during a C1.5 class GOES soft X-ray burst starting 12:10 UT, with a maximum at 12:21 UT, and ending at 12:40 UT. However, there was no clear relation to the slow soft X-ray time profiles. No counterparts were reported at $H\alpha$ or at other radio wavelengths, possibly because their levels were too weak for the sensitivity of the patrolling instruments. The physical nature of these emissions is not known. The flux levels at 10 µm are comparable to white-light flare intensities (Ohki & Hudson 1975); however, the rapid timescales do not correspond to thermal hot plasma emissions.

6. CONCLUDING REMARKS

A mid-IR (8-14 µm band) optical setup for a focal plane array employing an amorphous-silicon microbolometer camera at room temperature has been developed and characterized here. The sensitivity threshold for the detection of temperature changes was about 4 K (or 1.5 × 10^{-20} W m⁻² Hz⁻¹) for sources smaller than the photometric beam of 25". These are comparable to Hudson's (1975) early measurements using a scanning detector. Solar observations using our camera confirmed the presence of bright, plagelike areas surrounding dark sunspots that were also found by previous authors using considerably larger apertures. Solar flaring activity was found

MEASURING SOLAR ACTIVITY AT 10 µm 1563

in connection with low-level soft X-rays bursts detected by GOES satellites. Sunspot disappearance events were similar to effects found in the near-IR in large flares. Rapid mid-IR flares were discovered for the first time, consisting of multiple flashes lasting tens of seconds to minutes. Some of these had angular sizes on the order of or smaller than the diffractionlimited angular resolution of 25". These show intensities of the order of tens of kelvins, corresponding to >8 \times 10⁻¹⁹ W m⁻² Hz⁻¹, or >8000 sfu, only 1 order of magnitude smaller than fluxes attributed to large white-light flares (Ohki & Hudson 1975). We are currently analyzing a considerable amount of data obtained by the instrument, in addition to simultaneous observations at the same site with the Solar Submillimeter Telescope and with high-cadence Ha monitoring.

We acknowledge the referee's corrections and suggestions, which have improved the quality of the paper. We are grateful to Dr. Marta Cassiano for assistance in data analysis. The solar coelostat used at El Leoncito has been provided by Valongo Observatory of the Federal University of Rio de Janeiro and maintained by CASLEO technical staff. We acknowledge the assistance of C. G. Gimenez de Castro in data processing. This research was partially supported by Brazilian agencies FAPESP (grants 04/07835-1 and 03/07746-6), CNPq (grants 471220/ 2004-3 and 300249/2003-9), and the Argentinian agency CONICET.

REFERENCES

Gezari, D., Livingston, W., & Varosi, F. 1999, in ASP Conf. Ser. 183, High Resolution Solar Physics, ed. T. R. Rimmele, K. S. Balasubramaniam, & R. R. Radick (San Francisco: ASP), 559 Hudson, H. S. 1975, Sol. Phys., 45, 69

 Kaufmann, P., et al. 2004, ApJ, 603, L121
 Li, J. P., Ding, M. D., & Liu, Y. 2004, In Proc. IAU Symp. 223, Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, ed. A. V. Stepanov, E. E. Benevoleskaya, & A. G. Kosovichev (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 119

Lindsey, C., & Heasley, J. N. 1981, ApJ, 247, 348 Lindsey, C., & Hudson, H. S. 1976, ApJ, 203, 753 NOAA. 2005, Solar-Geophysical Data (Boulder: National Geophysical Data Center), http://www.sec.noaa.gov Ohki, K., & Hudson, H. S. 1975, Sol. Phys., 43, 404 Turon, P. J., & Léna, P. J. 1970, Sol. Phys., 14, 112

Vollmer, M., et al. 2004, in Proc. InfraMation Conf. 2004 (ITC 104A 2004-07-27: Boston: FLIR Systems)

Xu, Y., et al. 2006, ApJ, 641, 1210

2006 PASP, 118:1558-1563

Submillimeter-Wave Atmospheric Transmission at El Leoncito, Argentina Andes

Arline M. Melo, Pierre Kaufmann, Life Fellow, IEEE, C. Guillermo Giménez de Castro, Jean-Pierre Raulin, Hugo Levato, Adolfo Marun, José Luis Giuliani, and Pablo Pereyra

Abstract-We present the results of one year of daytime atmosphere transmission measurements obtained at 212 and 405 GHz by a 1.5 m solar radio telescope located at El Leoncito site, 2550 m altitude in Argentina Andes. We used three different methods: 1) absolute derivation from strong solar signal at different elevation angles: 2) direct derivation from observed known solar brightness times the antenna coupling factor; and 3) fitting the observed sky emission plots as a function of elevation angle, also known as "tipping." Some differences were found for the transmission determined by the three methods, the most important is that methods 1) and 2) are restricted to smaller values of opacity. Method 1) is restricted to measurements at low elevation angles. Method 2) has the advantage to extend measurements to considerably higher values of attenuation. For the El Leoncito site the correlation of optical depth at 405 and 212 GHz was found ($au_{405}/ au_{212})=4.43$, smaller than model predictions (\approx 5.0). Measurements at both frequencies obtained for 319 days in one year indicate that 50% of time $\tau_{212}<0.3~({\rm or}>74\%$ zenithal transmission) and $\tau_{405}<1.5~({\rm or}>22\%$ transmission), with small seasonal dependence compared to other sites. The opacity related precipitable water vapor is smaller compared to model estimates, suggesting an upper atmosphere water vapor depression, characteristic to the region.

1528

Index Terms-Atmosphere opacity at submillimeter-wavelengths, methods for atmosphere opacity, passive radiometer sensing of the atmosphere, submillimeter attenuation, submillimeter wavelengths sites.

Manuscript received February 9, 2004; revised July 14, 2004. This work was supported in part by the Brazilian agency FAPESP under Contracts 99/06126-7 and 02/04774-6, in part by the CNPq under Contracts 304822/89-2 and 690190/02-6, and in part by the Scientific and Technical National Research Council of Argentina (CONICET).

A. M. Melo is with the Center for Radio Astronomia and Astrophysics (CRAAM), Mackenzie Presbyterian Institute, 01302-907 São Paulo, Brazil, and also with the Faculty of Electrical Engineering and Computing (FEEC), Department of Semiconductor Instruments and Photonics (DSIF), Camp-inas State University, Campinas. 01302-907 São Paulo, Brazil (e-mail: arline@craam.mackenzie.br).

P. Kaufmann is with the Center for Semiconductor Components (CCS). Campinas State University. Campinas, São Paulo State, Brazil and also with Center for Radio Astronomia and Astrophysics, CRAAM, Mackenzie Presbyterian Institute. 01302-907 São Paulo, Brazil (e-mail:

kaufmann@craam.mackenzie.br). C. G. Giménez de Castro and J.-P. Raulin are with the Center for Radio Astronomia and Astrophysics (CRAAM). Mackenzie Presbyterian Insti-nstitute, 01302-907 São Paulo. Brazil (e-mail: guigue@craam.mackenzie.br: raulin@craam.mackenzie.br).

H. Levato is with the National University of San Juan, San Juan, Argentina and also with the Compleio Astronómico El Leoncito (CASLEO)-the Scientific and Technical National Research Council of Argentina (CONICET), San Juan, Argentina (e-mail: alevato@casleo.gov.ar).

A. Marun, J. L. Giuliani, and P. Pereyra are with the Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO)-the Scientific and Technical National Research Council of Argentina (CONICET). San Juan. Argentina (e-mail: amarun@casleo.gov.ar; jgiuliani@casleo.gov.ar; ppereyra@casleo.gov.ar). Digital Object Identifier 10.1109/TAP.2005.844435

I. INTRODUCTION

THE KNOWLEDGE of the terrestrial atmosphere transmission is needed to correct signal intensities of emitting sources propagating through it or to evaluate power requirements for telecommunications. Atmosphere attenuation increases for shorter millimeter to submillimeter wavelengths, dominated by water vapor and broad oxygen lines, becoming essentially opaque for wavelengths shorter than 300 μ (f > 1 THz).

The opacity measurements bring information on a number of atmospheric parameters and constituents, primarily the clear air precipitable water vapor content, and molecules producing broad enhanced absorption lines, mainly H₂O, O₂, N₂O, CO₂, O₃, CH₄, and CO (see [1]-[3] and the references therein). Analysis of submillimeter-wavelength propagation conditions also brings information on clear air inhomogeneities, description of properties of clouds and other hydrometeors.

Passive ground-based radiometry at discrete frequencies has been the common tool to determine atmospheric opacity (for example [4]-[6], and the references therein). More recently Fourier transform spectrograph (FTS) technique has been used covering a broad spectrum from millimeter to submillimeter wavelengths, with moderately frequency resolution (for example [3], [7]-[9], and the references therein).

Direct or absolute transmission measurements require a strong signal external to the atmosphere. At short millimeter and submillimeter wavelengths there are no satellite beacon transmitters available. The strongest natural celestial sources available are the Sun, with brightness temperatures in the range of 4–6 10^3 K known with uncertainties of the order of $\pm 20\%$ [10], [11], and the Moon, with phase-dependent brightness ranging from 160-310 K [12]. In order to obtain meaningful levels for the signals attenuated by the atmosphere it is necessary to use relatively large collecting areas, especially for the Moon. However most of the large antennas for submillimeter wavelengths cannot point to the Sun to avoid structural damages, and smaller antennas such as single horns do not have enough gain to allow useful measurements on either source. Because of these observational limitations, most of the radiometric determinations of atmospheric transmission are inferred from indirect measurements of the sky temperature dependence with elevation angle, by tipping the antenna in elevation.

A solar submillimeter-wave telescope is in operation in El Leoncito, at 2550 m altitude in the Argentina Andes [13]. It has

0018-926X/\$20.00 © 2005 IEEE



Fig. 1. Schematic representation of two successive solar scans at different elevation angles for absolute determination of atmospheric opacity.

a 1.5 m Cassegrain reflector inside a Gore-Tex¹ radome, and operates with two 405 GHz and four 212 GHz radiometers simultaneously. As the instrument can be pointed to the Sun, it was possible to obtain the atmospheric transmission at those two frequencies using three different techniques. In the following sections we discuss the results obtained for one year of measurements during daytime, covering more than 300 days for which there were propagation conditions at the higher frequency (405 GHz), referred to an arbitrary threshold level large enough to detect the quiet Sun, and for almost the whole year at 212 GHz, to characterize the submillimeter wave propagation conditions and corresponding atmospheric parameters for the El Leoncito site.

II. METHODS FOR OPACITY MEASUREMENTS

The radiation received at the ground from a source external to the terrestrial atmosphere has two components: the attenuated source signal added to the propagation medium emission and self-absorption, accordingly to the well-known Chandrasekhar radiative transfer [14]. Assuming a plane atmosphere parallel to the ground surface, adopting the Rayleigh–Jeans approximation to the Planck radiation emission function for longer *IR* to submillimeter wavelengths [15]. The observed brightness temperature T_{obs} of an external source with temperature T_{source} at a given elevation angle *H*, can be expressed by the well-known approximate form [14]

$$T_{\rm obs} \approx T_{\rm source} e^{-\tau/\sin H} + \langle T_{\rm sky} \rangle (1 - e^{-\tau/\sin H}) + T_p(H) \quad (1)$$

where τ is the optical depth, corresponding to the integration of the absorption coefficient of the atmosphere along the propagation path in the zenith direction, $\langle T_{\rm sky} \rangle$ is the atmosphere "mean" temperature usually approximated to the ground level

¹ Gore-Tex is a trademark or registered trademark of WL Gore & Associates, Incorporated, Newark, DE. ambient temperature, and $T_p(H)$ is the contribution from parasitic emissions (such as spillover, cross-talk due to reflected waves, etc.).

Direct derivation of the opacity [method (a)] is obtained by observing the solar level at different elevation angles, as illustrated in Fig. 1. The opacity τ (in Nepers) is derived from [1] for successive and close elevation angles

$$\tau = \ln[(T_{\rm obs1} - \langle T_{\rm sky} \rangle) / (T_{\rm obs2} - \langle T_{\rm sky} \rangle)] / [(1/\sin H_2) - (1/\sin H_1)] \quad (2)$$

where for angles close enough we can assume that the values for the sky temperature and parasitic contribution remain the same. Therefore, the term $T_p(H)$ is cancelled. This method requires well measurable changes in the observed temperature for small variations in elevation angle. This condition is usually obtained only for low elevation angles, and when the opacity is low otherwise the changes in temperature with elevation angle are too small to be measured, introducing large errors in the determinations.

Therefore, the absolute opacity measurements can be obtained only for fewer days. They are useful to estimate the source temperature replacing, in [1]

$$T_{\rm source} = \eta T_{\rm sun} \tag{3}$$

where η is the coupling coefficient between the antenna beam and the Sun (sometime approximated to the antenna beam efficiency [15]), and T_{sun} is the solar brightness temperature. Although none of these two parameters are well-known, their product η T_{sun} is well determined, and used to estimate the value of attenuation at any day, at any elevation angle for which a solar emission signal is observable [method (b)]. This apparent brightness method can also be used for the Moon, but in this case meaningful results are obtained only under very transparent atmospheric conditions.

For the solar emission observed through the atmosphere, at an elevation angle H, such as one of the solar scans shown in Fig. 1, the opacity is readily obtained

$$\tau = -\sin H \ln[(T_{\rm obs} - \langle T_{\rm sky} \rangle)/\eta T_{\rm sun}] \text{ Nepers.}$$
 (4)

The last method (c) determines the attenuation coefficient indirectly. No source external to the atmosphere is needed and [1] becomes

$$T_{\rm obs} = \langle T_{\rm sky} \rangle (1 - e^{-\tau/\sin H}) + T_p(H).$$
⁽⁵⁾

The well-known "tipping" method derives τ from the best-fitted curve of observed antenna temperatures obtained at various elevation angles. The curve fitting is critical for measurements at lower elevation angles. For accurate determinations the parasitic contribution $T_p(H)$ function of elevation must be known. In approximate measurements it may be assumed as nearly constant for a given range of elevation.

Another direct estimate of the atmospheric opacity might be derived from the difference between the sky emission at a given elevation angle $T_{\rm sky}(H)$ and the emission temperature of a load in front of the antenna, $T_{\rm load}$, assuming that the ambient temperature $T_{\rm amb}$ can be approximated to the mean sky temperature [4], [5]. This technique produced controversial results at microwaves and millimeter waves [5], [6], and is currently being investigated at submillimeter waves using the SST instrument.

III. ONE YEAR OF OPACITY MEASUREMENTS

The measurements were carried out at 212 and 405 GHz for the period March 2002–February 2003. We selected a limited number of days for which the smallest values of opacity allowed the best absolute determinations at low solar elevation angles, as described by [2]. The apparent solar brightness outside the terrestrial atmosphere, as expressed by [3], $T_{source} = \eta T_{sun}$, was determined for measurements using the 212 GHz and 405 GHz optimum feedhorns designed for maximum tapering illumination of the subreflector (10 dB). We found the antenna coupling parameter $\eta \approx 0.5$ at 212 GHz and 0.6 at 405 GHz. The SST instrument has more three feed-horns at 212 GHz that are used to obtain flare positions using the multiple beams technique [16]. However the beam positions have to be partially overlapped to each other by about one half-power beam width which reduces the illumination tapering to only 3 dB producing smaller values for η .

The values of ηT_{sun} obtained using the optimum feed horns at 212 GHz and 405 GHz, respectively, were used along the year for absorption determinations using the solar brightness technique, [4], shown in Fig. 2(top), where we show the day-time opacity τ (in Nepers) in the form of correlation diagrams for 212 and 405 GHz measurements only for days where the 405 GHz transmissions could be measured. The solar brightness temperatures were assumed to be 5000 K at 405 GHz and 6000 K at 212 GHz [10], [11]. Opacities obtained from 373 tipping measurements over 211 days in the same year are shown in Fig. 2(bottom). The 978 solar brightness measurements were obtained for angles larger than 30° over 319 days.

The tipping method is limited for days exhibiting smaller values of τ . The most complete and consistent set of measure-



Fig. 2. Correlation plots of 212 and 405 GHz daytime opacities obtained for one year of measurements at El Leoncito, using the solar brightness method (top) and the tipping method (bottom).

ments was obtained using the solar brightness method. The following data linear fits were obtained: $\tau_{405} = 0.09 + 4.43\tau_{212}$ using the solar brightness method, and $\tau_{405} = 0.21 + 3.71\tau_{212}$ using the tipping method. Both methods present considerable scattering of the data. However, the correlation coefficient for the brightness method (4.43) includes a considerably more extended range of higher values of opacities.

Although the two methods might be taken as qualitatively comparable for small values of attenuation (less than 0.5 Nepers at 212 GHz and 2.0 Nepers at 405 GHz) the best description of the atmospheric transmission is obtained using the solar apparent brightness technique. This becomes particularly useful when corrections of measurements are needed for conditions with high values of attenuation for which the tipping method cannot be used (i.e., in the range of about 0.5-1.0 at 212 GHz and 2–4 Nepers at 405 GHz, as shown in Fig. 2).

IV. 212 AND 405 GHz TRANSMISSION AT EL LEONCITO

We evaluate and discuss the daytime transmission conditions in the El Leoncito site, where the solar submillimeter telescope is located, using the opacity measurements obtained with the tipping and the solar apparent brightness technique. The present

Anexo 2

978 Solar brightness measurements

(Mar 2002 - Feb 2003)

(STADAO

Anexos



Fig. 3. One year of opacity measurements using the solar apparent brightness method at 212 GHz (above) and 405 GHz (below)

results correct preliminary partial measurements obtained for a limited sample of days in 1999-2001 [17].

In Fig. 3, we present the plot of all data actually obtained with the brightness technique for the two frequencies, 212 and 405 GHz, from March 2002–February 2003. The lack of data found in some short periods were generally due to the turning down of equipment. Inspections of Fig. 3 indicate that there is no significant seasonal trend in El Leoncito atmospheric transmission. Very transparent or opaque days can be found with similar frequency in all seasons.

In Fig. 4, we show the distribution of all measurements obtained using the solar brightness method, at 212 and 405 GHz, respectively. The most probable opacity values found for El Leoncito, at the 2 550 m altitude site, are of about 0.20–0.25 Nepers (78–82% transmission) at 212 GHz and of 0.8–1.4 Nepers (25–45% transmission) at 405 GHz. Plots derived from the tipping method produced qualitatively similar distributions.

A cumulative distribution of daytime atmospheric opacity was made for the same data base, using the solar apparent brightness. The average results shown in Fig. 5 indicate that 50% of the time we have $\tau_{212} < 0.3$ and $\tau_{405} < 1.5$, or transmission >74% at 212 GHz and >22% at 405 GHz.

Mean seasonal data points are also plotted in Fig. 5. There is a small overall increase in cumulative opacity for summer at 405 GHz, and for summer and winter at 212 GHz. The summer months have relative more probability for rain (just few days in a year) while snowstorms occur in winter.

V. DISCUSSION

One-year of measurements of atmospheric transmission at 212 and 405 GHz with the solar submillimeter telescope in



Fig. 4. One-year distributions of the daytime opacities measurements shown in Fig. 3.

El Leoncito, Argentina Andes, have shown surprisingly small values for opacity for its altitude, in comparison to other sites in the world with similar altitude and for which data are available in the 210–230 GHz range, derived by the well-known "tippers." Direct comparisons between sites are complicated by the fact that their statistics often correspond to fractions of the year only. The results are summarized in Table I, all of them using

IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL 53, NO. 4, APRI	IL 2005
--	---------

SITE	SITE ALTITUDE (M) ATMOSPHERIC OPACITY (NEPERS)		MONTHS	REF	
<u>San Pedro</u> <u>Martir</u>	2830	40% of time during a whole year τ_{215GHz} < 0.3	12	[18]	
Mt. Graham	3186	72% of time in (Oct – Jun) τ_{225GHz} < 0.3	9	[19]	
<u>Gornegrat</u>	3167	70% of 114 days in May-Oct (summer) period $0.13 < \tau_{2300Hz} < 0.75$ 50% of 120 days in Dec – Mar (winter) period $\tau_{2300Hz} < 0.11$ *	6 4	[20]	
Mt. Fuii	3776	50% of 150 days in (Nov – Mar) $0.05{<}\tau_{220GHz}{<}~0.79$	6	[21]	
<u>El Leoncito</u>	2550	50% of one year measurements τ_{212GHz} < 0.4	12		

TABLE I Atmospheric Opacities (in Nepers) for Different Sites for Which There Are Data Available (212–230 GHz)

*Inferred for pwd derived from 345 GHz measurements after Grossman model [2].



Fig. 5. Cumulative opacity at 212 GHz (above) and 405 GHz (below) for one-year daytime transmissions measured at the El Leoncito site. Solid lines are for one-year averages. Symbols indicate seasonal mean values.

the tipping method. Measurements taken at San Pedro Martir, Baja California, Mexico, 2830 m altitude shows that 40% of time during a whole year τ_{215} GHz < 0.3 Nepers [18]. Similarly at Mt. Graham, in Arizona, U.S. 3186-m altitude, about 72% of time between October and June exhibit τ_{225} GHz < 0.3 Nepers [19]. The Gornergrat site at 3167-m altitude in the Swiss Alps have 70% of total time in summer months (May–October) with 0:13 < τ_{230} GHz < 0.75 Nepers, and 20% of total time in winter (December–March) with τ_{230} GHz < 0.11 Nepers [20], which are comparable to whole year averages for El Leoncito at a much lower altitude. Mt. Fuji submillimeter-wave observatory at 3776-m altitude is considerably higher than El Leoncito exhibiting very transparent conditions in winter months (November through March) when 50% of about 150 days $0.05 < \tau_{220}$ GHz < 0.79 Nepers [21], comparable to El Leoncito.

The El Leoncito area have a high number of days in the year (319 days in one year measurements), during which submillimeter solar observations are possible at 405 GHz, according to the signal/noise produced by the quiet Sun, arbitrarily set when a signal of about 200 K was obtained, with 40 ms time constant, for an assumed 5000 K brightness temperature at 405 GHz [10], [11] in the zenith direction. This implies in opacity of 3 Nepers (or 5% transmission).

To derive the total atmospheric precipitable water vapor (pwv) content from models it is convenient to relate the pwv to the opacity τ by the parameter

$$\beta = \tau / pwv$$
 (6)

where pwv is in mm and τ in Nepers. β is equivalent to τ for 1 mm of pwv at a given frequency. According to the approximate frequency dependence of β derived from Ulich [5] and Grossman [2] models, we find $\beta \approx 0.067$ in the range 200–230 GHz, and $\beta \approx 0.33$ at about 400 GHz. The most typical 212 GHz and 405 GHz opacities found for El Leoncito concentrate in the ranges 0.2–0.25 and 0.8–1.4 Nepers respectively (see Fig. 4), which correspond to 3–3.7 mm of pwv (using 212 GHz data), and to 2.4–4.2 mm using 405 GHz data. From the model predicted for β we can derive the ratio $\tau_{405}/\tau_{212} \approx 4.92$, which is better fitted by the opacities found using the solar brightness method.

VI. CONCLUDING REMARKS

Atmospheric opacity measurements in the El Leoncito area, in the Argentina Andes, at 212 and 405 GHz have shown that the method using the solar brightness allows determinations over a wider range of optical depths and the derivation of propagation and pwv parameters comparatively closer to model predictions, compared to the tipping method.

MELO et al.: SUBMILLIMETER-WAVE ATMOSPHERIC TRANSMISSION

For nearly 87% of the days of the year the site exhibit 405 GHz opacities <3 Nepers (or transmission >5%), and considerably better at 212 GHz (i.e., $\tau \leq 0.6$, or transmission >55%). If we adopt these numbers as threshold transmission levels in the zenith direction, we may extrapolate attenuation to other altitudes for the most probable opacity levels (Fig. 4), based on its relationship to the pwv (6). For $\tau \leq 3$ Nepers at 405 GHz, we get pwd ≤ 9 mm using $\beta = 0.33$. However, the altitude versus pwv function is highly dependent on the latitude and season of the year. At the sea level it may range from 10 mm at Arctic/Antarctic regions to 50 mm at tropical latitudes (see, for example, SuomiNet global and regional pwv sounding webpage [22]). Therefore, one might encounter ground level submillimeter-wave transmission conditions, of about > 5% at 405 GHz and >55% at 212 GHz, at sea level for high latitudes, or for higher altitudes (>1000-2000 m) for temperate to tropical latitudes.

The measurements at El Leoncito exhibit opacities that are smaller compared to other mountain sites located at similar to higher altitudes in the world, suggesting that there is a water vapor content depression over that region. This effect might be explained by the El Leoncito location in between the two Andes chains, the main one in the west side, which shield the area from the Pacific controlled weather, and the secondary chain in the east side, isolating the site from the southern continental South-American weather.

Exceptionally transparent days can be found for all seasons, with a small reduction during summer and winter months. From the one-year cumulative opacity results we may predict the approximate atmospheric transmission at the upper frequency atmospheric "window" bands at 670 GHz and 850 GHz assuming a proportional attenuation with respect to the 400 GHz band (as shown in [23] for example). We find that for nearly 30% of the total time (i.e., 100 days/year) the opacity will be less than 2.0 Nepers (or >14% transmission).

REFERENCES

- [1] J. W. Walters, "Absorption and emission by atmospheric gases," in Methods of Experimental Physics, Astrophysics Part B: Radio Telescopes, M. L. Meeks, Ed. New York: Academic, 1976, vol. 12, pp. 142-176.
- [2] E. Grossman, AT. Atmospheric Transmission Software User's Manual. Boulder, CO: Airhead Software Corporation, 1989. [3] E. W. Weisstein, "Millimeter/submillimeter Fourier transform
- roscopy of jovian planet atmosphere," Ph.D. dissertation, Caltech, Pasadena, CA, 1996,
- [4] A. A. Penzias and A. A. Burrus, "Millimeter-wavelength radio-as-tronomy techniques," Ann. Rev. Astron. Astrophys., vol. 11, pp. 51-72. 1973.
- [5] B. L. Ulich, "Improved correction for millimeter-wavelength atmo-[5] B. L. Olch, Improved correction for minimeter-wavelength atmospheric attenuation," Astrophys. Lett., vol. 21, pp. 21–28, 1980.
 [6] J. H. Davis and P. Vanden Bout, "Intensity calibration of the interstellar carbon monoxide line at λ2.6 mm," Astrophys. Lett., vol. 15, p. 43, 1973.
 [7] D. H. Martin and E. Puplett, "Polarization interferometric spectrometer for milimate and unbuilding the intersterometry" Information Processing Sciences (Construction) (Cons
- for millimeter and submillimeter spectroscopy." Infrared Phys., vol. 10, pp. 105-109, 1969.
 R. A. Chamberlin, A. P. Lane, and A. A. Stark, "The 492 GHz atmo
- [8] spheric opacity at the geographic South Pole," Astrophys. J., vol. 476, pp. 428-433, 1997.
- [9] H. Matsuo, A. Sakamoto, and S. Matsushita. "FTS measurements of sub-
- [9] H. Matsuo, A. Sakamoto, and S. Matsushta. "F15 measurements of sub-millimeter-wave atmospheric opacity at Pampa la Bola," *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, vol. 50, pp. 359–366, 1998.
 [10] D. Y. Gezari, R. R. Joyce, and M. Simon, "Measurement of the solar brightness temperature at 345 μ, 450 μ, and 1000 μ," *Astronomy and Astrophys.*, vol. 26, pp. 409–44, 1973.

- 1.1.2
- C. Lindsey and H. S. Hudson, "Solar limb brightening in submillimeter wavelengths," Astrophys. J., vol. 203, pp. 753-759, 1076.
 R. L. Ulich, J. R. Cogdell, J. H. Davis, and T. A. Calvert, "Observations of the statement and analysis of lunar radio emission at 3.09 mm wavelength," The Moon,
- vol. 10, pp. 163–174, 1974. P. Kaufmann, J. E. R. Costa, C. G. Giménez de Castro, Y. R. Hadano, [13] P. Ka [13] P. Kaufmann, J. E. R. Costa, C. G. Giménez de Castro, Y. R. Hadano, J. S. Kingsley, R. K. Kingsley, H. Levato, A. Marun, J.-P. Raulin, M. Rovira, E. Correia, and A. V. R. Silva, "The new submillimeter-wave solar telescope," in *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Op-toeletronic Conf.*, Pará, Brazil, Aug. 6-10, 2001, pp. 439-442. reprinted in *Telecomunicações INATEL*, vol. 4, pp. 18-21.
 [14] S. Chandrasekhar, *Radiative Transfer*. New York: Dover, 1960.
 [15] J. D. Kraus, *Radio Astronomy*, 2nd ed: Cygnus-Quasar Books, Ohio State Univ.-Columbus, 1980.
- State Univ. Columbus, 1980. [16] C. G. Giménez de Castro, J.-P. Raulin, V. S. Makhmutov, P. Kaufmann, [10] C. O. Guinez de Casta, "Instantaneous positions of microwave solar bursts: Properties and validity of the multiple beam observations," Astronomy and Astrophys. Suppl., vol. 140, pp. 373–382, 1999.
 [17] A. M. Melo, C. G. Giménez de Castro, P. Kaufmann, H. Levato, A. Marun, P. Pereyra, and J.-P. Raulin, "Determination of submillimeter at-
- mospheric opacity at El Leoncito, Argentina Andes," *Telecomunicações INATEL*, vol. 6, pp. 32–36, 2003.
 [18] D. Hiriart, P. F. Goldsmith, and M. Skrutskie, "Atmospheric opacity at
- [16] D. Hilfart, F. F. Ooldsmith, and M. Skutske, Adhospheti Opachy at 212 GHz over San Pedro Martir in Baja California," *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, vol. 33, pp. 59–68, 1997.
 [19] 2002 Univ. Arizona's Steward Observatory and the Max-Planck-In-stitut für Radioastronomie [Online]. Available: http://aro.as.ari-
- zona.edu/weather_stats/weather_stats.htm
- C. Kramer and J. Stutzki, Atmospheric transparency at Gornegrat, in KOSMA Tech. Memo. 5, 1990.
 Y. Sakimoto, H. Yoshida, T. Hirota, Y. Takano, E. Furuyama, S. Ya-mamoto, S. Saito, H. Ozeki, J. Inatani, M. Ohishi, A. G. Cardiasmenos, M. M. Martin, M. Charles, C. Charles, A. G. Cardiasmenos, S. Saito, H. Ozeki, J. Inatani, M. Ohishi, A. Saito, H. Ozeki, J. Inatani, M. Ohishi, A. Saito, Sa and S. L. Hensel, "Measurements of 220 GHz atmospheric opacity on Mt. Fuji with a radiometer/radome system," Int. J. Infrared and Millimeter Waves, vol. 17, no. 7, 1996.
- [22] [Online]. Available: http://www.suominet.ucar.edu/indexGlobal.html
 [23] J. T. Jefferies, "Overview of infrared solar physics," in *Infrared Solar Physics*, D. M. Rabin, J. T. Jefferies, and C. Lindsey, Eds. Norwell, MA: Kluwer, 1992, pp. 1-9.



Arline M. Melo was born in São Paulo, Brazil, on July 16, 1980. She received the B.S. degree in physics from Mackenzie University, São Paulo, and the M.S. degree in electrical engineering from the State University of Campinas, São Paulo, in 2001 and 2004, respectively.

She is currently with the Center for Radio Astronomia and Astrophysics (CRAAM), Mackenzie Presbyterian Institute, São Paulo and is also a Graduate Student with the Faculty of Electrical Engineering and Computing (FEEC), Department of

Semiconductor Instruments and Photonics (DSIF), Campinas State University, São Paulo. Her current interests are in the development of a bolometric sensor at THz range for astronomical application

Prof. Melo received the Young Scientist Award from the International Union of Radio Science (URSI) in 2002.



Kaufmann (A'61-M'72-F'91-LF'01) Pierre received the degree in physics from Mackenzie University, São Paulo, Brazil, in 1961 and the Doctorate equivalent degree granted by the Brazil National Research Council in 1970 and the Ministry of Education's Federal Education Council in 1973.

He was the Coordinator of Mackenzie University's Graduate Program in Astrophysics from 1970 to 1989, is currently the Head of the Center of Radio Astronomy and Astrophysics and a Full Professor at Mackenzie Presbyterian Institute, a Senior Re-

searcher at Campinas State University, and Senior Researcher at the National Council for Scientific and Technological Development, Brazil Ministry of Science and Technology. He is the Principal Investigator of the Submillimeter Solar Telescope (SST) Project in agreement between CRAAM, INPE from Brazil and CASLEO-CONICET and IAFE Argentina.

Dr. Kaufmann was elected an Associate of the Royal Astronom ical Society and a Full Member of the Brazilian Academy of Sciences, both in 1987.

Anexo 2

1533

Anexos

1534

An OWNER WARRANT CORE OF IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL: 53, NO. 4, APRIL 2005



science popularization

C. Guillermo Giménez de Castro received the Ph.D. degree in physics from the University of Buenos Aires, Argentina, in 1996. He is currently a Professor of graduate and

undergraduate levels of electrodynamics and as-tronomy with the Center for Radio Astronomia and Astrophysics (CRAAM), Mackenzie Presbyterian Institute, São Paulo, Brazil. His areas of interest include radio science of solar activity, time series analysis, design of observational instruments, development of software for control and operation and



Jean-Pierre Raulin received the "Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA)" in gases and plasma physics from the University Pierre et Marie Curie, Paris, France, in 1989 and the "Diplôme de Docteur de l'Université" in plasma physics from the Uni-versity Pierre et Marie Curie, Paris, France, in

1993, for studying the acceleration of electrons to suprathermal energies in the solar corona From 1993 to 1996, he was an Associate Research

Fellow at the Department of Astronomy, Univer-sity of Maryland, College Park. He is currently a

Professor at the Center for Radio Astronomia and Astrophysics (CRAAM), Mackenzie Presbyterian Institute, São Paulo, Brazil, within the Postgraduate Program in electrical engineering. He is author or coauthor of 32 scientific papers in international journals. His main research interests include the physics of solar flares through their manifestations in radio wavelengths, X-rays and gamma-rays, as well as the aspects of solar-terrestrial physical relationship.



Orlando Hugo Levato was born in Buenos Aires, Argentina. He received the Doctor degree in astronomy from La Plata University, La Plata, Argentina, in 1973

He is a Specialist in stellar spectroscopy, anomalous stars, binaries, open clusters, stellar associations, spectral classification and statistics. He designed spectrographs and electronic detectors for faint illumination. He received Fellowship from Argentina's Commission for Scientific Investigations, Province of Buenos Aires, and from the Scientific

and Technical National Research Council of Argentina (CONICET) from 1975–1976, including a stay at Kitt Peak Observatory, Tucson, AZ. He was a Full Professor and Head of the Department of Stellar Spectroscopy at La Plata Astronomical Observatory from 1977 to 1984. He has been the Director of "Felix Aguilar" Astronomical Observatory and is a Full Professor at the of Treix Aguitar Astronomical UDSERVATORY and IS a Full Professor at the National University of San Juan, San Juan, Argentina. From 1978 to 1979, he was a Visiting Graduate Course Professor at the Physics Institute of Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil. He was a Senior Researcher and, since 1984, has been the Director of Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO-CONICET), San Juan, Argentina. He has published was the Volume the set of the astronomic and the set of the set of

more than 160 papers, most of them in acknowledged international journals. Dr. Levato received the CONICET "Bernardo Houssay" Prize for advances in stellar research in 1987, the "Silver Laureate" by the Buenos Aires Rotary Club for contribution for the advance of Argentina Astronomy, in 1992, and the "Honorable Mention" Prize by Konex Foundation, in 2003.



He was the Principal Professional of the Scientific and Technical National Research Council of Argentina (CONICET) and Associate Member of the Scientific Advisory Committee in the Argentine Gemini Project Office, in 1996. He is Head of the Electronic Department, Deputy Manager of Engineering Staff and Technical Head of El Leoncito

Astronómico El Leoncito (CASLEO-CONICET), San Juan, Argentina. He is the Head Engineer of Submillimeter Solar Telescope (SST) Project in agreement between CRAAM, INPE from Brazil and CASLEO-CONICET and IAFE Argentina. His research interests are concerned with the design, development, manufacture and testing of electronics devices and systems for scientific purposes. He works at new developments and at improvements of astronomic devices in high and low frequencies, detectors, automatic control systems, and computer hardware.



Jose Luis Giuliani received the degree in Electromechanical-Control Engineering from San Juan National University of Argentine, in 1982.

He was Principal Professional of the Scientific and Technical National Research Council of Argentina (CONICET). He is Head of Informatics and Communication Department and Deputy Manager of Engineering Staff of Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO-CONICET), San Juan, Argentina and Technical Chief of El Leoncito

Observatory in Andes Mountains. He is a Member of Engineering staff for the Submillimeter Solar Telescope (SST) Project in agreement between CRAAM, INPE from Brazil and CASLEO-CONICET and IAFE Argentian detection coverant, for b from blazit and CASEEO-CONCET and IAFE Argentian. He research is concerned with the design, implementation and system management of the radio communications, for interconnecting the LAN-WAN of CASEEO.



Pablo F. Pereyra received the degree in Electronic Engineering from the National University of San Juan, San Juan, Argentina, in 1989 and the degree of Specialist in Information Systems for Intranet in 2001

He joined the Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO)-Scientific and Technical National Research Council of Argentina (CONICET), San Juan, Argentina, in 1992. He is a Principal Professional of the Scientific and Technical National Research Council of Argentina (CONICET) and a Member

of the Computer Group. He joined the Scientific Advisory Committee in the Argentine Gemini Project Office as an Associate Member in 1996. Since 2000, he has worked on the Submillimeter Solar Telescope (SST) Project in agreement between CRAAM, INPE from Brazil and CASLEO-CONICET and IAFE Argentina. He has experience designing, developing, implementing, and testing real time software to control electronics and mechanical devices and to acquire analog data

ISSN 1516-2338

The Development of a Submm-Wave Uncooled Bolometric System and Field Test

Roberto R. Neli, Arline M. Melo, Cristiano J. N. Arbex, Maria B. P. Zakia, Ioshiaki Doi, Pierre Kaufmann, Jacobus W. Swart and Edson Moschim.

Abstract - Developments directed to potential interest for telecommunications in the submillimeter and far infrared wavelengths band have been increasing in recent years. The detection of radiation in that spectral region has various other important applications in remote passive radiometric sensing, some times called as thermosensing, such as imaging of field targets, power line surveys, night vision, radio meteorology, atmospheric propagation and astrophysics. The development of a non-imaging bolometer detector for incoherent radiation in the submillimeter bands is presented. Construction details are presented for a detector's active material using polycrystalline and amorphous silicon. We describe the bandpass filters to be placed in front of the detector, which are being designed to be constructed using the resonant mesh technology, centered at the peak frequencies around 405, 670 and 850 GHz. The bolometric system will be submitted to qualification and performance tests at the focal plane of a 1.5-m submillimeter reflector located at a high altitude dry site (El Leoncito, Argentina Andes), using the Sun as a source of blackbody radiation, and a beacon transmitter at 405 GHz located in the far field with respect to the reflector. The first applications considered for the system are measurements of atmospheric propagation, solar imaging and tentative detection of solar transients (flares) in the selected bands.

Resumo – Nos últimos anos tem se dado crescente importância ao desenvolvimento de microbolometros, atendendo interesses potenciais para telecomunicações, da faixa submilimétrica ao infravemelho distante. A detecção de radiação nesta

Roberto R. Neli is a doctoral graduate student at CCS – FEEC, Unicamp, Campinas SP, Brazil. Arline M. Melo is a MS graduate student at CCS – FEEC, Unicamp,

Arline M. Melo is a MS graduate student at CCS – FEEC, Unicamp, Campinas SP, Brazil and stays part time at CRAAM – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brazil:

Cristiano J. N. Arbex is a MS graduate student at CCS – FEEC, Unicamp, Campinas SP, Brazil;

Maria Beny is full-time researcher at CCS – Unicamp, Campinas, SP, Brazil;

Ioshiaki Doi, is a professor at FEEC-Unicamp and Vice-Director of CCS – Unicamp, Campinas, SP, Brazil; Pierre Kaufmann is professor at CRAAM - Universidade

resbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brazil and part-time researcher at CCS – Unicamp. Campinas. SP, Brazil

Jacobus W. Swart is professor at FEEC and Director of CCS -Unicamp, Campinas, SP, Brazil;

Edson Moschim is professor at FEEC, Unicamp, Campinas, SP, Brazil;

This research is being partially supported by FAPESP, Brazil, contracts 99/06126-7 and 02/04774-6, CNPq contracts 690190/02-6 and 140583/02-5, CAPES for CJNA master course fellowship, and by CONICET.

região espectral tem várias outras importantes aplicações em sensoriamento passivo remoto, também chamado de termosensoriamento, tais como imageamento de alvos no campo, supervisão de redes elétricas de potência, visão noturna, rádio meteorologia, propagação atmosférica e astrofísica. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um detector bolométrico, não imageador, de radiação incoerente em bandas submilimétricas, bem como os testes de campo previstos. São apresentados detalhes de construção do material ativo, formado por silício policristalino ou amorfo, do detector utilizando.

Descrevemos os filtros passa-banda a serem instalados frente o coletor de fótons e o detector, projetados e construídos para freqüências centradas em 405, 670 e 850 GHz. O sistema bolométrico será submetido a testes de qualificação e de desempenho no plano focal de um refletor submilimétrico de 1,5m localizado em sítio seco de elevada altitude (El Leoncito, Andes Argentinos), usando o Sol como fonte de radiação com característica de corpo negro, e um transmissor artificial de 405 GHz localizado à distância remota com relação ao refletor. Como primeiras aplicações consideradas para o sistema estão medidas de propagação atmosférica, imageamento solar, e detecção tentativa de transientes solares (explosões) nas bandas

Index Terms—Infrared detectors, submillimeter transmission, silicon devices, bandpass filters, bolometers.

I. INTRODUCTION

The detection of non-coherent electromagnetic waves in the range that includes millimetric, submillimetric waves until the far-infrared, uses bolometers or microbolometer array sensors which have their electric characteristics changed by the incidence of electromagnetic radiation.

In this project we will use resistive bolometers, where their electric resistance modifies when the radiation is absorbed. Their basic structure consists of a fine film of metal or semiconductor with an absorber film placed above, usually suspended by a substrate producing a thermal isolation (Fig. 1).

The detectors used in the submm-wave – IR range can be cooled or not. In more recent years uncooled detectors have been widely used. They provide good sensitivity at room temperature bringing advantages like low cost, low weight and low power consumption.

Telecomunicações - Volume 07 - Número 01 - Julho de 2004

ISSN 1516-2338

Among the various applications for the detectors that operate in these high frequencies there is an important potential future for telecommunications, from the ground in the range where there are atmospheric "windows" for transmission and above the Earth's troposphere for communications between platforms (balloons, airplanes and stationary devices) or between satellites.



Fig. 1. Microbolometer Structure.

Other important applications to be mentioned are the passive imaging made through clouds, fog, rain, smoke and even through walls; devices that allow night vision; terrestrial mining detection; fire detection; security devices; cameras for medical and industrial applications; mine sensors in battlefields for military purposes. Several thermosensing applications have been developed for agriculture, ground and crops surveys [Refs. 1-3].

This range of the electromagnetic spectrum is also of a great interest for space sciences, because it brings essential spectral information on the cosmic background radiation, on distant galaxies recently formed and on the initial phases of stellar formation in gas clouds in our own galaxy [4].

The diagnostics of astrophysical objects in the submm-IR range – with emphasis to the Sun - not only in the continuum but also in spectral lines; are in the front line of current research. In this range of wavelengths it is possible to distinguish thermal from the non-thermal emissions caused by relativistic particles. These measurements can be developed from the ground, or from space platforms in balloons and satellites.

The design of a room-temperature bolometric detection system has been developed, which basic technical features, qualification tests, and first applications are described here.

II. DEPOSITION AND PROCESSING PARAMETERS

An alternative way to perform thermally insulated bolometers consists of micromachining the active element to form a microbridge which is anchored to the silicon substrate through thin supports. The thermal detectors are based on the effect of temperature change caused by the heat absorbed from incident radiation upon the detector [5]. They have a number of advantages including wide spectral response, room temperature operation and low cost. The thermal insulation is determined by the geometry and the thermal conductivity of the supports. Strong candidates for the active material to be used are poly and amorphous silicon. Their electrical temperature coefficient of resistance and conductivity (TCR) can be easily controlled by boron doping. It is fully compatible with integrated circuit (IC) technology, can operate in a wide range of temperature and presents low cost technology.

Using silicon anisotropic etching in potassium hydroxide solution (KOH, 10M at 82°C), various shapes of bridges were fabricated as shown in Fig. 2.





Nitride silicon or silicon oxide films are prepared on a (100)-oriented silicon substrate as support films acting as microbridges. First, the silicon wafer has been covered with a 500nm silicon nitride deposited by electron synchrotron resonance (ECR), or with a 1µm silicon oxide, grown in a wet oxidation. In the following step, a 1µm thick poly or amorphous silicon layer is deposited on top of silicon nitride using chemical vapor deposition (CVD). The silicon nitride layer is implanted with a low boron dose $(3 \times 10^{13} \text{ B cm}^{-2})$ in order to obtain the desired resistivity and TCR. A 100 nm thick layer of silicon nitride is deposited onto poly silicon in order to insulate the submm-wave/infra-red absorber from the active element [6]. These three layers consist the pattern in order to define the support legs and active area, whereas the support legs are highly doped (10¹⁶ B cm⁻¹) [7], to act as electrical contacts. This highly doping also forms a p-njunction with silicon substrate proving an electrical insulation. After deposition of metal contacts, the processing of the absorber formed by a porous gold layer.



e Fig. 3. Schematic flow chart of silicon microbolometers

Telecomunicações - Volume 07 - Número 01 - Julho de 2004

Anexo 3

61

fabrication.

This layer is known as "gold black" or "gold soot" and is obtained by gold evaporation in nitrogen atmosphere. [8]. The absorber function is to convert the incident radiation into heat. It must have high absorption efficiency, high reproducibility and must be compatible with standard process. We can observe a bolometer fabrication scheme in Fig. 3.

III. RESONANT MESH AS BANDPASS FILTERS

There are many applications for bandpass filters in the submm-wave to far-infrared range of frequencies. For example, "tunnel" junction mixers need bandpass filters to avoid the saturation by thermal radiation [9]. The noise equivalent power of a bolometer can also be reduced by using a bandpass filter to block the thermal radiation over the spectral range of the detector [9].

Bandpass filters are used in bolometric systems to select spectral frequencies of non-coherent electromagnetic waves in the range that includes millimetric, submillimetric extending to the far-infrared waves, on various applications in passive sensing or imaging. In the present case, the filters designs must have center frequencies to fit the atmospheric transmission windows, similarly to the selections made by Chase and Joseph [10]. Such filters should present good transmission at the center of the band and excellent blocking for lower and higher frequencies.

There is a variety of resonant mesh structures with different shapes that produce bandpass response, such as arrays of crosses; arrays of circular and square conducting rings and pairs of concentric circular conducting rings [Ref. 9-12]. Our attention will be directed to arrangements of cross-shaped elements.

It is known that a conductive plate with a square opening acts as a high-pass filter, and in the transmission lines model context is considered as an inductive arrangement [10,11].



Fig. 4. Atmospheric opacity (in nepers) vs. frequency (in GHz).

ISSN 1516-2338

(1)

Similarly, an arrangement with a complementary structure, acts as a low-pass filter also called as a capacitive arrangement.

Associating those two arrangements, a bandpass behavior is obtained, as is the case of the cross-shaped elements arrangement [11]. Considering typical atmospheric spectral transmission characteristic [Refs. 13-16], we selected transmission "windows" centered in the frequencies around 405, 670 e 850 GHz for the filters.

These frequencies correspond, to the following wavelengths: $741 \mu m$, $448 \mu m$ and $352 \mu m$, respectively as we can see in Fig. 4. The design parameters were studied for bandpass filters centered on those bands.

Several authors have used cross-shaped elements as bandpass filters with different notations to characterize the crosses' dimensions [Refs. 9-11]. In this work we will follow the nomenclature given by Chase and Joseph [10]. The cross-shaped elements have the design shapes shown in Fig. 5, where g is the periodicity, L is the cross length, 2b is the cross width and 2a is the separation between crosses. In this Fig. we can find this relationship:





The resonance wavelength (wavelength where occurs the maximum transmission) is given by [10,12]:

$$_{0} = 2.1L$$
 (2)

on the condition that the b/a ratio is smaller than 1.

2

Thus, for each value of the filter central frequency, there are corresponding values for L, close to a half-wavelength.

62



Anexo 3

Revista Científica Periódica - Telecomunicaçõe



Fig. 6. Measured data and fitted curve for the bandwidth vs b/a ratio.

For 220 GHz, we obtain $L = 649 \ \mu\text{m}$. For 410 GHz, $L = 348 \ \mu\text{m}$ and for 670 GHz, $L = 213 \ \mu\text{m}$. Our design looks for a small bandpass, nearly 25% of the central wavelength. Fig. 6 shows the dependence of the bandwidth with the b/a ratio. The experimental data were obtained from Porterfield et al. [9] and Chase and Joseph [10]. Fitting the data of Fig. 6 derived an empirical equation relating the bandpass and the b/a ratio:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_{\rm m}} = -0.0839 + 0.8115 \left(\frac{b}{a}\right) - 0.2984 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + 0.0409 \left(\frac{b}{a}\right)^3$$
(3)

where using $\delta \lambda / \lambda_m = 0.25$, we get $b/a \cong 0.5$.

IV. THE CONSTRUCTION OF FILTERS

Using the Eq.1 and Eq.2, adopting g equal 80% of the resonant wavelength $g = 0.8 \lambda_0$ and $b/a \approx 0.5$ as the result of the Eq.3, the following filter parameters are obtained:

f (GHz)	g (µm)	L (µm)	a (µm)	b (µm)
220	1091	649	221	111
410	586	348	119	60
670	358	213	73	37

The filter construction is being considered with the use of photolithography process associated to an etching process or metal deposition. Porterfield et al. [9] uses the copper electroplating process for the crosses formation. Initially a thin copper layer is deposited on a glass substrate. Then, photoresist is applied on the whole copper surface which is submitted to exposure to UV followed by the photoresist development, so that the crosses become in high relief. Then the copper electroplating around the photoresist crosses is done. Removing the photoresist produces the crosses cavity. The initial cooper layer is removed with a light etching.

Chase and Joseph [10] and Tomaselli et al. [11] used he etching process to obtain the mesh crosses. In this process a metal substrate (aluminum [12] or copper [11])

Telecomunicações - Volume 07 -



ISSN 1516-2338

is deposited onto a thin Mylar substrate. After the photoresist is applied the exposure is done. Later, the metal etching is accomplished to obtain opaque crosses.

MacDonald et al. [12] uses the liftoff process. A polyester substrate is glued with photoresist on a base formed by a silicon substrate. The polyester is covered with photoresist to perform the exposure and development, so that the crosses become in high relief. A gold or lead layer is later deposited by sputtering, so that the cross is surrounded by metal. Acetone can be used to remove the polyester of the substrate.

For the present design we will consider the processes described by Porterfield et al. [9], Chase and Joseph [10] and Tomaselli et al. [11].

Fig. 7 illustrates two enlarged views of a 565 GHz mesh filter built in the CCS laboratory for bandpass testing purposes.

The complete bolometric system will be assembled at the end of a "photon trap" to achieve maximum collection of radiation using the technique of non-imaging concentrator, also known as Winston cone [17] [18].



Fig.7. Enlarged views of resonant mesh filter designed for center frequency of 565 GHz, built on aluminum/plastic film at CCS laboratory.

V. OBJECTIVES AND TESTS

This project proposes the establishment of definitions, prototype construction and installation of a bolometric system in the focal plane of a 1.5-m reflector for submmwaves (SST project) installed in Argentina Andes [19] – which was made available for the present research. The assembly will be used





Fig. 8. The cumulative opacity plots for El Leoncito for 212 GHz (top) and 405 GHz (botton) for one year of measurements [17,18].

for tests on its performance, radiation detection, and qualification. Solar emission will be used as a source of continuum radiation, exhibiting a black body spectrum. At one frequency band, 0.4 THz, a beacon transmitter will be used at the same site, located in the far field with respect to the reflector.

Recent measurements of atmospheric opacity for the site of El Leoncito show that nearly 60% of the observing time has opacities smaller than 0.35 (Nepers) for 212 GHz and 1.5 (Nepers) for 405 GHz, showed in Fig. 8. This study was made for measurements during one year of observations (Mar - 2002 -Feb 2003) [20] [21]. According to model predictions [Refs. 13-16] the fraction of observing time for an atmospheric opacity smaller than 2.0 (Nepers) at 670 GHz and 850 GHz at El Leoncito is expected to be in the range of 50 - 70 %, therefore nearly 170 days in a year.

A number of applications are also being considered for this initial phase. They will concentrate on atmosphere propagation, which inhomogeneities and opacity determinations are not very well known in this range of frequencies [13], as well as on solar imaging and possible solar transients detections (flares). These measurements will complement the works that are been done at submmwaves propagation using SST at frequencies for which there are coherent heterodyne radiometers available (212 and 405 THz).

VI. FINAL REMARKS

It has been shown that submm-wave-far IR uncooled sensors using resistive bolometers can be used to perform high frequency measurements of uncoherent radiation in ISSN 1516-2338

various applications. A small bias is generated when submm-infrared radiation from the emitting source is directed to the detector, measured by an external circuit. Poly and amorphous silicon can be used as active element built in different patterns which will be measured to observe the best result. The resistivity and TCR of the active element can be obtained by ion implantation and low-temperature annealing. The microbolometer was coupled to a submm-IR absorber with low thermal mass, forming in this way an efficient bolometer. Bandpass filters using resonant mesh technology will be used to limit the operation frequency band, defining the spectral resolution of the measurements. We selected atmospheric transmission windows to centralize the frequencies 400, 670 and 850 GHz for the filters designs. The complete process for their fabrication was described. Performance and qualification tests will be performed placing the bolometer system in the focal plane of a 1.5-m submmwave reflector, located in a high and dry mountain site (El Leoncito, San Juan, Argentina). Solar black body emission will be used as a test radiation source for the three bands, together with a 410 GHz far field beacon transmitter at the same site. Initial applications will be directed to atmospheric transmission measurements, solar imaging and transient detection.

REFERENCES

- D. S. Tezcan, T. Akin, "A CMOS N-weell Microbolometer FPA with Temperature Coefficient Enhancement Circuitry," SPIE 4369, 240-249, 2001.
- [2] D. Murphy, M. Ray, R. Wyles, J. Asbrock, N. Lum, A. Kennedy, J. Wyles, C. Hewitt, G. Graham, W. Radford, J. Anderson, D. Bradley, R. Chin, T. Kostrzewa, "High sensitivity (25 μm pitch) microbolometer FPAs and application development", SPIE 4369, 223-234, 2001.
- [3] O. Savry, P. Agnèse, "Arrays of bolometer detector for millimeter wave imaging: feasibility, performances and construction of a prototype," Présenté à IRMMW Toulouse, 2001.
- [4] T. G. Phillips, "Techniques of submillimeter astronomy", Millimetre and Submillimetre Astronomy, vol. 147, pp. 1-25, 1988.
- [5] L. Dobrzanski, E. Nossarzewska-Orlowska, Z. Nowak, J. Piotrowski, "Micromachined silicon bolometers as detectors of soft X-ray, ultraviolet, visible and infrared radiation," Sensors and Actuators A, vol. 60, pp. 154-159, 1997.
- [6] S. Sedky, P. Fiorini, M. Cayamax, A. Verbist and C. Baert, "IR bolometers made of polycrystalline silicon germanium," Sensors and Actuators A, vol. 66, pp. 193-199, 1998.
- [7] T. A. Core, W. K. Tsang, S. J. Sherman, "Fabrication technology for an integrated surface-micromachined sensor," Solid State Technology, vol. 36, 1993.
- [8] S. J. Lee, Y. H. Lee, S. H. Suh, Y. J. Oh, T. Y. Kim, M. H. Oh, C. J. Kim, B. K. Ju, "Uncooled thermopile infrared detector with chromium oxide absorption

64

Telecomunicações - Volume 07 - Número 01 - Julho de 2004

Anexos

ISSN 1516-2338

Revista Científica Periódica - Telecomunicações

layer," Sensors and Actuators A, vol. 95, pp. 24-28, 2001.

- [9] D. W. Porterfield, J. L. Hesler, R. Densing, E. R. Mueller, T.W. Crowe, and R. M. Weikle II, "Resonant metal-mesh bandpass filters for the far infrared," Appl. Opt., vol. 33,no. 25, pp. 6046-6052, Sept. 1994.
- [10] S.T. Chase and R. D. Joseph, "Resonant Array bandpass filters for the far infrared," Appl. Opt., vol. 22, no. 11 pp. 1775-1779, June 1983.
- [11] V. P. Tomaselli, D. C. Edewaard, P. Gillan, and K. D. Möller, "Far-infrared bandpass filter from crossshaped grids," Appl. Opt., vol. 20, no. 8, pp. 1361-1366, April 1981.
- [12] M. E. MacDonald, A. Alexanian, R. A. York, Z. Popovic, and E. Grossman, "Spectral transmitance of lossy printed ressonant-grid terahertz bandpass filters," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 48, no. 4, pp. 712-717, April 2000.
- [13] H. J. Liebe, "Modeling attenuation and phase of radio wave in air at frequencies below 1000 GHz," Radio Science, vol. 16, no. 6, pp. 1183-1199, 1981.
- [14] B. L. Ulich, "Improved Correction for Millimeter-Wavelenght Atmospheric Attenuation", Astrophysical Letters, vol. 21., pp. 21-28, 1980.
- [15] M. A. Holdaway and J. R. Pardo, "Modeling of the submillimeter Opacity on Chajnantor", NRAO MMA Memo 187, USA, 1997.
- [16] E. Grossman, "AT, atmospheric transmission software user's manual", Airhead Software Cp., Boulder, CO, USA, 1989.
- [17] R. Winston and W. T. Welford, "Design of nonimaging concentrators as second stages in tandem with image-forming first-stage concentrators," Appl. Opt., vol. 19, pp. 347-351, Feb.1980.
- [18] E. W. Weisstein, "Millimeter/submillimeter Fourier transform spectroscopy of jovian planet atmospheres," Doctoral Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1996.
- [19] P. Kaufmann, J. E. R. Costa, C. G. de Castro, Y. R. Hadano, J. S. Kingsley, R. K. Kingsley, H. Levato, A. Marun, J. P. Raulin, M. Rovira, E. Correia, V. R. Silva, "The New Submillimeter-wave Solar Telescope", Proc. SMBO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, August 6-10, Belém, PA, Brasil, 439, 2001.

- [20] A. M. Melo; C. G. Giménez de Castro; P. Kaufmann; H. Levato; A. Marun; P. Pereyra and J. P. Raulin, "Determination of submillimeter atmospheric opacity at El Leoncito, Argentina Andes", Telecomunicações
- INATEL, vol. 6, pp. 32-36, 2003.
 [21] P. Kaufmann; C. G. Giménez de Castro; J. P. Raulin, A. M. Melo; H. Levato; A. Marun; J. L. Giuliani and P. Pereyra, "Comparison of Radiometric Methods for Measuring Atmospheric Transmission at Submillimeter Wavelengths", in preparation, 2003.

Anexo 3

65

Il Workshop de Nanotecnologia Aeroespacial - Nano Aeroespacial 2006 16 e 17 de outubro de 2006 Resumos Estendidos

DESENVOLVIMENTO DE FILTROS DE RADIO FREQÜÊNCIA COM REDES RESSONANTES PARA FOTOMETRIA E IMAGEAMENTO NA FAIXA THZ

A. M. Melo^(1,2), Marcon R.^(3,4), Kaufmann^(1,2), E. Bertolucci⁽¹⁾, M. B. Zakia⁽¹⁾, M. H. Piazzetta⁽⁵⁾, A. M. P. A. da Silva⁽¹⁾

(1) Centro de Componentes Semicondutores, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

armame@gmail.com

(2) Centro de Radio Astronomia e Astrofísica, CRAAM, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil
 (3) Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

(4) Observatório Solar Bernard Lyot, Campinas, Brasil

(5) Laboratório Nacional de Luz Sincrotron, Campinas, Brasil.

O grande interesse em medidas fotométricas e imageamento na banda THz do espectro tem motivado o desenvolvimento de filtros ressonantes de radio-freqüência para serem acoplados a elementos sensores, tais como matrizes de bolômetros. Grades ressonantes ou superficies seletivas de frequência (FSS) são relativamente simples de fabricar, exibindo alta transmissão da frequência central (aproximadamente 80%), banda passante estreita (menor que 20% da freqüência central) e boa rejeição [1]. Foram fabricados filtros para seis diferentes freqüências centradas em 405, 670, 850, 2000, 4000 e 8500 GHz usando técnicas de fotolitografia e eletrodeposição metálica no Centro de Componentes Semicondutores (CCS-UNICAMP), Centro de Pesquisas Renato Archer (CENPRA) e Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) em Campinas. Na figura 1 encontramos duas imagens ampliadas dos filtros obtidos para 405 e 8500 GHz. Os filtros para maiores frequências, 4 e 8.5 THz, apresentaram arredondamento das bordas, com efeitos estudados em simulações [2]. As respostas em frequência dos filtros foram simuladas utilizando o Software CST Microwave Studio para estudo dos parâmetros de projeto. Testes experimentais de transmissão dos filtros estão sendo realizados no Instituto Max-Planck para Física Extraterrestre (MPE) em Garching, Alemanha, onde se encontra todo o sistema de medida necessário para tais testes, o mesmo utilizado nos experimentos do projeto PACS - Photodetector Array Camera & Spectrometer, um dos instrumentos que estará a bordo do satélite Hershel. As primeiras medidas experimentais revelaram excelentes resultados, com bandas passantes menores que 18 % da freqüência central e transmissão acima de 75 % [3]. Testes preliminares do sistema imageador/filtro foram realizados no Observatório Solar Bernard Lyot, em Campinas, acoplando-se redes ressonantes a uma matriz de bolômetros não refrigerados de uma câmera imageadora comercial. Um resistor aquecido foi utilizado como fonte de radiação cuja imagem foi formada no plano dos microbolômetros com arranjo óptico montado para este fim. Na Figura 2 temos imagens do sistema com filtro acoplado a câmera IV sem a óptica de Germânio e corpo aquecido e exemplo de imagem obtida em 2 THz.

Agradecimentos: Esta pesquisa foi parcialmente financiada por agências FAPESP e CNPq - Instituto do Milênio (NAMITEC).

Referências:

[1] PORTERFIELD D. W., HESLER J. L., DENSING R., MUELLER E. R., CROWE T. W. e WEIKLE II R. M., Resonant metal mesh bandpass filters for the far infrared, Applied Optics, vol 33, No 25, 1994.

[2] MELO A. M., KAUFMANN P., BORTOLUCCI E. C., PIAZZETTA M. H., ZAKIA M. B, Filtros a Malha Ressonante para Faixa THz do Espectro, EM 12° SBMO – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS E OPTOELETRÔNICA E 7° CBMAG – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, Belo Horizonte, 2006 e Journal of Microwave and Optoelectronics, submetido, 2006.

[3] MELO A. M., BAUER O. H., BORTOLUCCI E., KAUFMANN P., KORNBERG M., PIAZZETTA M. H., POGLITSCH A., SILVA A. M. P. A., ZAKIA M. B, Development of bandpass resonant mesh filters for the THz range, International Workshop on Telecommunications (IWT), 2007, submetido.



Figura 1: Malhas construídas no presente trabalho (a) e (b) para as freqüências de 405 GHz e 8,5 THz

Il Workshop de Nanotecnologia Aeroespacial - Nano Aeroespacial 2006 16 e 17 de outubro de 2006 Resumos Estendidos



Figura 2: Fotos dos primeiros ensaios do sistema câmera/filtro e uma imagem obtida em 2 THz.

Development of bandpass resonant mesh filters for the THz range

Arline M, Melo^{4,b}, O. H, Bauer⁴, E. Bortolucci⁶, P. Kaufmann^{4,5}, M. Kornberg⁴, M. H. Plazzetta⁴, A. Poglitsch⁶, A. M. P. A. da Silva⁴, and M. B. Zakia⁶

*Center for Semiconductor Comparison, Campines State University, Complexe, Brooll *Center for Radio Astronomy and Astrophysics, CRAAM-Engineering School, Mackenne Presbyterian University, São Paulo, Brazil *Mex-Planck-Institut für estimarregrische Physik, Gardning, Germany *Mational Synchronomy, Campions, Direct comparison (Campion), Direct astrophysics, Direct Campion, Direct *Mational Synchronomy, Campions, Direct astrophysics, Direct Campions, Direct *Mational Synchronomy, Campions, Direct *Comparison, Direct *Comp

amanegentail.com

Abstract- The interest in photometric and imaging measurements in the THz hand has motivated the development of bandpass resonant filters to be coupled to sensing devices such as bolometer arrays. Resonant grids or frequency selective surfaces (FSS) are relatively simple to fabricate, exhibiting high transmission at the central frequency (about 80%), narrow band pass (less than 20% of the central frequency) and good rejection of the side frequencies of the spectrum. We present the results of filters fabricated for frequencies centered at 405, 670, 850, 2000. 4000 and 8500 GHz using photolithography and electroforming techniques. Transmission tests were performed at laboratory facilities of the PACS (Photodetector Array Camera & Spectrometer) instrument for the Herschel satellite at the Max-Planck-Institut für extratorrestrische Physik (MPE) in Germany. The measured transmittances of the resonant grids were found to be close to those predicted by design with a bandpass less than 12% of the central frequency. The effects due to fabrication features, especially at higher frequencies, are discussed. These developments are primarily intended for solar imaging and photometry of transient phenomena still unknown in the THz continuum

Index Terms—resonant mesh filters, frequency selective surfaces, THz filters, THz RF tuning

There are increasing demands for experiments in high frequencies in recent years, especially at THz range, in different areas such as radioastronomy, remote sensing and high energy laboratory plasmis diagnoses. They have motivated the development of RF filtering methods to select frequency bands in the submillimeter to infrared spectrum, as for example coupled planar antennas, interferometers and bidimensional structures such as thesh filters or frequency selective surfaces (FSS) [1].

The metal mesh filters can exhibit high-pass, low-pass, band-pass or rejection transmission performances, for different designs.

The resonant filters have the advantage to require caster fabrication processes in comparison to other filtering possibilities. They are compact, exhibiting high central frequency transmission (bigher than 80 %), narrow and adjustable band pass (less than 20% of the central frequency) and good rejection of the side band frequencies [2-5]. For the present application we selected cross-shaped format filters, designed as the junction of capacitive and inductive meshes. The filter frequency response and its geometry are obtained as a combination of the G, L and K parameters as illustrated in Figure 1.



Fig. 1. Illustration of a cross shaped band pass filter with their geometry parameters

The filters can be fabricated using different techniques. Ore micromachining technique uses polymer film as substrate with a metallized polypropytene). However, the plastic films add absorption, and have thermal and mechanical limitations for certain applications. Another micromachining procedure explores electropisting techniques producing in a metal plate with the cross formats without absorption, which improves the final filter transmission.

We used the second technique to fabricate band pass filters for six different frequencies: 405, 670, 850 GHz and 2, 4 and 8.5 THz. The designed mesh parameters were derived from Porterfield et al. [2], shown in Table L

TABLET
MEER DESKO MEASURED FARAMETERS FOR THE DIFFERENTS PRODUENCES
(IN MICRORYS)

	405 GHz	670 GHz	850 GHz	2 THz	4 TBz	3.5 TH2
L	370	225	175	76	36	1.18.
K.	110	60	50	22	10	1.1
ū.	590	350	302.5	120	60	28

The fabrication processes using photolithography and electroforming techniques were performed at Center of Semiconductor Components (CCS), Renato Archer Research

Anexos

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON TELECOMMUNICATIONS - INVEST

The obtained samples were submitted to a baking process, then exposed to UV radiation during 30-40 seconds and finally developed. This process sequence prepares the samples for the deposition of the metallic material that will form the filter. In our case we used nickel.



Fig. 2. The fabrication process steps: (a) prepared substract with SkOi, Ti and Au: (b) photol(thegraphy process; (c) electroplating process; (d) development of the photoesist and (e) the final otherg.

The electroplating used a WATTS buth of nickel sulfate, nickel chlorine, horie acid and water, with current density of 3 A/dcm². The lnst phase of the process is the otching, to remove the photoresist and the layers of SiO₂. Ti and Au, using potassium cyanide and HF Buffer. The fabrication process steps are shown in Figure 2.

All the monufactured filters have shown a high quality grown nickel film with well definite crosses outline. The two higher frequencies showed a rounded form outline, more remarkable for the 8.5 THz filter (see Figure 3).



Fig. 3. Filter mesh crusses exhibited well definite borders, except for the two higher frequencies, more remarkable for 3.5 THz.

Prediction of the fabricated meshes frequency responses was attempted using CST Microwave Studio software [6], with the measured parameters as inputs. The qualitative results were consistent with the design, but produced a number of spurious transmissions which were not confirmed by the uchail measurements - possibly because the frequencies were to high for the models assumed by software.

Resonant filter meshes transmission for the frequencies of 405, 670, 850 GHz and 2 THz were measured in the PACS (Photodetector Array Camera & Spectrometer) development laboratory, part of the Herschel project at the Max-Planck Institut für extraterrestriche Physik, in Garching, Germany [7]. The central frequencies measured were 395 GHz, 674 GHz, 858 GHz and 2,09 THz respectively. The equipment used was a Fourier Spectrometer employing a mercury lamp as FIR source and a LHe-cooled bolometer as detector.

The filters frequency responses obtained are shown in the Figure 4. The full-width at half maximum (FWHM) values found are: 17,6 % for 405 GHz, 14,2 % for 670 GHz, 14% for 850 GHz and 10,7% for 2 THz in relation to the central frequency (F₂). The transmittances were found to be better than 75% for all frequencies.

The band-widths obtained here were compared to results from others authors, as shown in Figure 5. They present performance comparable to results from Porterfield et al. [2] and Page et al. [8].

The development of photometric imager systems for solar activity observations is being plauned. The resonant mesh filters described here are coupled to commercially available focal plane arrays of microbolometers and readout electronics, preceded by optical setup to form the image at the FPA. The concept has been successfully demonstrated, and is currently undergoing several improvements to obtain one operational sensor in the THz range.

Anexo 5

257



Transmittance





Fig. 5: Comparative FWHM (in % of Fe) results by different authors: \Box [2] Δ [8] 0 [9] = present results.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was partially supported by Brazilian agencies FAPESP and CNPq - NAMITEC Millennium Institute.

REFERENCES

 Goldsmith P. F., "Quasi-optical techniques", Proceedings of the IEEE, vol 80, no 11, 1992 [2] Porterfield D. W., Hesler J. L. Densing R., Mueller E. R., Crowe T. W. e Weikle II R. M., "Resonant metal mesh bandpass filters for the far infrared", Applied Optics, vol 33, No 25, 1994.

[3] Tomaselli V. P., Edewaard D. C., Gillan P., Moller K. D., "Far infrared bandpass filters from cross shaped grids", Applied Optics, vol 20, No 8, 1981.

[4] Ulrich R., "Far infrared properties of metallic mesh and its complementary structure", Infrared Phys. 7, 37-55, 1967.

[5] Chase S. T e Joseph R. D., "Resonant array bandpass filters for the far infrared", Applied Optics, 22, 1983.

[6] www.cst.br

[7] Poglitsch A., Wselkens C., Bauer O. H. et al., "The photodetector array camera and spectrometer (PACS) for the Herschel Space Observatory", Proceedings of SPIE – Volume 6265, 2006.

[8] Page L. A., Cheng E. S., Golubovic B., et al., "Millimetersubmillimeter wavelength filter system", Applied Optics, vol 33, No 1, 1994.

[9] Möller K. D. Warren J. B., Heaney J. B. e Kotecki, C., "Cross-shaped bandpass filters for the near- and mid-infrared wavelength regions", Applied Optics, vol. 35, No 31, 1996.

Search for high energy particle acceleration signatures in the submillimetrevisible solar flare emission spectrum

<u>Kaufmann, P.; Melo, A. M.; Marcon, R.; Kudaka, A. S.; Marun, A.; Pereyra, P.; Raulin, J.-P.;</u> <u>Levato, H.</u>

Abstract

Recent results obtained at submm-waves indicated that key questions regarding physical mechanisms at the origin of solar flares are expected to become better understood with measurements in the far to mid IR range. A new spectral component discovered with fluxes increasing for shorter submillimeter wavelengths indicates emissions by particles accelerated to very high energies. The nature of emission is not known. The observed parameters rule out a thermal interpretation, and the first emission models recently suggested assume three different mechanisms which may become comparable in importance: (a) synchrotron radiation by beams of ultrarelativistic electrons; (b) synchrotron radiation by positrons produced by nuclear reactions arising from energetic beams interactions at dense regions close to the photosphere, and (c) Langmuir waves emission from deep photosphere excited by high energy electron beams. The spectral band where observed features would be critically defined is in the far infrared to visible range, where the terrestrial atmosphere is highly opaque. New experiments are being considered to observe solar flares from the ground in the remaining high frequency atmospheric "windows" at 670, 850 GHz and in mid- and near infrared. Space experiments are planned for discrete frequencies between 1-20 THz. We show the first results obtained with a new setup developed to measure solar activity at 10 µm (or 30 THz), using a camera with a focal plane array of uncooled microbolometers coupled to a celostat by an adequate optical arrangement

THz Metal Mesh Filters - Project, Fabrication and Tests

A. M. Melo^{1,2}, M. Kornberg³, P. Kaufmann^{1,2}, M. H. Piazzetta⁴, R. M. Marcon⁵, E. Bortolucci¹, A. M. P. A. da Silva⁶, M. B. Zakia¹, O. H. Bauer³, A. Poglitsch³, and H. E. H. Figueroa⁶

¹ Center for Semiconductor Components, Campinas State University, Campinas, Brazil
² Center for Radio Astronomy and Astrophysics, CRAAM-Engineering School, Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, Brazil
³Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching, Germany
⁴ National Synchrotron Light Laboratory, Campinas, Brazil
⁵ Gleb Wataghin Physics Institute, Campinas State University, Campinas, Brazil
⁶ Microwave and Optics Department, Electrical and Computer Engineering Faculty, Campinas State University, Campinas, Brazil

The interest in photometric and imaging measurements in the THz band has motivated the development of bandpass resonant filters to be coupled to imaging devices such as bolometer arrays. Resonant grids or frequency selective surfaces (FSS) are relatively simple to fabricate, exhibiting high transmission at the central frequency (about 80%), narrow band pass (less than 20% of the central frequency) and good rejection of the side frequencies of the spectrum. We have fabricated filters centered at frequencies of 405, 670, 850, 2000, 4000 and 8500 GHz using photolithography and electroforming techniques at Center of Semiconductor Components (CCS), Renato Archer Research Center (CENPRA) and National Synchrotron Light Laboratory (LNLS) in Brazil. Filter frequency responses were simulated using CST Microwave Studio. Actual transmission tests were performed at laboratory facilities of the PACS (Photodetector Array Camera & Spectrometer) instrument for the Herschel satellite at the Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Germany. The measured transmittances of the resonant grids were found to be close to those predicted by design and with a bandpass less than 12% of the central frequency. The effects due to fabrication features, especially at higher frequencies, are discussed. The first THz images produced with our filters are presented here. This research was partially supported by Brazilian agencies FAPESP and CNPq - NAMITEC Millennium Institute.

Blockage of thermal radiation from intense sources using rough mirrors for far-infrared photometry

Rogério Marcon^{1,2}, Mariano Kornberg³, Thomas Rose⁴, Pierre Kaufmann^{5,6}, Arline M. Melo^{5,6}, Rodolfo Godoy⁷, Adolfo Marun⁷ and Hugo Levato⁷

¹ Instituto de Física "Gleb Watagin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

² Observatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, SP

³ Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching, Germany

⁴ RPG Radiometer-Physics, Meckenheim, Germany

⁵ Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie- Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP

⁶ Centro de Componentes Semicondutores, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

⁷ Complejo Astronómico El Leoncito, San Juan, Argentina

Abstract. Far infrared photometry and imaging of intense radiation sources, such as the solar disk, require the suppression of thermal radiation in the range visible-near infrared (wavelengths less than about 1 micron). Filters using certain materials or frequency selective surfaces on substrates are possible, but they imply in losses which may become significant, and the materials and substrates may heat up to undesirable levels. Space experiments are being considered for solar activity photometry in the far infrared and THz ranges. The most significant is the Project DESIR (DEtection of Solar eruptive Infrared Radiation) in development by LESIA laboratory from Paris/Meudon Observatory, with sensors for the 25-35 and 100-200 microns bands, proposed for the French-Chinese platform SMESE (SMall Explorer for the study of Solar Eruptions) funded by French agency CNES. The Project SIRA (Solar InfraRed Activity) was recently submitted to FAPESP agency, consisting in a solar photometer experiment centered at 3 THz to be carried by stratospheric balloons. In order to block the thermal radiation at the experiments' inputs we have explored the concept of its diffusion by rough mirrors. Prototypes of mirrors were fabricated using three different processes: saturated aluminum evaporation on flat glass; micro-grooves on aluminum plate and aluminum paint for high-temperature ovens. Reflectivity as a function of wavelength for a fixed small incidence angle was measured at MPE, Garching, Germany, and for the 30 THz band (10 microns) as a function of angle of incidence was tested at El Leoncito, CASLEO, Argentina. The preliminary results were highly encouraging, demonstrating the feasibility of the concept for application on solar sensing in the far infrared.

Characterization of 10 microns imaging system from measurements of Mercury transit n the solar disk

Germán Fernandez¹, C. Guillermo Gimenez de Castro², Rofolfo Godoy¹, Pierre Kaufmann^{2,3}, Amauri S. Kudaka², Hugo Levato¹, Rogério Marcon^{4,5}, Arline M. Melo^{2,3}, Adolfo Marun¹ e Pablo Pereyra¹

¹ Complejo Astronómico El Leoncito, San Juan, Argentina

² Centro de Rádio-Astronomia e Astrofisica Mackenzie- Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP

³ Centro de Componentes Semicondutores, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

⁴ Instituto de Física "Gleb Watagin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

⁵ Observatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, SP

Abstract. The transit of the planet Mercury across the solar disk was observed by the first time in the mid-infrared, 8-15 micron band (central frequency of 30 THz) on November 8, 2006. The optical setup, installed at a high mountain laboratory of the El Leoncito Astronomical Complex, in the Argentina Andes, utilized a Jensch Coelostat 300 (Zeiss Jena) for Sun tracking and a 105 mm Cassegrain mirror to produce a diffraction-limited photometric beam of 25 arcseconds recorded with a Wuhan Guide mid-infrared camera at a cadence of 30 frames per second. A frame grabber board was used to digitize and transfer the images to a PC and stored on a 250 Gbytes disk. Each image consists of 76800 pixels of 24 bits. Data were recorded and visualized using VCR software, with frame-to-frame analysis made with MaXim DL program. Nearly two hours of the Mercury transit were observed. No active region or peculiar solar disk structure was present on the disk, whose effects are being studied separately. The planet produced a temperature decrease of about 0.27 K on the camera. It was possible to infer a lower detection limit of less than 0.1 K, allowing to estimate the system noise equivalent power, NEP, which includes the uncooled bolometers, changes due to fluctuations in tracking and in refraction index. The system NEP figures obtained are compatible with values found for uncooled 10 micron band cameras, showing the good performance of the photometer and imaging system.

BLOQUEIO DE RADIAÇÃO TÉRMICA PARA SENSORES DE FONTES INTENSAS NO INFRAVERMELHO DISTANTE FAZENDO USO DE REFLETORES RUGOSOS

 ${\rm Rogério}\ {\rm Marcon}^{1,2}$, Mariano Kornberg 3 , Thomas ${\rm Rose}^4$, Pierre Kaufmann 5,1 , Arline Maria ${\rm Melo}^{5,1}$, Rodolfo Godoy 6 , Adolfo Marun 6 , Hugo Levato 6

- 1 UNICAMP
- 2 Observatório Solar Bernard Lyot (OSBL)
- 3 Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik
- 4 RPG Radiometer-Physics, Meckenheim
- 5 CRAAM/Mackenzie
- 6 Complejo Astronómico El Leoncito

Fotometria e imageamento no infravermelho distante de fontes intensas de radiação, como o disco solar, requerem a supressão da radiação térmica na faixa do visível e infravermelho próximo (comprimentos de onda inferiores 1 micron). Filtros fazendo uso de determinados materiais, ou com superfícies seletivas de freqüência fabricadas sobre substratos são possíveis, porem implicam em perdas que podem ser significativas e os materiais e substratos irão se aquecer. Experimentos espaciais voltados à fotometria da atividade solar no infravermelho distante e faixa THz estão sendo considerados. Destaca-se o Projeto DESIR (DEtection of Solar eruptive Infrared Radiation) em desenvolvimento pelo laboratório LESIA do Observatório de Paris/Meudon, com sensores para as bandas de 25-35 e 100-200 microns, para a plataforma francochinesa SMESE (SMall Explorer for the study of Solar Eruptions) com subsídios da agência CNES. O Projeto SIRA (Solar InfraRed Activity) recentemente submetido à FAPESP, considera experimento fotométrico solar centrado em 3 THz. Para atendimento dos requisitos de bloqueio de radiação térmica na entrada dos experimentos espaciais solares foi explorado o conceito da sua difusão por refletores rugosos. Foram fabricados protótipos de espelhos rugosos usando três processos: evaporação saturada de alumínio; micro-ranhuras em placa de alumínio e pintura de alumínio para altas temperaturas. A refletividade em função de freqüência foi testada no MPE, em Garching, Alemanha, e para a banda de 30 THz em função do ângulo de incidência testada em El Leoncito. Os resultados preliminares foram extremamente encorajadores, demonstrando a viabilidade deste conceito para uso em sensores solares para o infravermelho distante.

Anexos

CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA IMAGEADOR DE 10 MICRONS POR MEDIDAS DO TRÂNSITO DE MERCÚRIO SOBRE O DISCO SOLAR

Germán Fernandez¹, Carlos Guillermo Gimenez de Castro², Rofolfo Godoy¹, Pierre Kaufmann^{2,3}, Amauri Shossei Kudaka², Hugo Levato¹, Rogério Marcon^{3,4}, Arline Maria Melo^{2,3}, Adolfo Marun¹, Pablo Pereyra¹

1 - Complejo Astronomico El Leoncito (CASLEO)

2 - CRAAM/Mackenzie

3 - UNICAMP

4 - Observatório Solar Bernard Lyot (OSBL)

Transito do planeta Mercúrio sobre o disco solar foi pela primeira vez observado no infravermelho médio, banda de 8-15 microns (freqüência central de 30 THz) em 8 de novembro de 2006. Foi utilizada uma montagem ótica consistindo em celostato Jensch-Zeiss para rastreio solar seguido de sistema ótico projetado para produzir imagem do Sol em câmera Wuhan Guide para o infravermelho médio, instalados no laboratório de montanha El Leoncito, nos Andes Argentinos. A entrada incidiu em refletor cassegrain de 105 mm de diâmetro como objetiva, produzindo um feixe fotométrico de 25 segundos de arco. As medidas foram tomadas por placa captadora de imagens, à taxa de 30 quadros de 76800 pixels de 24 bits, armazenados em disco de 250 Gbytes. Os dados foram gravados e visualizados com software iuVCR, com análises quadro-a-quadro realizadas com software MaXim DL. Cerca de 2 horas de observações mostrando o movimento de Mercúrio sobre o disco do Sol foram obtidas. Nenhuma região ativa ou estrutura peculiar pronunciada estava presente no trajeto do trânsito do planeta sobre disco solar, cujos efeitos estão sendo estudados separadamente. O planeta produziu decréscimo de temperatura da ordem de 0.27 K na câmera. Foi possível inferir temperatura limite de detecção inferior a 0.1 K, o que permitiu estimar a potência de ruído equivalente do sistema (Noise Equivalent Power, NEP) do sistema (incluindo ruído dos bolometros não-refrigerados, variações causadas por flutuações em rastreio e índice de refração). Foram encontrados valores do NEP para o sistema compatíveis aos encontrados para câmeras não-refrigeradas, caracterizando-se o bom desempenho do sistema de fotometria e imageamento

NOVO SISTEMA ÓPTICO E PRIMEIRAS MEDIDAS DE ATIVIDADE SOLAR EM 10 MICRONS

<u>Arline Maria Melo</u>^{1,2}, Rogério Marcon², Pierre Kaufmann^{1,2}, Amauri Shossei Kudaka¹, Adolfo Marun³, Pablo Percyra³, Jean Pierre Raulin¹, Hugo Levato³ 1 - CRAAM/Mackenzie 2 - UNICAMP 3 - Complejo Astronômico El Leoncito

Resultados que vêm sendo obtidos com o Telescópio Solar Submilimétrico, SST, em 212 e 405 GHz indicaram a necessidade de estender medidas solares no infravermelho médio e distante para melhor caracterização dos espectros e

compreensão de fenômenos em regiões ativas e explosões.Um novo sistema para estas medidas foi desenvolvido para a região IV-médio do espectro, centrado em 30 THz, fazendo uso de uma câmera com uma matriz de microbolômetros em seu plano focal para a qual foi projetado um arranjo óptico composto de três espelhos, côncavo-convexo-côncavo que propicia um aumento da imagem solar projetada, atenua o brilho incidente no campo de visão da câmera (16x21 graus, obtido com lente de Ge), permitindo um ajuste afocal da imagem solar na matriz de sensores. As primeiras observações foram feitas no Observatório Bernard Lyot, Campinas, onde foram desenvolvidas técnicas para a caracterização da câmera e calibração das medidas em temperatura de brilho e fluxo. Observações subseqüentes foram realizadas no Complexo Astronômico de El Leoncito, San Juan, Argentina, onde o céu apresentou excelente qualidade de transparência para estas freqüências. Os primeiros resultados confirmaram a presença de "plage-like" regions, ao redor das manchas solares, previstas por Turon et al. (1970) e outros autores. A análise de imagens com taxa de 10 frames por segundo indicaram pela primeira vez a presença de eventos rápidos apresentados como regiões puntualmente brilhantes com duração aproximada de alguns segundos, com densidados de fluxo da ordem de milhares de SFU (1 SFU = 10-22 W/m2Hz) ocorridos durante eventos em Raios X moles de pequena intensidade detectados pelo GOES

PAINEL 146

A OCORRÊNCIA DE PULSAÇÕES SUBMILIMÉTRICAS E A EJEÇÃO DE MASSAS SOLARES

Mariana Nani Costa^{1,2}, Pierre Kaufmann^{1,2}, Arline Maria Melo^{1,2}, Pablo Pereyra³, Adolfo Marun³, Jean Pierre Raulin¹, Carlos Guillermo Giménez de Castro¹ 1 - CRAAM/Mackenzie 2 - UNICAMP

3 - CASLEO, Complejo Astronómico El Leoncito, San Juan, Argentina

As ejeções de massas coronais, CMEs, são os fenômenos solares mais energéticos. Os mecanismos físicos que os produzem não são bem conhecidos, motivando inúmeras pesquisas de cunho experimental e teórico. Por outro lado, esse fenômeno tem grande influência no clima espacial, pois quando atinge nosso planeta causa severos distúrbios abrangendo a alta e baixa atmosfera. Recentes observações utilizando o Telescópio Solar Submilimétrico (SST) mostraram exemplos de atividade submilimétrica pulsada correlacionada com o instante de lançamento dos CMEs. Com o objetivo de melhor compreender esta associação foi empreendido um estudo detalhado da incidência de eventos submilimétricos pulsados para a época outubro-novembro de 2003, quando houve uma alta ocorrência de eventos solares muito energéticos. As observações do SST em 212 e 405 GHz foram analisadas utilizando um índice de cintilações normalizado sobre dados de 40 ms amostrados a cada 3 s, possibilitando identificar o aparecimento de pulsações, sem exigir a exaustiva inspeção direta da ocorrência de pulsações de todos os dados. Para os períodos em que se dispunham de boas observações com o SST, foi investigada a ocorrência de ejeções de massa e de outros efeitos coronais, pela inspeção das imagens obtidas com os coronógrafos C2 e C3 do experimento LASCO a bordo do satélite SOHO. Quando identificadas, as posições das massas ejetadas foram extrapoladas à sua posição junto ao disco solar, definindo-se assim o seu respectivo instante de ejeção. Os primeiros resultados obtidos são apresentados, mostrando que a associação de pulsações submilimétricas são comuns durante os instantes iniciais dos CMEs. São analisadas as estruturas pulsadas, quanto à sua taxa de repetição, amplitude e, quando possível sua medida em 3 canais em 212 GHz, sua posição projetada no plano do ceú, fluxo e espectro.

Project and Construction of THz Metal Mesh Filters

Melo A. M., Bertolucci E. C., Zakia M. B., Kaufmann P., Silva A.M.P.A.

The increasing interest in infrared sensors and detection systems has been stimulating many developments of subsystems for this spectral region. In such systems the delimitation of the band width becomes crucial.

In the present work we will present the project, manufacture, simulation and some tests of metal mesh filters manufactured in the Center of Component Semiconductors, CCS-Unicamp and the National Laboratory of Light Synchrotron, LNLS, which will be connected to focal arrangements for applications in space science.

These filters had been projected for central frequencies of 405, 670, 850, 2000, 4000, 8500 GHz. The first three frequencies correspond to the last windows of the terrestrial atmosphere and the last three will be destined to space applications in satellites.

The project and manufacture of these filters in the CCS had passed for two phases. The first one using processes of lithography in films of Mylar for the frequencies of 405, 670 and 850 GHz (Arbex, C. J. N.). These filters had been tested partially in the Radiometer Physics, RPG, Germany (2003). The second and current phase extended the project for frequencies, up to 8,5 THz and made use of process of nickel electroplating in the National Laboratory of Light Sincrotron, LNLS, Campinas. These last developments were finished and will be sent for new complete tests in the RPG, Germany.
Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEAResumo Número:23 a 26 de outubro de 2006XXXXSão José dos Campos, SPXXX

A NEW SETUP FOR GROUND-BASED MEASUREMENTS OF SOLAR ACTIVITY AT 10 µm

<u>Melo, A. M.</u> [1,2]; Kaufmann, P. [1,2]; Kudaka A. S. [1]; Raulin, J.P. [1]; Marcon R. [3]; Marun, A. [4]; Pereyra, P. [4];

 [1] Center for Radio Astronomy and Astrophysics, CRAAM, Engineering School, Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, Brazil, kaufmann@craam.mackenzie.br
[2] Center for Semiconductor Components, Campinas State University, Campinas, Brazil.
[3] Physics Institute Gleb Wataghin, Campinas State University, Campinas, Brazil.
[4] El leoncito Astronomical Complex, San Juan, Argentina

ABSTRACT

Solar activity measurements in the far to mid IR range are receiving a renewed interest in order to complement recent results obtained at submm-waves. A new setup was developed to measure solar activity in the infrared spectral region centered at 10 μ (or 30 THz), coupled to a camera with focal plane array of uncooled microbolometers. An optical arrangement of concave-convex-concave mirrors magnifies and focus the full disc solar image to fit into the field of view of the camera. Techniques were developed to characterize the camera and to calibrate the measurements in brightness temperature and flux units. Test observations were made at Bernard Lyot Observatory, Campinas, Brazil, and continued at El Leoncito Astronomical Complex, San Juan, Argentina. The sky was found to be almost transparent at 10 µm at both sites. The first measurements of the solar disk confirmed the presence of quiescent bright ring "plage-like" regions around sunspots, and "disappearances" of sunspots coincident with soft X-rays small bursts. Mid-IR small flares were found consisting of multiple rapid brightenings (tens of seconds to several minutes) at different locations on the solar active regions in correspondence with soft X-ray bursts reported by GOES satellites. At 10 µm wavelength, some flare source sizes were found to be smaller than the diffraction limited photometric beam of 25", set by the objective 10.5 cm diameter. The intensities of such small Mid-IR flares were high and of the order of 8 - 14 10-19 W m-2 Hz-1 (or 8 -14 10⁴ solar flux units)

Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA 23 a 26 de outubro de 2006 São José dos Campos, SP Resumo Número: XXXX

SOLAR SUBMILLIMETER-WAVE PULSATIONS AND CORONAL MASS EJECTIONS (CME)

<u>Melo, A. M.</u> [1,2]; Costa, M. N. [1,3]; Cassiano, M. [1]; Kaufmann, P. [1,2]; Raulin, J.-P. [1]; Giménez de Castro, C. G. [1]; Pereyra, P. [4]; Marun, A. [4]

[1] Center for Radio Astronomy and Astrophysics, CRAAM, Engineering School, Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, Brazil, <u>armame@gmail.comr</u>

[2] Center for Semiconductor Components, Campinas State University, Campinas, Brazil.
[3] Physics Institute Gleb Wataghin, Campinas State University, Campinas, Brazil.
[4] El leoncito Astronomical Complex, San Juan, Argentina

RESUMO

The solar coronal mass ejections are considered the most energetic solar transient phenomenon. The physical processes at their origin are not known, which motivate both observational and theoretical researches. Moreover these plasma materials ejected from the Sun are the principal source of disturbances when they impact the Earth. Submillimeter recent observations using the Submm Solar Telescopes (SST) have shown successive spikes (pulsations) associated with the launching time of the CME's.

We have studied this association for the 2003 October-November period, when was observed one of the most energetic events in the 23rd solar cycle. SST observations obtained at 212 and 405 GHz were analyzed using a scintillation index to identify the pulsations presence within the whole data set. Days presenting good data conditions and low atmospheric opacity were selected when CMEs were observed with the C2 and C3 coronagraphs of LASCO.

The LASCO images were analyzed identifying the ejected mass positions with time allowing an estimate of the launch time at the solar disk.

The first results obtained will be presented in this work, showing the amplitude and occurrence rates of submm spikes as a function of time, and of particular interest at the time of the estimated CME launches. The properties of submm spikes were obtained using a peak-finder algorithm as well as a wavelet decomposition code.