

Luis Olavo de Toledo Fernandes

DESENVOLVIMENTO DE FOTÔMETROS THZ PARA Observação de Explosões Solares

Campinas 2013



Luis Olavo de Toledo Fernandes

DESENVOLVIMENTO DE FOTÔMETROS THZ PARA Observação de Explosões Solares

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart. Co-Orientador: Prof. Dr. Pierre Kaufmann.

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Luis Olavo de Toledo Fernandes e orientada pelo Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart.

Campinas 2013

Ficha catalográfica			
	Universidade Estadual de Campinas		
	Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura		
	Rose Meire da Silva - CRB 8/5974		
	Fernandes, Luis Olavo de Toledo, 1978-		
F391d	Desenvolvimento de fotômetros THz para observação de explosões solares /		
	Luis Olavo de Toledo Fernandes. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.		
	Orientador: Jacobus Willibrordus Swart.		
	Coorientador: Pierre Kaufmann.		
	Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.		
	1. Fotometria. 2. Radiômetria. 3. Tecnologia Terahertz. 4. Detectores. 5. Sol. I. Swart, Jacobus Willibrordus,1950 II. Kaufmann, Pierre. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.		
Informações para Biblioteca Digital			
Título em	inglês: Development of THz photometers for solar flare observation		
Palavras-chave em inglês:			
Photometry			
Detectors			
Sun			
Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica			
Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica			
Banca examinadora:			
Jacobus Willibrordus Swart [Orientador]			
José Alexandre Diniz			
Marcelo Luís Francisco Abbade			
Data de defesa: 10-04-2013			
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica			

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Luis Olavo de Toledo Fernandes

Data da Defesa: 10 de abril de 2013

Título da Tese: "Desenvolvimento de Fotômetros THz para Observação de Explosões Solares"

Mars bus U Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart (Presidente); Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade: le Prof. Dr. José Alexandre Diniz:

Dedico este trabalho aos meus pais, Hélio e Maria Regina, e aos meus irmãos Floriano e Ana Cândida, pelo suporte e paciência.

Agradecimentos

Agradeço a minha família, Maria Regina, Hélio, Ana Cândida, e Floriano Augusto pelo suporte e paciência.

Agradeço a todos os professores, pesquisadores, funcionários, e alunos do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie – CRAAM, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie – UPM, especialmente Prof. Dr. Pierre Kaufmann, que orientou meu caminho para conclusão deste projeto; e do Centro de Componentes Semicondutores – CCS, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, especialmente aos professores Dr. José Alexandre Diniz e Prof. Dr. Jacobus Willibrordus Swart, que acompanharam meus estudos desde o princípio deste projeto. Ao Prof. Dr. Marcelo Abbade, meu professor em diversas disciplinas durante a graduação no curso de Engenharia Elétrica no CEATEC da PUC-Campinas. A todos do Complexo Astronômico "El Leoncito", Observatório Solar "Bernard Lyot", e Laboratório Nacional de Luz Sincrotron – LNLS.

Agradeço as agencias financiadoras deste projeto: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Micro e Nanoeletrônicos INCT-NAMITEC, Fundo Mackenzie de Pesquisa – Mackpesquisa; Lebedev Physics Institute; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET; Air Force Office of Scientific Research – AFOSR.

"O cientista não estuda a natureza porque ela é útil; estuda-a porque se delicia com ela, e se delicia com ela porque ela é bela. Se a natureza não fosse bela, não valeira a pena conhecê-la, se não valesse a pena conhecê-la, não valeria a pena viver..." Henri Poincaré

Resumo

O telescópio solar submilimétrico operando nas frequências de 212 e 405 GHz detectou uma nova componente espectral das emissões de explosões solares, com máximo em algum ponto da faixa Terahertz, simultaneamente com a conhecida componente espectral em microondas, trazendo sérios desafios para interpretação. O diagnóstico deste tipo de emissão transiente em frequências THz traz desafios tecnológicos que são objetivo deste estudo. Este projeto consiste em um estudo das características de filtros e sensores não refrigerados para aplicação em projeto aeroespacial na faixa Terahertz do espectro eletromagnético. Foram estudados e caracterizados detectores bolométrico, piroelétrico, e optoacústico, precedidos por filtros passa-baixa que suprimem a radiação na faixa do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, filtros passa-banda centrados na frequência THz desejada, e modulador mecânico. O detector a célula de Golay mostrou ser o mais sensível. Foi selecionado para o protótipo de fotômetro THz que serviu para definir parâmetros de projeto para o modelo de voo, para observação solar fora da atmosfera terrestre, em balões estratosféricos, satélites, ou estações no solo com atmosfera excepcionalmente transparente. O sistema foi concebido para observar todo o disco solar e detectar pequenas variações relativas de temperatura causadas por explosões em regiões específicas do Sol. Obteve-se mínima detectabilidade de variações relativas de temperatura da ordem de 1 K com resolução temporal de subsegundo.

Palavras-chave: Fotometria, Radiometria, Tecnologia Terahertz, Detectores, Sol.

Abstract

The solar submillimeter-wave telescope, operating at 212 and 405 GHz frequencies detected a new flare spectral component emission, peaking in the THz range, simultaneously with the well known microwaves component, bringing challenging constrains for interpretation. The diagnostics of this kind of transient emission at THz frequencies also bring technical challenges, which are the subject of this study. The project consists in a study of the characteristics of filters and uncooled detectors for aerospace project application at THz range of the electromagnetic spectrum. Three types of uncooled sensors were tested: bolometric, pyroelectric, and optoacoustic, preceded by low-pass filters to suppress the visible and infrared radiation, band-pass filter centered at THz frequency, and a chopper. The Golay cell sensor was considered the most sensible detector of all, and was selected for the photometer prototype THz system to observe the Sun outside the terrestrial atmosphere on stratospheric balloons or satellites, or at exceptionally transparent ground stations. The system was designed to observe the whole solar disk detecting small relative changes in input temperature caused by flares at localized positions of the Sun. The minimum relative temperature variation detected was about 1 K with subsecond time resolution.

Keywords: Photometry, Radiometry, Terahertz Technology, Detectors, Sun.

Sumário

Lista de Figuras	xix
Lista de Abreviações	xxiii
Lista de Símbolos	xxvii
Lista de Tabelas	xxxi
Capítulo 1 - Fotometria THz no Contínuo	01
1.1 Introdução	01
1.2 Espectro Eletromagnético	
1.3 Definido a Radiação	
1.4 Espectro de Corpo Negro	
1.5 Medidas Δ T/T em Fundo Brilhante	10
Capítulo 2 - Caracterização de Filtros para Faixa THz	13
2.1 Filtro Passa-Baixa	13
2.1.1 Filtro por Difusão em Espelho Rugoso	
2.1.2 Filtros Passa-Baixa a Membrana	15
2.1.2.1 Zitex G110	15
2.1.2.2 TydexBlack	
2.2 Filtro Passa-Faixa	
2.2.1 Malha Metálica Ressonante	
Capítulo 3 - Caracterização de Detectores THz	25
3.1 Ruído de Sistemas Sensores	25
3.2 Figuras de Mérito	26
3.3 Tipos de Sensores	

3.3.1 Microbolômetros	
3.3.2 Sensor Piroelétrico	33
3.3.3 Sensor Optoacústico	36
3.4 Tabela resumo das características dos detectores	
3.5 Uso de Chopper	40
Capítulo 4 - Sistema Protótipo para Fotometria THz	43
4.1 Detecção de Fontes Pequenas em Campo Angular Extenso	43
4.2 Configuração de Fotômetro Protótipo para Testes	46
4.2.1 Tratamento Analógico de Dados	49
4.2.2 Tratamento Digital de Dados	52
4.2.2.1 Aquisição de Dados e Armazenamento	56
4.3 Sensibilidade do Experimento	59
Capítulo 5 - Projetos Presentes e Futuros	63
5.1 Fotometria Solar THz do Espaço	63
5.2 Experimento SOLAR-T	
5.3 Subsistemas para Aquisição de Dados e Telemetria	70
5.4 Planejamento de Voo	73
Capítulo 6 - Conclusões	75
Referências e Bibliografia	77
Apêndice A	
Anexo - Publicações	89

Lista de Figuras

Figura 1 - Espectro de algumas explosões solares conforme conhecidas no último século. Em laranja observa-se o comportamento típico e em preto o perfil "incomum" de algumas explosões, onde o fluxo de emissão aumenta com a frequência. Devido a falta de dispositivos THz, não existem observações de explosões solares nestas frequências.....2 Figura 2 - Em (a) o perfil temporal de uma explosão solar observada em 4 de novembro de 2003, em tempo universal por unidade de fluxo solar (SFU) nas frequências de 212 e 405 GHz. Em (b) uma ampliação com duração de 20 segundos, mostrando pulsações correlacionadas. Em (c) O espectro em frequência por SFU, mostrando a componente sub-THz. Em (d) o espectro para outra explosão, ocorrida em 6 de dezembro de 2006. A maior parte dos espectros nas medidas com o SST apresentam uma emissão em 405 GHz mais intensa que 212 GHz, predizendo Figura 3 - Absorção atmosférica para radiação em função da frequência. Para as frequências acima de 1 THz a atmosfera absorve a radiação, impossibilitando medidas a longas distâncias [ARMSTRONG; HAGEN, 2012].4 Figura 4 - Espectro eletromagnético. A faixa THz está compreendida entre infravermelho e as ondas de rádio / Figura 5 - Componente campo elétrico e magnético de uma onda eletromagnética. A direção de propagação é perpendicular aos campos elétrico e magnético.....7 Figura 6 - Espectro de corpo negro apresenta a radiância espectral em função de frequências e comprimentos de onda Figura 7 - Imagens monocromáticas do disco solar calmo no dia 13 de março de 2012. Em (a) comprimento de onda de 304 angstroms (ultravioleta) é possível observar ao lado direito superior os arcos magnéticos em uma região ativa. Em (b) é apresentada uma imagem do disco solar 4500 angstroms, que consiste em um comprimento de onda na faixa visível do espectro. Em (c), o magnetograma indica o polaridade do campo magnético em uma mancha solar/região ativa. E (d) apresenta uma imagem H-alpha que é uma emissão na linha do hidrogênio Figura 8 - Em (a) vemos uma imagem de uma região ativa no disco solar na faixa do infravermelho médio (10 µm -30 THz) gravada no dia 11 de Setembro de 2006. A imagem mostra uma mancha solar (escura) e regiões de praias (claro). Em (b) vemos magnetograma observado pelo National Solar Observatory. Em (c) uma imagem na linha de cálcio fornecida pelo Observatorie de Paris-Meudon [MARCON et al., 2008]......12 Figura 9 - Micrografias de espelho rugoso (a) E3, e (b) E10. Em (c), gráfico de resposta apresenta a refletância de 0 a 1,0, em função λ , comprimento de onda do sinal incidente em sua superfície. Para comprimentos de onda curtos, até Figura 10 - Transmitância da membrana Zitex G110 (a) aproximação para comprimentos de onda de 1 a 8 µm, (b) 1 Figura 11 - Resposta em porcentagem de transmissão para radiação incidente em função do comprimento de onda, (a) de 1 a 14 µm, (b) e 1 a 2000 µm, em (c) imagem do filtro TydexBlack em um anel de sustentação metálico...... 17 Figura 12 - Parâmetros do elemento de filtro passa-faixa malha metálica ressonante, utilizados em simulação com Figura 13 - Em (a) temos a simulação filtro passa-faixa malha metálica ressonante centrada em 2,4 THz utilizando software CST Microwave Studio, em (b) e (c) micrografias das malhas fabricadas no CCS - Unicamp e Laboratório Figura 14 - Medidas realizadas com FTIR da empresa Tydex Company em São Petersburgo para transmissão da malha metálica ressonante fabricada no CCS Unicamp e LNLS, em vermelho com malha suspensa, em azul acoplada com duas janela de TPX (polimetilpenteno), e em preto com adição de filtro passa-baixa à membrana TydexBlack.20

Figura 15 - A transmitância em % do filtro passa-faixa de malha metálica ressonante centrado em 2,4 THz para radiação incidente com malha suspensa em azul, e polarizada em ângulos de 0, 30, 60, e 90 graus para vermelho, Figura 16 - A transmitância em % do filtro passa-faixa de malha metálica ressonante centrado em 2.4 THz para radiação incidente com diferentes ângulos de incidência 0, 30, e 45 graus em azul, vermelho, e rosa, respectivamente, Figura 17 - Resultado das simulações no CST Microwave Studio para 3 e 7 THz. Em (a) temos os parâmetros de construção G, J, K, e H para a malha centrada em 3 THz. Em (b) apresenta a resposta espectral da malha centrada em Figura 19 - Gráficos de resposta medidas (a,b) e micrografias(c,d) da malha fabricada para 7 THz......24 Figura 20 - Em (a) o diagrama esquemático explodido da câmera infravermelha, com o chip de silício e demais componentes. Em (b) a matriz de pixels formados por bolômetros feitos com Si Policristalino [KRUSE, 2001].29 Figura 21 - Em (a) imagem da câmera que opera na faixa do infravermelho médio, em 10 µm, fabricada pela empresa canadense INO Company. Em (b) ilustração de pixel sensor membrana suspensa utilizado na câmera mostrada usada Figura 22 - Montagem realizada no Laboratório do CASLEO. Em (a) o desenho esquemático apresentando a disposição da câmera INO, com espelho côncavo e resistência simulando um corpo negro. Em (b) uma imagem da câmera infravermelho sem a lente de germânio fabricada com a janela do FPA de silício, e com filtro passa-baixa TydexBlack interposto. Em (c) uma imagem da resistência aquecida, e ao fundo o espelho côncavo alinhado para Figura 23 - Gráficos de resposta câmera infravermelha a microbolômetros para diferentes valores de temperatura. Em (a) observa-se a resposta da câmera para aumento de temperatura de 300 a 900°K, com resposta em leituras de conversão analógico para digital (ADC) fornecido pelo fabricante. São apresentadas 3 curvas: Livre sem nenhum tipo de filtro. Zitex G110 interposto e TydexBlack interposto. Em (b) ampliada apenas a resposta apenas com o filtro Figura 24 - Imagem do módulo detector piroelétrico fabricado pela empresa Spectrum Detector Inc. Em (a) uma Figura 25 - Em (a) o esquemático da montagem realizada no CRRAM, com a resistência de níquel-cromo irradiando potência no detector piroelétrico, precedido por filtros passa-baixa e passa-faixa. Em (b) uma imagem do Figura 26 - Gráficos de resposta detector piroelétrico para diferentes valores de temperatura. Em (a) observa-se a resposta do detector para aumento de temperatura de 350 a 700°K, com resposta em milivolts na saída do módulo. Igualmente feito no detector bolométrico, são apresentadas 3 curvas: Livre sem nenhum tipo de filtro, com filtros Zitex G110 e TydexBlack. Em (b) ampliada a resposta com filtro Zitex G110 e TydexBlack e em (c) apenas com o Figura 27 - Do lado esquerdo (a) a imagem do detector célula de Golay fabricada pela empresa russa Tydex Company. Em (b) o diagrama esquemático da câmara que produz a resposta ao efeito optoacústico, descrito no texto. 37 Figura 28 - Montagem para medidas com o sensor célula de Golay, realizada no laboratório da Tydex Company. Figura 29 - Gráficos de resposta para o sensor célula de Golay para diferentes valores de temperatura realizadas no laboratório da Tydex. Em (a) observa-se a resposta direta do detector para aumento de temperatura de 50 a 800° C, com resposta em milivolts na saída do dispositivo. Semelhante as medidas feitas com os outros detectores, em (b) a resposta utilizando o filtro a membrana TydexBlack bloqueando comprimentos de onda inferiores a 20 µm, e em (c) Figura 31 - Imagem do modulador mecânico ou chopper ressonante a diapasão fabricado pela Electro-optical Figura 32 - Esquema óptico desenvolvido para obtenção de sensibilidade suficiente para detectar pequenas variações de radiação, em dimensões angulares pequenas, em campos extensos [MARCON, KAUFMAN, 2011]......45 Figura 33 - Esquema do protótipo montado no CCS - Unicamp. Em (a) temos a montagem da fonte emissora de radiação para simulação de aumento abrupto de temperatura, juntamente como o protótipo do radiômetro THz. Em

(b) a fonte de radiação de corpo negro da Newport, que produz uma rampa de subida lenta, porém constante e com Figura 34 - Montagem no Laboratório do Centro de Componentes Semicondutores para teste de resposta com o telescópio Newtoniano com 76 mm de diâmetro para variações de temperatura do Sol artificial. (I) Fonte de corpo negro Newport modelo Oriel 67000 com roda para selecionar a janela diafragma de saída colocada no foco do (II) espelho côncavo 15 cm de diâmetro, que reflete um feixe plano paralelo ao (III) espelho plano com superfície rugosa (E10) colocado a 45 ° de inclinação. Este direciona a radiação ao (IV) telescópio Newtoniano com 76 mm, com foco na (VIII) célula de Golay, precedido por um (V) chopper tunning fork a 20 Hz, (VI) filtro passa- faixa de malha metálica ressonante centrado em 2 THz, e (VII) filtro passa-baixa a membrana Tydex Black. A saída do módulo Figura 35 - Filtro passa-baixa simulado em PSpice e posteriormente construído para excluir componentes de alta Figura 36 - Circuito simulado no PSpice contendo amplificadores operacionais de baixo ruído (OP27e). Em seguida o sinal é retificado, e por fim integrado em 200 milisegundos. Um buffer também foi utilizado para conectar e isolar Figura 37 - Em (a) está apresentada uma imagem do circuito completo, contendo filtro / amplificador / retificador / integrador montado no CRAAM - Mackenzie, (b) construído em placa de circuito impresso no CCS - Unicamp para Figura 38 - Resposta do sensor célula de Golay, a temperatura de entrada para diferentes valores de amplificação no circuito analógico. Em (a) utilizamos uma amplificação de 50 vezes, obtendo uma variação de 27 µV / Kelvin. Em Figura 39 - Programação em blocos com Software LabView para leitura digital dos dados fornecidos pela célula de Golay. Item I apresenta configuração da entrada analógica e conversão para sinal digital. Item II apresenta um filtro passa faixa do sinal de entrada em 20 Hz. Em III está a captura dos dados. Em IV uma integração do dado de Figura 40 - Modelo para tela no microcomputador com as janelas para os gráficos de saída. Janelas com sinais analógicos capturados diretamente da célula de Golay, posteriormente tratados digitalmente, e sinais filtrados, Figura 41 - Protótipo do experimento SOLAR-T, com a fonte de emissão de corpo negro e sistema óptico em (I), e Figura 42 - Dados originais obtidos com taxa de 10 amostras por segundo (a) durante rampa de subida de temperatura previamente estabelecida no corpo negro. Média corrida com 10 pontos (b) e média corrida com 100 Figura 43 - Módulo conversor A/D Tydex USB utilizado com software Golay Cell Frontend para leitura e aquisição Figura 44 - Software Golay Cell Frontend. Em (a) apresenta a forma de onda na saída do detector com parâmetros para leitura. Em (b) o espectro de Fourier do sinal modulado com a componente em 20 Hz, para cada 128 pontos. .58 Figura 45 - Estatística de Allan. Gráfico resultante do desvio de Allan, que é a raiz quadrada da variância de Allan Figura 46 - Projeto de fotômetro operando em 3 e 7 THz para observação solar em plataforma estratosférica (a). Óptica Cassegrain, com espelho primário rugoso, janelas de TPX, chopper, malha metálica ressonante e membrana Figura 47 - Princípio para radiação incidente no sensor, passando pelo telescópio com superfície primária desbastada, janelas de TPX, modulador mecânico, filtro passa- faixa de malha metálica ressonante centrada em 3 ou 7 THz, e Figura 48 - Os dois telescópios Cassegrain com 76 mm de diâmetro fabricados no Observatório Solar "Bernard Figura 49 - Protótipo radiômetro THz utilizando os telescópios Cassegrain, montados para receber a radiação emitida pela corpo negro Newport Oriel 67000. Em (I) está mostrado o corpo negro Newport, em (II) uma coroa para selecionar o diâmetro de abertura do corpo negro, (III) o espelho côncavo com 15 cm de diâmetro, (IV) o telescópio Figura 50 - Gráfico de resposta para telescópio com espelho primário rugoso. As medidas tomadas com a montagem Figura 51 - Transmitância dos filtros conjuntos combinados em vermelho para 3 THz (100 µm) e azul para 7 THz

Figura 52 - Caixa selada SOLAR - T fabricada pela empresa Tydex Company em São Petersburgo na Rússia. Em (a) vista interna da caixa com dois sensores célula de Golay instalados, juntamente com módulo de leitura dos detectores, hardware para aquisição de dados, telescópios Cassegrain, resistência para aquecimento/termalização da caixa, e isolamento interno e externo. Em (b) uma vista traseira da caixa com as conexões para entrada/saída de sinais, comandos, e alimentação elétrica. Em (c) uma vista lateral com chapa metálica para troca de calor com ambiente externo. Em (d) detalhe do telescópio Cassegrain instalado, com refletor primário branco ao fundo e secundário suspenso no suporte. Em (d) o equipamento em câmara de vácuo para teste de pressão (1000 hPa) e baixa Figura 53 - Projeto da empresa Propertech para realizar a aquisição e armazenamento dos dados, comunicação com telemetria, regulagem de tensão provida pelo experimento de Berkeley, GPS, relógio, e dados auxiliares, como Figura 54 - Diagrama rede Iridium. O modem Iridium integrado a um circuito eletrônico e a rede de dados até o computador de controle da missão. São os dois modems na saída do sistema integrado mostrado em blocos na figura Figura 55 - Tela de apresentação no computador de base da missão com o software para controle da missão que deverá receber todas as informações geradas pelo SOLAR – T. No gráfico em (a) está apresentado o espectro, centrado em 20 Hz. Em (b) a localização espacial do SOLAR-T utilizando GPS. Em (c) a resposta do sensor para variações de temperatura, ainda não calibrado......72 Figura 56 - Experimento SOLAR – T com sistemas de aquisição de dados e telemetria......73

Lista de Abreviações

AFOSR – Air Force Office of Scientific Research.

Au – ouro.

A/D – conversor analógico-digital.

ADC – analog to digital counts.

CASLEO – Complejo Astronomico El Leoncito.

CCS – Centro de Componentes Semicondutores.

CEATEC - Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia.

CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

CPU – Central Processing Unit.

CRAAM – Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie.

CST – Computer Simulation Technology.

CTI - Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer.

C# - C Sharp.

DC – Direct Current.

DESIR – DEtection of Solar Infrared Radiation.

DSIF - Departamento de Semicondutores Instrumentos e Fotônica.

EPOC – Electro-optical Products Corporation.

EUA – Estados Unidos da América.

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

FEEC – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

FET Dual – Field Effect Transistor duplo.

FIRE – Flare InfraRed Experiment.

- FTIR Fourier Transform Infrared Spectroscopy.
- FTR Fourier Transform Spectroscopy.
- GHz Gigahertz.
- GOES Geostationary Operational Environmental Satellite.
- GPS Global Positioning System.

GRIPS – Gama-ray Imager/Polarimeter for Solar flares.

H-alpha – *Hydrogen Alpha*.

HIDAD – High Density Array Development.

HRFZ - Si – High Resistance Floating Zone Silicon.

INCT – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia.

INCT-NAMITEC – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Micro e Nanoeletrônicos.

LNLS - Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.

Mackpesquisa – Fundo Mackenzie de Pesquisa.

NAMITEC – Tecnologias de Micro e Nanoeletrônica para Sistemas Integrados Inteligentes.

NASA – National Air and Space Administration.

NEP – Noise Equivalent Power.

OSBL – Observatório Solar "Bernanrd Lyot'.

- OVSA Owens Valley Solar Array.
- PACS Photodetector Array Camera and Spectromter.
- PLL *phased-lock loop*.
- RC *Resistance/Capacitance*.
- RSTN Radio Solar Telescope Network.

r.m.s. – root mean square.

SBD – Short Burst Data.

SDO – Solar Dynamic Observatory.

SFU – Solar Flux Unit.

Si – Silício.

SIRE – Solar InfraRed Experiment.

SOFIA – Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy.

SST – Solar Submilimeter-wave Telescope.

THz – Terahertz.

Ti – titânio.

TPX – Polimetilpenteno.

Unicamp – Universidade Estadual de Campinas.

US – United States.

USB – Universal Serial Bus.

UT – Universal time.

Lista de Símbolos

E = energia [erg]

h = constante de Planck $[m^2 kg/s]$

v = frequência [Hz]

c = velocidade da onda eletromagnética [m/s]

 λ = comprimento de onda [m]

P = vetor de Poynting [W m⁻²]

E = vetor campo elétrico [V m⁻¹]

H = vetor campo magnético [A m⁻¹]

B (θ , ϕ) = brilhância radioelétrica [W m⁻² Hz⁻¹ sr⁻¹]

k = constante de Boltzmann [W m⁻² K⁻⁴]

 $T_{b}(\theta, \phi)$ = temperatura de brilhância na fonte [K]

S = densidade de fluxo [W m⁻² Hz⁻¹]

 $T_s(\theta, \phi)$ = temperatura equivalente de ruído na entrada [K]

 Ω = elemento de ângulo sólido [sr]

f = frequência [Hz]

T = temperatura corpo negro [K]

 B_{f} = irradiância [W m⁻² sr⁻¹ Hz⁻¹]

f_{max} = frequência máxima [Hz]

T = temperatura corpo negro [K]

h = constante de Plank [m² kg/s]

 σ = desvio padrão da rugosidade de superfície

m = valor médio quadrático da envoltória do perfil da superfície

 $\Delta \theta$ = ângulo de aceitação instrumental

R = responsividade [V/W]

Vs = tensão de saída [V]

Po = potência incidente [W/cm²]

P_N = potência equivalente de ruído (NEP) [W/Hz^{1/2}]

V_N = nível de tensão do ruído r.m.s. [V]

 D^* = detectividade [cm H^{1/2}/W]

AD = área do sensor [cm²]

B = largura de banda [Hz]

V_N = nível de tensão do ruído r.m.s. [V]

Vs = tensão de saída [V]

Ts = temperatura do sinal [K]

T_B = temperatura de fundo [K]

 τ = tempo de resposta [s]

C = capacidade térmica [J/K]

G = condutância térmica [W/K]

d = diâmetro da imagem formada [m]

f = distância focal [m]

 θ = tamanho angular do objeto [graus]

 $G(\delta, \varphi)$ = ganho de potência do telescópio

W(potencia de saída) = potencia de saída [W]

W(potencia de entrada) = potencia de entrada [W]

A_e = abertura de área efetiva [m²]

 (δ, φ) = ângulos da fonte externa em relação ao eixo perpendicular à abertura [°]

 φ_0 = angulo entre primeiros zeros da função de Bessel

D = diâmetro da abertura [m]

 ΔS = densidade de excesso de fluxo [W m⁻² Hz⁻¹]

 ΔT = excesso de temperatura [K]

 Δf = banda de frequência [Hz]

 Ω = elemento de ângulo sólido [Sr]

 Ω_A = elemento de ângulo sólido [Sr]

 ϕ_{HPBW} = ângulo do ganho de meia potência [graus]

μm – micrometros.

 μ V – microvolts.

r.p.m. – rotações por minuto.

° - graus.

A – Ampere.

Å – angstrom.

cm² – centímetros quadrados

hPa – hectopascal.

mm – milímetros.

tan – tangente.

THz – Terahertz.

Tabelas

•

Tabela 1 - Valores de radiância em [W/m²/sr] para diferentes valores de temperatura e banda passante. Para 3 e 7 THz utilizou-se banda passante de 10 % em torno da frequência central. Tabela 2 - Especificação técnica fornecida pelo fabricante dos três detectores caracterizados.

Capítulo 1

Fotometria THz no Contínuo

1.1 Introdução

A faixa de frequência THz (terahertz) está localizada na região espectral arbitrada como sendo de 0,1 a 10 THz (3 mm - 30 μm, ou 3 cm⁻¹ - 300 cm⁻¹), entre as faixas de micro-ondas e do infravermelho médio no espectro eletromagnético. Tecnologias para fotometria e imageamento na faixa THz estão em pleno desenvolvimento e possuem uma variedade de aplicações em diferentes áreas, civis, médicas, e militares. Quando comparada com a faixa de frequências na região visível ao olho humano e as ondas do infravermelho próximo, a radiação THz pode penetrar melhor em: material orgânico, roupas, fumaça, nevoeiros, poeira, e produtos de papel [HARRIS, 1999; SIEGEL, 2003; MLYNCZAK et al., 2003].

Sensoriamento na região THz de frequências está provando ser uma maneira muito útil para determinar a característica de materiais, na procura por drogas, minas, e materiais explosivos. Aplicações para formação de imagem THz em biologia e medicina estão em pleno progresso. Aplicações aeroespaciais para sensoriamento remoto THz incluem determinações de inomogeneidades atmosféricas e caracterização de nuvens [STRABALA, ACKERMAN, MENZEL, 1994; SHERWIN, SCHMUTTENMAER, BUCKSBAUM, 2004; KINCH, 2007].

Fotometria consiste em medir a contagem total de fótons recebidos, produzidos por uma fonte remota, considerando o total ou apenas o excesso de emissão sem definição espacial. Para realização de imageamento são utilizados múltiplos sensores geralmente dispostos em linhas e colunas acoplados a uma ótica para a formação de uma imagem no plano focal destes sensores. Posteriormente é realizado um tratamento dos dados reconstruindo a imagem.

Fotometria e imageamento na faixa THz apresenta aplicações importantes no diagnóstico de radiação produzida por elétrons de alta energia, observado tanto em aceleradores de laboratório [WILLIAMS, 2002], como plasma espacial térmico e não térmico [KAUFMANN, RAULIN, 2006; KLOPF, 2008]. Explosões solares aceleram elétrons para altas energias. Sua radiação por mecanismo síncrotron prediz fluxos intensos em frequências THz ou infravermelho distante [KAUFMANN et al., 2004]. A figura 1 apresenta o espectro de algumas medidas de explosões solares, onde o fluxo de emissão aumenta com a frequência [KAUFMANN, 1996].



Figura 1 - Espectro de algumas explosões solares conforme conhecidas no último século. Em laranja observa-se o comportamento típico e em preto o perfil "incomum" de algumas explosões, onde o fluxo de emissão aumenta com a frequência. Devido a falta de dispositivos THz, não existem observações de explosões solares nestas frequências.

O telescópio solar submilimétrico (Solar Submillimeter-wave Telescope - SST) operando em 212 e 405 GHz nos Andes argentinos, propiciou a descoberta de uma nova componente espectral durante as explosões solares, exibindo um aumento no fluxo nestas frequências, separadamente da componente de microondas já conhecida (figura 2). O estudo da atividade solar nestas faixas de frequência, juntamente com outra frequências na faixa terahertz, fornecerá informações para uma melhor compreensão dos mecanismos de emissão pelo processo de aceleração de partículas de alta energia. O conhecimento contínuo do espectro é essencial para diagnosticar a componente de emissão encontrada nesta faixa de frequência. Esta componente pode ser a evidência de emissão sincrotrônica de elétrons de alta energia com pico em alguma região do infravermelho distante [KAUFMANN et al., 2004; MARCON et al, 2012].



Figura 2 - Em (a) o perfil temporal de uma explosão solar observada em 4 de novembro de 2003, em tempo universal por unidade de fluxo solar (SFU) nas frequências de 212 e 405 GHz. Em (b) uma ampliação com duração de 20 segundos, mostrando pulsações correlacionadas. Em (c) O espectro em frequência por SFU, mostrando a componente sub-THz. Em (d) o espectro para outra explosão, ocorrida em 6 de dezembro de 2006. A maior parte dos espectros nas medidas com o SST apresentam uma emissão em 405 GHz mais intensa que 212 GHz, predizendo fluxos mais intensos na faixa THz.

Conforme apresentado na figura 3, a atmosfera terrestre absorve praticamente toda radiação THz. Para detecção de emissão de radiação THz do Sol ou do espaço, o dispositivo sensor precisa ser levado para fora da atmosfera terrestre, a qual é opaca nesta faixa do espectro. Um número de experimentos espaciais foi considerado para medidas de explosões solares no infravermelho distante (assim como Projeto SIRE (Solar InfraRed Experiment) [DEMING, KOSTIUK, e GLENAR, 1991]; Projeto FIRE (Flare InfraRed Experiment) [KAUFMANN et al., 1998]; Projeto DESIR (DEtection of Solar Flare Radiation) [VIAL et al., 2007]). Dificuldades de financiamento impediram estas iniciativas de serem concluídas, apesar das boas revisões e oportunidades consideradas.



Figura 3 - Absorção atmosférica para radiação em função da frequência. Para as frequências acima de 1 THz a atmosfera absorve a radiação, impossibilitando medidas a longas distâncias [ARMSTRONG; HAGEN, 2012].
A medida de radiação THz acima da troposfera traz uma série de desafios experimentais consideráveis. Primeiramente a escolha de dispositivo sensor para operação na faixa THz com tamanho e peso reduzido, funcionamento a temperatura ambiente, sensibilidade para detecção de pequenas explosões solares, aquisição de dados em alta cadência, com redundância a falhas, e armazenamento das informações a bordo e envio das informações coletadas para um computador de base da missão.

Em anos recentes, para o estudo de explosões solares na faixa THz foi necessário o desenvolvimento de sensores e filtros para operação nestas frequências. Problemas técnicos como, responsividade, potência equivalente de ruído, sensibilidade, cadência, tempo de resposta, foram estudados com sensoriamento do infravermelho médio (10 µm - 30 THz) utilizando um detector bolométrico sem refrigeração. [MELO et al., 2004].

Para THz, foram investigados novas soluções, outros sensores: bolométrico, piroelétrico e optoacústico. Apresentamos aqui o desempenho e comparação entre 3 tipos de sensores não refrigerados para resposta de um corpo negro emitindo radiação THz [KAUFMANN et al., 2010a; FERNANDES et al., 2011].

A primeira observação solar de alta cadência em infravermelho médio, 30 THz, com base no solo foram feitas com sucesso em El Leoncito Andes argentinos, utilizando câmeras de infravermelho comerciais, com microbolometros, para observação solar. Os primeiros resultados mostraram a presença de praias no disco solar em infravermelho médio relacionadas com linhas de cálcio e magnetogramas, e a ocorrência de abrilhantamentos rápidos (segundos) durante pequenas erupções solares em raios-X moles [MELO et al., 2006; MARCON et al., 2008; CASSIANO et al., 2010].

Novas possibilidades técnicas, tais como opções de sensores, filtros, e materiais, foram exploradas levando à construção de um protótipo de fotômetro THz, aplicadas a um novo conceito de projeto que será descrito neste trabalho, com sensibilidade para fluxo moderado de explosões solares. Os principais resultados destas pesquisas e desenvolvimentos estão descritos a seguir.

Estas pesquisas e desenvolvimentos resultaram de um esforço conjunto entre as instituições: Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia, Centro de Radio Astronomia e Astrofísica Mackenzie – CRAAM, São Paulo; Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Centro de Componentes Semicondutores – CCS, Campinas; Observatório Solar "Bernard Lyot" – OSBL, Campinas; e Complexo Astronômico El Leoncito – CASLEO, Argentina. Os desenvolvimentos foram parcialmente financiados por agências: brasileiras Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Micro e Nanoeletrônicos INCT-NAMITEC, Fundo Mackenzie de Pesquisa – Mackpesquisa; russa Lebedev Physics Institute; argentina Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET; e norte americana Air Force Office of Scientific Research – AFOSR. O SOLAR-T, experimento fotômetros THz a dupla frequência está sendo financiado pela FAPESP.

1.2 Espectro Eletromagnético

O bem conhecido espectro eletromagnético é apresentado na figura 4. Compreende a todas as frequências de radiação, classificadas de acordo com o comprimento das ondas: longas, ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, raios ultravioletas, raios x, e raios gama.

	Compri	imento de onda [m	etros]		
$0^8 \ 10^7 \ 10^6 \ 10^5 \ 10^4$	$10^3 \ 10^2 \ 10 \ 1 \ 10^{-1} \ 10$	$^{-2}$ 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁵	6 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹ 1	$0^{-10} 10^{-11} 10^{-12} 1$	0-13 10-14 10-15 10-16
Ondas Longas	Ondas de Rádio	Infravermelho	Ultravioleta	Raios X	Raios Gama
$10 \ 10^2 \ 10^3 \ 10^4 \ 1$	$10^5 \ 10^6 \ 10^7 \ 10^8 \ 10^9 \ 10^{10}$	$10^{11} \ 10^{12} \ 10^{13} \ 10^{14}$	$10^{15} 10^{16} 10^{17} 10^{18}$	$^{8} 10^{19} 10^{20} 10^{2}$	$1 \ 10^{22} \ 10^{23} \ 10^{24}$
	Hard Contraction of the Party o	Frequência [Hertz]			

Figura 4 - Espectro eletromagnético. A faixa THz está compreendida entre infravermelho e as ondas de rádio / micro-ondas.

As ondas eletromagnéticas consistem na oscilação em fase dos campos elétrico e magnético ortogonais, que se propagam pelo espaço. Apresentado na figura 5, estes campos fazem parte da onda eletromagnética, com direção de propagação perpendicular aos campos que a constituem.



Figura 5 - Componente campo elétrico e magnético de uma onda eletromagnética. A direção de propagação é perpendicular aos campos elétrico e magnético.

Em 1873, James Clerk Maxwell fez a previsão da existência das ondas eletromagnéticas e calculou a velocidade de propagação, posteriormente confirmada experimentalmente por Heinrich Hertz que mostrou que as ondas de rádio também são ondas eletromagnéticas.

Entretanto, a natureza ondulatória da luz não é suficiente para explicar os diversos efeitos associados com a emissão e absorção da luz, que revelam comportamentos de natureza corpuscular, no sentido de que a energia transportada pela onda luminosa é concentrada em pacotes discretos conhecidos como fótons ou quanta, constante para cada ciclo de onda. A energia de um fóton é calculada de acordo com a equação proposta por Albert Einstein em 1905 [SWART, 2009, e referências citadas]:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad [J] \tag{1}$$

onde E é a energia, h a constante de Planck, v a frequência, c a velocidade da onda eletromagnética, e λ o comprimento de onda.

A potência transportada por uma onda eletromagnética é descrita pelo vetor de Poynting instantâneo, dada pelo produto vetorial na equação entre o campo elétrico e campo magnético [KAUFMANN, 1976, e referências citadas]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \Lambda \mathbf{H} \quad [W \, \mathrm{m}^{-2}] \tag{2}$$

onde P é o vetor de Poynting, E o vetor campo elétrico, e H o vetor campo magnético.

1.3 Definindo a radiação

O sensoriamento passivo de radiação de um objeto no espaço compreende a um ângulo sólido Ω (sr) subentendido pela fonte, e a sua temperatura de brilho equivalente T (K). Os parâmetros da radiação recebida derivados da lei de Planck descrevem a radiação de corpo negro [KRAUS, 1986]. A brilhância radioelétrica é a intensidade da radiação eletromagnética recebida em banda de frequência sobre um angulo sólido:

- Brilhância radioelétrica:

$$B(\theta, \phi) = \frac{2 k T_{b}(\theta, \phi)}{\lambda^{2}} \quad [W m^{-2} Hz^{-1} sr^{-1}]$$
(3)

onde B (θ , ϕ) é a brilhância radioelétrica, k a constante de Boltzmann, T_b (θ , ϕ) a temperatura de brilhância na fonte.

- Densidade de fluxo:

$$S = \left(\frac{2 k}{\lambda^2}\right) \int \int T_s(\theta, \phi) d\Omega \quad [W m^{-2} Hz^{-1}]$$
(4)

onde S é a densidade de fluxo, T_s (θ , ϕ) a temperatura equivalente de ruído na entrada, e Ω o elemento de ângulo sólido.

A radiometria é definida como a detecção de radiação eletromagnética cuja potência é definida em termos de temperatura equivalente, numa frequência f, e banda passante Δf . Podese observar também a direção, polarização, e espectro.

1.4 Espectro de corpo negro

Um corpo negro possui uma irradiância espectral determinada pelo seu comprimento de onda e temperatura, conforme lei de Planck apresentada pela fórmula:

$$B_{f} = \left[\frac{(2 h f^{3})}{c^{2}}\right] \left\{\frac{1}{\left[\exp\left(\frac{h f}{k t}\right) - 1\right]}\right\} \quad \left[W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}\right]$$
(5)

onde B_f é a irradiância, h a constante de Planck, f a frequência, e a T a temperatura corpo negro. A figura 6 apresenta esta lei para diferentes temperaturas de corpo negro.

A frequência ou comprimento de onda para uma radiância espectral máxima em uma determinada temperatura está ilustrada na figura 6, e é dada pela Lei de Wien:

$$\lambda_{\max} = \frac{(b)}{T} \quad [m] \tag{6}$$

onde λ_{\max} é o comprimento de onda onde a radiância espectral é máxima , b é a constante de proporcionalidade ou constante de dispersão de Wien.



Figura 6 - Espectro de corpo negro apresenta a radiância espectral em função de frequências e comprimentos de onda para diferentes temperaturas.

1.5 Medidas $\Delta T/T$ em fundo brilhante

O disco solar, apresentado na figura 7 em diferentes comprimentos de onda, emite radiação em todas as frequências do espectro eletromagnético. As regiões ativas são conjuntos composto de manchas solares e praias, com campos magnéticos intensos onde se produzem as explosões solares, correspondente a um aumento repentino da radiação emitida pelo Sol. Este projeto foi desenvolvido para medir o excesso de fluxo emitido no contínuo durante as explosões solares com sensibilidade suficiente, em comparação com a radiação de fundo.



Figura 7 - Imagens monocromáticas do disco solar calmo no dia 13 de março de 2012. Em (a) comprimento de onda de 304 angstroms (ultravioleta) é possível observar ao lado direito superior os arcos magnéticos em uma região ativa. Em (b) é apresentada uma imagem do disco solar 4500 angstroms, que consiste em um comprimento de onda na faixa visível do espectro. Em (c), o magnetograma indica o polaridade do campo magnético em uma mancha solar/região ativa. E (d) apresenta uma imagem H-alpha que é uma emissão na linha do hidrogênio [SOLARMONITOR, 2013].

Define-se de "Sol calmo" ou "quiescente", o regime em que não estão ocorrendo as explosões solares. É bem conhecido que a radiação emitida pelo Sol calmo apresenta um espectro equivalente ao de um corpo negro com temperatura aproximada entre 5000 e 6000 Kelvin [GEZARI, JOYCE, SIMON, 1973]. Grande parte desta potência irradiada está contida nas faixas de frequência do espectro eletromagnético que compreendem a região do visível (entre 400 e 750 THz, ou 700 e 400 nm) e do infravermelho próximo (aproximadamente entre 400 e 375 THz, ou seja 0,75 e 8 µm).

Os cálculos apresentados na tabela 1, o Sol como um corpo negro com temperatura de 5000 graus Kelvin, segundo a lei de Planck, emite 99,986 % do total, de toda radiação em comprimentos de onda inferiores a 20 μ m (ou frequências acima de 15 THz). Esta grande porcentagem de emitida dificulta a medida de pequenos excessos de temperatura em frequências entre 1 e 10 THz.

Radiância	100 °K	1000 °K	5000 °K	10000 °K
0,001 - 1x10^5 μm	1,8049	18049,8	1,12x10^7	1,80x10^8
0 - 20 μm	0,12	17789	1,12x10^7	1,80x10^8
7 THz (42,9 μm)	0,25	17,74	101,99	207,49
3 THz (100,0 μm)	0,074	1,54	8,19	16,48

Tabela 1 - Valores de radiância em [W/m²/sr] para diferentes valores de temperatura e banda passante. Para 3 e 7 THz utilizou-se banda passante de 10 % em torno da frequência central, calculados a partir da equação de radiação de corpo negro de Planck (5), utilizando um dos algoritmos para cálculo disponíveis (http://www.spectralcalc.com/blackbody_calculator/).

Fotometria e imageamento THz no contínuo sobre o disco solar exige cuidados para a completa supressão da componente do espectro na faixa do visível e infravermelho próximo, que são comparativamente muito mais intensas. Os excessos de temperatura a serem detectados ΔT são muito inferiores ao "*background*", o que acarreta necessários cuidados tecnológicos para sua detecção. Isto pode ser conseguido com o uso de uma série de filtros passa-baixa [KAUFMANN et al.,2009], que consistem em uma combinação de espelhos com superfície rugosa [BENNETT, PORTEUS, 1961; KOSTIUK, DEMING, 1991; KORNBERG, 2008] e

membranas comercialmente disponíveis [BENFORD, GAIDIS, KOOI, 2003; TYDEX, 2008]. Em simulações, a radiação emitida pelo Sol calmo após a utilização de filtros passa baixa e passafaixa THz, com banda lateral de 10 % da frequência central, é inferior a 0,0001 % da radiação total emitida. Este nível representa a contribuição de fundo do disco solar sobre o excesso de emissão detectável. Este estudo procura melhorar soluções técnicas para filtros e sensores que permitam a detecção destes pequenos contrastes.



Figura 8 - Em (a) vemos uma imagem de uma região ativa no disco solar na faixa do infravermelho médio (10 µm - 30 THz) gravada no dia 11 de Setembro de 2006. A imagem mostra uma mancha solar (escura) e regiões de praias (claro). Em (b) vemos magnetograma observado pelo National Solar Observatory. Em (c) uma imagem na linha de cálcio fornecida pelo Observatorie de Paris-Meudon [MARCON et al., 2008].

A figura 8 ilustra a obtenção de imagem da região solar ativa de 30 THz, bem contrastada, e sua comparação com magnetograma e linha de cálcio [MARCON et al., 2008].

Capítulo 2

Caracterização de Filtros Para Faixa THz

2.1 Filtros passa-baixa

Filtros passa-baixa THz são fabricados para transmitir radiação THz e bloquear comprimentos de onda menores. Filtros passa-faixa THz, são utilizados para selecionar a frequência exata na faixa THz do espectro. Existem diversos tipos de filtros, compostos de uma série de materiais, que podem apresentar suporte mecânico em um anel de sustentação, ou podem ser fabricados sobre alguma superfície.

Este capítulo apresenta uma série de filtros que foram caracterizados e testados especificamente para este projeto. Os princípios de operação dos filtros são baseados em uma redistribuição da radiação pelos modelos de dispersão, reflexão, espalhamento, difusão, difração, e interferência.

2.1.1 FILTRO POR DIFUSÃO EM ESPELHO RUGOSO

A utilização de espelhos rugosos é uma opção muito indicada para as aplicações aqui consideradas. Foram desbastados espelhos planos com a ajuda de diversos tipos de materiais abrasivos, que posteriormente tiveram sua superfície aluminizada, para difundir a potência total incidente nas frequências maiores, fora da faixa THz e refletir coerentemente as frequências mais baixas na faixa THz.

A refletância em espelhos rugosos pode ser explicada por um modelo estatístico baseado em conceito do desvio padrão da rugosidade de superfície (σ). Quando uma superfície é iluminada por uma luz monocromática incidente com determinado comprimento de onda (λ), a resultante são duas componentes principais de reflexão: especular e difusa [DAVIES, H. 1954; BENNETT, PORTEUS, 1961; KOSTIUK, DEMING, 1991]

Para comprimentos de onda longos ($\lambda \gg \sigma$) o comportamento da refletividade é basicamente especular. Para comprimentos de onda da ordem de σ ou menores, os efeitos de difusão ficam progressivamente mais acentuados.

Os espelhos rugosos podem ser obtidos com a utilização de abrasivos. A figura 9 (a) mostra um espelho plano desbastado com partículas de diamantes com 0,45 μm (E3) e a figura 9 (b) desbastado com carborundum com 1,25 μm (E10), posteriormente aluminizados.

Nas micrografias apresentadas nas figuras 9 (a) e (b), são ilustradas as rugosidade dos espelhos E3 e E10 respectivamente. O gráfico em (c) apresenta a resposta em refletância para cada uma das superfícies. A aluminização é feita após o desbaste das superfícies, para que a camada mais externa seja a reflexiva [KORNBERG et al., 2008].



Figura 9 - Micrografias de espelho rugoso (a) E3, e (b) E10. Em (c), gráfico de resposta apresenta a refletância de 0 a 1,0, em função λ , comprimento de onda do sinal incidente em sua superfície. Para comprimentos de onda curtos, até 20 µm, temos apenas 80 % de transmissão para o espelho E3 e 30 % para E10 [KORNBERG et al., 2008].

Os espelhos tiveram sua refletância testada, apresentando diferentes frequências de corte. Isto se deve a diferentes valores de rugosidade. Para o espelho E3, a rugosidade da superfície medida foi de 0,45 μm, e para o espelho E10 1,25 μm [KORNBERG et al., 2008]. O espelho E3 apresenta um corte abrupto, tornando-o muito interessante para aplicações onde se deseja bloquear sinais não desejados para radiação com frequência na faixa do infravermelho próximo e do visível. Entretanto, sua alta reflexão em comprimentos de onda na faixa dos 20 µm limitou seu uso. Neste projeto optou-se em utilizar o espelho E10 devido a baixa reflexão das frequências mais altas. A refletância para frequências abaixo de 20 µm para 1000° C fica em torno de 30 % de potência incidente.

2.1.2 FILTROS PASSA-BAIXA A MEMBRANA

Filtros passa-baixa a membrana são formados de diferentes tipos de materiais dependendo da frequência de corte, transmitância, e aplicação. Fabricados para transmitir a radiação na faixa THz e bloquear comprimentos de onda inferiores [TYDEX, 2008].

2.1.2.1 ZITEX G110

O filtro de filme fino Zitex G110, possui uma espessura de 0,25 mm, sinterizado com Teflon e poros com tamanho de 1-2 µm. É conhecido como um supressor eficiente de radiação com comprimentos de onda inferiores a 20 µm, apresentando baixa transmitância nestas frequências. [BENFORD, GAIDIS, KOOI, 2003].

A transmitância do Zitex G110 foi testada pela empresa Tydex Company, em São Petersburgo na Rússia. A curva de resposta para a transmitância de radiação com diferentes comprimentos de onda está apresentada na figura 10. A transmitância apresentada pela membrana Zitex G110 para a faixa THz, medidas na faixa de frequências do visível ao olho humano e infravermelho próximo, revelaram a transmissão de uma pequena densidade espectral de potência, correspondendo a 0,3 % de toda potência encontrada nesta faixa.

Esta pequena densidade espectral de potência transmitida pelo filtro, para temperaturas de corpo negro de 1000 K, pode representar 20 vezes mais potência na região visível e infravermelho próximo do espectro, em comparação com a potência na faixa THz para comprimentos de onda acima de 15 µm [KAUFMANN et al., 2010a].



Figura 10 - Transmitância da membrana Zitex G110 (a) aproximação para comprimentos de onda de 1 a 8 μ m, (b) 1 a 215 μ m, e (c) imagem da membrana.

2.1.2.2 TYDEXBLACK

O filtro Tydex Black, (composição não divulgada pelo fabricante) teve sua transmitância testada, avaliando a supressão de frequências não desejadas no contexto do projeto. TydexBlack apresentou uma transmitância de 0,05 % para comprimentos de onda inferiores a 20 μ m, tornando-o muito interessante para utilização no projeto. A curva de resposta para transmitância do filtro está apresentada na figura 11.

A eficiência na supressão de comprimentos de onda nas faixas do visível e infravermelho próximo é visivelmente mais eficiente na membrana TydexBlack (0,05 % de transmitância) que na membrana Zitex G110 (0,3 % de transmitância). Optou-se pela utilização da membrana TydexBlack neste projeto, filtro altamente seletivo e garantindo a rejeição da maior parte da potência emitida em comprimentos de onda inferiores a 20 µm [KAUFMANN et al., 2010a].



Figura 11 - Resposta em porcentagem de transmissão para radiação incidente em função do comprimento de onda, (a) de 1 a 14 μ m, (b) e 1 a 2000 μ m, em (c) imagem do filtro TydexBlack em um anel de sustentação metálico.

2.2 Filtros passa-faixa

Filtros passa-faixa são necessários para selecionar a frequência THz que deverá incidir no sensor. Após a supressão da radiação abaixo de 20 µm é preciso selecionar a faixa de frequência que deverá incidir no sensor, já que este responde para a radiação incidente com frequências em uma ampla faixa do espectro. Dentre os diversos tipos existentes de filtros passa-faixa para radiação eletromagnética, os filtros de malha metálica ressonante foram desenvolvidos e construídos no Centro de Componentes Semicondutores da Unicamp, e apresentaram a resposta esperada para as aplicações aqui desenvolvidas [MELO et al., 2008].

2.2.1 MALHA METÁLICA RESSONANTE

Filtros de malha metálica ressonante foram projetados e construídos para operar em frequências THz com alta taxa de transmissão em sua frequência central (acima de 80%), com banda passante ajustável e alta rejeição nas bandas laterais. Os filtros podem ser fabricados em diversos formatos. Aqui foi utilizado o formato de cruz, conforme modelo do desenho da malha apresentada na figura 12 onde os parâmetros geométricos de construção determinam o perfil de transmissão: G, que representa a periodicidade das cruzetas; K, altura; e L o comprimento, e h a espessura do filme metálico. Os valores utilizados para construção das malhas serão descritos adiante. [PORTERFIELD et al., 1994].



Figura 12 - Parâmetros do elemento de filtro passa-faixa malha metálica ressonante, utilizados em simulação com software CST Microwave Studio.

Utilizando o simulador eletromagnético CST Microwave Studio [CST] partindo das equações derivadas para estes filtros [ARBEX, 2003; MELO, 2004], e alterando os parâmetros de simulação da malha, podem-se determinar os parâmetros de construção e processo a ser utilizado na fabricação das malhas. O processo de fabricação dos filtros de malha metálica utiliza a técnica de micromáquinas com fotolitografia seguida de eletrólise, o que resulta no crescimento de um filme com uma cruzeta aberta no metal sem absorção, criando um filtro altamente seletivo. Em processos anteriores, foram fabricadas malhas centradas em diversas frequências. (0,405; 0,670; 0,850; 2; 3; 4; 10 THz) [MELO et al., 2008].

Um projeto para malha metálica ressonante sintonizada em 2,4 THz foi simulado no CCS Unicamp utilizando CST Microwave Studio. A figura 13 (a) mostra a simulação para a malha de 2,4 THz, com banda lateral de +/- 10 %. Os parâmetros de construção obtidos pela simulação foram aplicados na construção da malha, onde foram fabricadas diversas amostras no CCS Unicamp e Laboratório Nacional de Luz Síncrotron – LNLS em Campinas. A figura 13 (b) e (c) mostra uma fotografia com microscópio eletrônico, micrografia, do filtro fabricado e os parâmetros obtidos.



Figura 13 - Em (a) temos a simulação filtro passa-faixa malha metálica ressonante centrada em 2,4 THz utilizando software CST Microwave Studio, em (b) e (c) micrografias das malhas fabricadas no CCS – Unicamp e Laboratório Nacional de Luz Síncrotron – LNLS, em Campinas.

Estes filtros foram enviados para a empresa Tydex Company, em São Petersburgo na Rússia, para realização de testes de transmissão com diferentes ângulos de incidência e para diferentes ângulos de polarização da radiação.

As simulações realizadas com as malhas definiram a frequência central em 2,4 THz ou seja, comprimento de onda de 125 µm. Na figura 14 temos em vermelho a resposta para malha suspensa ou seja, sem nenhum tipo de anteparo. Em azul a malha está acoplada a uma janela de TPX, que é um filtro passa-baixa de polimetilpenteno. Em preto a malha está acoplada a um filtro passa-baixa à membrana TydexBlack. Os resultados apresentados confirmam que a frequência central das medidas corresponde à simulação baseada nos parâmetros de fabricação.



Figura 14 - Medidas realizadas com FTIR da empresa Tydex Company em São Petersburgo para transmissão da malha metálica ressonante fabricada no CCS Unicamp e LNLS, em vermelho com malha suspensa, em azul acoplada com duas janela de TPX (polimetilpenteno), e em preto com adição de filtro passa-baixa à membrana TydexBlack.

A diferença entre as curvas em vermelho suspensa e curvas em azul e preto corresponde a atenuação adicional devido ao TPX e membrana TydexBlack. Nota-se que para comprimentos de onda inferiores a 20 µm, a curva vermelha permite a transmitância de fração da radiação. Quando acoplada a membrana TydexBlack, o filtro passa-baixa atua nos comprimentos de onda inferiores, bloqueando a radiação nesta faixa. Uma consequência é a redução da transmitância na frequência THz central.

O filtro teve também sua transmitância testada para radiação incidente com diferentes polarizações e ângulos de incidência.

Os resultados mostrados na figura 15 asseguram que o filtro possui a mesma transmissão em frequência, mesmo com polarizador a diferentes ângulos de posição. Para os ensaios com polarizador em diferentes ângulos de posição, nota-se que ocorre uma queda de 3 % na transmitância na frequência central, porém, a frequência central permanece a mesma. A transmissão não depende do angulo de polarização da radiação incidente.



Figura 15 - A transmitância em % do filtro passa-faixa de malha metálica ressonante centrado em 2,4 THz para radiação incidente com malha suspensa em azul, e polarizada em ângulos de 0, 30, 60, e 90 graus para vermelho, rosa, preto, e verde, respectivamente.

A figura 16 apresenta a transmissão da malha metálica para diferentes ângulos de incidência. Com ângulos de incidência superiores a 30 graus, a frequência central da malha metálica mostra importante deslocamento. Os resultados apresentados na figura 16, mostram que o ângulo de incidência é um fator importante na atenuação do sinal, quando maior que 20 graus. Os efeitos aqui encontrados são bem mais pronunciados quando comparados aos testes realizados com filtros de malha metálica 2,2 THz fabricados em substrato de poliéster com 3,8 µm [MACDONALD et al., 2000].



Figura 16 - A transmitância em % do filtro passa-faixa de malha metálica ressonante centrado em 2,4 THz para radiação incidente com diferentes ângulos de incidência 0, 30, e 45 graus em azul, vermelho, e rosa, respectivamente, em função do comprimento de onda.

Foram simuladas e fabricadas malhas nas frequências de 3 e 7 THz para o projeto dos fotômetros para experimento solar. Com uma variação nos parâmetros de construção das malhas metálicas, nota-se um deslocamento na frequência central, bem como na banda passante. A figura 17 apresenta algumas curvas durante simulações utilizando o software CST Microwave Studio para escolha da frequência central e banda passante [BORTOLUCCI, 2012].



Figura 17 - Resultado das simulações no CST Microwave Studio para 3 e 7 THz. Em (a) temos os parâmetros de construção G, J, K, e H para a malha centrada em 3 THz. Em (b) apresenta a resposta espectral da malha centrada em 7 THz, com teste para diferentes parâmetros buscando a melhor resposta na frequência central.

O processo de fabricação foi desenvolvido no Centro de Componentes Semicondutores (CCS) na Universidade Estadual de Campinas. As medidas de transmitância dos filtros foram feitas pela Tydex Company, São Petersburgo, Rússia. Nas figuras 18 e 19, são apresentadas as micrografias das malhas fabricadas e respectivos gráficos de resposta obtidos para as malhas, centradas em 3 e 7 THz.



Figura 18 - Gráficos de resposta medidas (a,b) e micrografias (c,d) da malha fabricada para 3 THz.



Figura 19 - Gráficos de resposta medidas (a,b) e micrografias(c,d) da malha fabricada para 7 THz.

Capítulo 3

Caracterização de Detectores THz

Neste capítulo está apresentado primeiramente um resumo dos métodos e processos de detecção de radiação eletromagnética: fotônica, térmica, e por mixagem. As figuras de mérito são as características que utilizamos para estudar e classificar o comportamento de cada elemento sensor/detector. Serão também apresentados os resultados para os três tipos de detectores térmicos testados e caracterizados durante este trabalho: sensor bolométrico, sensor pirolétrico, e sensor optoacústico. Os sensores piroelétrico e optoacústico precisam de um modulador mecânico, ou "chopper", para modular o sinal incidente em sua superfície sensível.

3.1 Ruído de sistemas sensores

Ruído do sistema é a amplitude quadrática média (r.m.s.) da variação aleatória do sinal de saída do sistema sensor, determinando a sua detectabilidade. O ruído origina-se em diferentes fontes no sistema, não correlacionados entre si: ruído Johnson, ruído de potência 1/f, flutuação de temperatura do sistema, e flutuação de radiação de fundo. Estes quatro tipos de ruído são somados em quadratura na saída do sensor. O ruído total (r.m.s.) é a raiz quadrada da soma dos quadrados dos respectivos (r.m.s.) destas quatro fontes de ruído.

Os mecanismos de detecção da radiação eletromagnética são divididos em 3 categorias: detecção de fótons, detecção térmica, e detecção de ondas de interação. O mecanismo de detecção de fótons ocorre quando um fóton incide sobre uma superfície sensível e é absorvido pelo material, interagindo com os elétrons deste material. Esta interação é detectada e devidamente calibrada para ser detectada. Um exemplo típico destes sensores são os fototransistores, fotovoltaicos, fotocondutivos, entre outros.

Outro mecanismo são as ondas de interação, mais comumente usados para detecção de radiação eletromagnética. Este mecanismo de detecção depende da magnitude do vetor campo elétrico incidente. É considerado o principal método de detecção coerente de ondas de rádio e micro-ondas. Exemplos são *mixers*, barreira *Schottky*, e heterodino óptico.

Finalmente, o terceiro mecanismo de detecção é térmico, definido como a mudança de uma propriedade mensurável do material, causado por absorção de radiação eletromagnética. Nesta categoria estão inclusos os sensores bolométricos, piroelétricos e optocacusticos [KRUSE, 2001].

3.2 Figuras de mérito

Figuras de mérito são parâmetros utilizados para caracterizar e comparar o desempenho de diferentes detectores em termos de sinal e ruído. Destacamos a responsividade (R), a potência equivalente de ruído (NEP), a detectividade (D*), a diferença de temperatura equivalente de ruído (NETD), e o tempo de resposta térmica. Outras características usadas são: resposta espectral, a linearidade, e fontes e tipos de ruído [KRUSE, 2001].

- Responsividade (R):

A responsividade (R) é mais conhecida como o ganho do detector. Definida como o sinal de saída do detector em tensão ou corrente, em resposta a uma potência irradiante incidente:

$$R = \frac{V_S}{P_O} \quad \left[\frac{V}{W}\right] \tag{7}$$

onde R é a responsividade, Vs a tensão de saída, e Po a potência incidente.

- Potencia equivalente de ruído (NEP):

A potência equivalente de ruído (NEP - *Noise Equivalent Power*) é mais conhecida como a sensibilidade do detector. Definida como a potência incidente no detector, que produza um sinal de saída igual ao ruído r.m.s. do elemento sensor. É a potência necessária para que a relação sinal/ruído seja igual a 1.

$$P_{\rm N} = \frac{V_{\rm N}}{R} \quad \left[\frac{W}{Hz^{1/2}}\right] \tag{8}$$

onde P_N é a potência equivalente de ruído, V_N o nível de tensão do ruído r.m.s., e R a responsividade.

- Detectividade (D*):

A detectividade é o valor inverso da potência equivalente de ruído (NEP). Entretanto, tratando-se de detectores térmicos, deve-se considerar a área ativa de cada elemento sensor individual (pixel), pois a relação sinal/ruído depende da raiz quadrada da área ativa deste elemento. Ou seja, a proporção da área ativa do sensor dividido pelo total apresenta o "*fill factor*", região que responde aos estímulos externos. A largura de banda equivale ao comprimento de onda nas camadas de absorção, ou proporção mecânica da cavidade óptica ressonante para determinada frequência.

$$D^* = \frac{[(A_D B)^{1/2}]}{P_N} [\frac{cm H^{1/2}}{W}]$$
(9)

onde D* é a detectividade, A_D a área do sensor, B a largura de banda, P_N a potência equivalente de ruído.

- Diferença de temperatura equivalente de ruído (NETD)

A diferença de temperatura equivalente de ruído é definida como uma variação da temperatura necessária para produzir um sinal igual ao ruído r.m.s. do detector. Pode considerar área, absorção, óptica, e bandas de frequência.

$$NETD = \left(\frac{V_N}{V_S}\right) \cdot \left(T_S - T_B\right) \quad [K]$$
(10)

onde V_N é o nível de tensão do ruído r.m.s., V_S a tensão de saída, T_S a temperatura do sinal, e T_B a temperatura de fundo.

- Tempo de resposta térmica(τ_T):

O tempo necessário para que o detector vá de um valor inicial até um valor final, dado pela capacidade térmica sobre a condutância térmica.

$$\tau_{\rm T} = \frac{\rm C}{\rm G} \quad [\rm s] \tag{11}$$

onde τ é o tempo de resposta, C a capacidade térmica, e G a condutância térmica.

- Resposta espectral:

A resposta espectral representa o sinal de saída em função do comprimento de onda do sinal incidente no sensor.

- Linearidade:

A linearidade ocorre quando o sinal de saída de um detector é diretamente proporcional à radiação incidente, com comportamento resultando em uma função do primeiro grau.

3.3 Tipos de Sensores

3.3.1 MICROBOLÔMETROS

Bolômetro é um detector térmico sensível a radiação infravermelha incidente pelo aumento da temperatura induzida no sensor. Um sensor térmico (ou termômetro) foi usado por Herschel em 1800 para a primeira demonstração da existência da radiação quente invisível na faixa do infravermelho. O aumento da temperatura em um sensor térmico pode ser detectado de diversas formas. A característica que distingue um sensor bolométrico é que ele utiliza uma mudança na condutividade elétrica para medir temperatura. A própria natureza parece ter adotado este mecanismo de detecção infravermelho, por exemplo: os órgãos em forma de cavidade das cobras são depressões que focam a radiação infravermelha em uma fina membrana onde a condutância iônica varia com a temperatura [KRUSE, 2001].



Figura 20 - Em (a) o diagrama esquemático explodido da câmera infravermelha, com o chip de silício e demais componentes. Em (b) a matriz de pixels formados por bolômetros feitos com Si Policristalino [KRUSE, 2001].

Este tipo de sensor, apresentado na figura 20, pode ser constituído de uma matriz ou arranjo de microbolometros não refrigerados em um plano focal para aplicações de imageamento. O termo não refrigerado significa a não utilização de meios artificiais para reduzir a temperatura da matriz infravermelha, assim como por meios criogênicos sólidos ou líquidos, refrigeração mecânica, *coolers* termoelétricos, ou *coolers* Joule-Thompson. A matriz de sensores infravermelhos opera em temperatura ambiente em torno de 300K. A refrigeração é usada em diversos outros tipos de sensores para redução de ruído e ter maior sensibilidade para detecção. Porém, aqui se procuram soluções que não requerem criogenia.

Para captar a radiação infravermelha e transformá-la em sinal detectável, caracteriza-se um hardware composto de duas partes: a matriz bidimensional linear de pixels arranjados na forma de linhas e colunas, e o circuito integrado para leitura de saída (ROIC - *"read out integrated circuit"*) utilizado para amplificar, processar, integrar, e multiplexar o sinal dos sensores. Utilizam-se também conversores analógico/digital, placas de captura de vídeo, e softwares para tratamento dos dados e imageamento. Isto depende do fabricante que produz o sensor e tecnologia empregada.

Uma imagem corresponde a radiação emitida pela fonte. São mais comuns os imageadores na faixa do infravermelho médio, geralmente entre 8-14 µm. Para a formação da imagem no plano focal onde estão os detectores, utiliza-se uma óptica formada de lentes ou

espelhos na frente da matriz de bolômetros, e assim produzir uma imagem no plano onde está a matriz de sensores.

O bolômetro consiste em um elemento resistivo, pois muda sua resistência quando sua temperatura aumenta ou diminui devido à absorção de radiação eletromagnética. Constituído de um metal ou semicondutor e um filme fino de material com alta absorção, suspenso sobre uma cavidade resonante em um substrato para isolação térmica e minimizar o fluxo de aquecimento do filme pelos dispositivos vizinhos. [KRUSE, 2001]

Uma câmera a microbolômetros no plano focal foi utilizada nos nossos testes. Fabricada sob encomenda pela empresa canadense INO Inc. modelo IRXCAM está apresentada na figura 21. Esta câmera é constituída por uma matriz de microbolômetros de óxido de vanádio, em um plano focal (FPA – *focal plane array*) com uma janela com boa transmissão em terahertz de silício HRFZ-Si (*High resistence floating zone Silicon*) modelo IRM 160A provida pelo fabricante INO Company, Quebec, Canadá [INO, 2008]. Medidas foram realizadas utilizando uma óptica apropriada. Uma lente de germânio foi adicionada quando se desejava medidas apenas na banda do infravermelho médio. A câmera possui uma matriz com 160 por 120 pixels, totalizando 19200 elementos resistivos dispostos em forma de linhas e colunas.



Figura 21 - Em (a) imagem da câmera que opera na faixa do infravermelho médio, em 10 μm, fabricada pela empresa canadense INO Company. Em (b) ilustração de pixel sensor membrana suspensa utilizado na câmera mostrada usada no experimento [INO, 2008].

A resposta da câmera para potência total incidente de um corpo negro variando entre 300 e 1000 K foi medida no laboratório de El Leoncito nos Andes argentinos. Uma resistência de níquel cromo foi utilizada como uma fonte próxima à radiação de corpo negro, colocada no foco de um espelho côncavo com 150 mm de diâmetro, para produzir uma imagem ocupando aproximadamente de 70 % da matriz no plano focal (FPA – *focal plane array*).

Assim, foi selecionada a região de interesse (ROI – *region of interest*) para cada quadro, sobre uma área na matriz coberta pela imagem do resistor aquecido. Cada pixel da matriz fornece um valor chamado "*Raw Data*" (dados brutos). O software de aquisição foi alterado para realizar uma média de todos os pixels contidos na região de interesse para cada quadro de leitura. Estes dados dos bolômetros são quantizados e convertidos de analógico para digital (ADC), e em seguida gravados. Foram feitas diversas séries de medidas, com temperatura variando desde ambiente 290 K até 900 K, sem utilização de nenhum filtro e utilizando as duas membranas separadamente, TydexBlack e Zitex G110 descritas na capítulo 2 [BENDFORD, GAIDIS, KOOI, 2003; TYDEX, 2008; KAUFMANN et al., 2009]. Com isso, as leituras corresponderam a radiação emitida em comprimentos de onda maiores que 20 µm.



Figura 22 - Montagem realizada no Laboratório do CASLEO. Em (a) o desenho esquemático apresentando a disposição da câmera INO, com espelho côncavo e resistência simulando um corpo negro. Em (b) uma imagem da câmera infravermelho sem a lente de germânio fabricada com a janela do FPA de silício, e com filtro passa-baixa TydexBlack interposto. Em (c) uma imagem da resistência aquecida, e ao fundo o espelho côncavo alinhado para reflexão da radiação incidente [KAUFMANN, 2009].

O resultado de uma série de medidas está apresentado na Figura 23 (a). A figura 23 (b) mostra outra série de medidas utilizando apenas filtro passa-baixa à membrana Tydex Black. A flutuação dos dados pode ser atribuída as incertezas de medidas (± 1 leitura de contagens em ADC), já que foram gravados em alta cadência (30 quadros por segundo). Pode-se notar na figura 23 (a) que as contagens em ADC utilizando o filtro passa-baixa Zitex G110 interposto é cerca de 20-40 contagens acima das leituras para Tydex Black, para todo o intervalo de temperatura. Este efeito foi repetidamente observado para todas as séries de medidas. Isto pode corresponder a pequena fração da potência do espectro na faixa do visível e infravermelho próximo transmitido pela membrana Zitex G110 [KAUFMANN et al., 2009].

Uma prova efetiva da supressão da radiação emitida na faixa do visível e infravermelho próximo é a redução substancial na resposta da câmera, para alterações na temperatura do corpo negro, quando filtros passa-baixa são interpostos.



Figura 23 - Gráficos de resposta câmera infravermelha a microbolômetros para diferentes valores de temperatura. Em (a) observa-se a resposta da câmera para aumento de temperatura de 300 a 900°K, com resposta em leituras de conversão analógico para digital (ADC) fornecido pelo fabricante. São apresentadas 3 curvas: Livre sem nenhum tipo de filtro, Zitex G110 interposto e TydexBlack interposto. Em (b) ampliada apenas a resposta apenas com o filtro TydexBlack.

O aumento da potência irradiada para uma fonte de corpo negro em 700 K para 800 K, para todo o espectro principal ($\lambda > 0,5 \mu$ m) em comparação à região THz do espectro ($\lambda > 15 \mu$ m) é próximo a 60 vezes. Isto pode ser comparado ao fator de 40 vezes entre as contagens da câmera nesta faixa do espectro em comparação aos filtros de membrana passa-baixa. A escala da câmera de 25 K por contagens (unidade de leitura em ADC) é muito grande para possibilitar qualquer diferença mensurável quando adicionado o filtro passa-faixa malha metálica ressonante.

A câmera infravermelha foi construída para responder a radiação incidente apenas na faixa do infravermelho médio 10 μ m, respondendo a um emissor com temperatura de dezenas de graus Kelvin. A cavidade ressonante que forma o bolômetro foi fabricada com 2,5 μ m de altura e o material absorvedor (óxido de vanádio ou ouro negro dependendo da tecnologia), são características dimensionadas e escolhidas para que o sensor responda para comprimentos de onda com dimensão de $\lambda/4$. Quando incidida a radiação com comprimento de onda de 100 μ m, o sensor responde com baixa eficiência, pois não foi fabricado para operar nesta faixa de frequência.

3.3.2 SENSOR PIROELÉTRICO

O efeito piroelétrico é exibido apenas por certos materiais, os quais possuem polarização elétrica espontânea que pode ser medida como uma carga elétrica transiente em faces opostas de um cristal. A neutralização da carga de superfície ocorre automaticamente pelo fluxo de carga interno. Caso a temperatura do material mude rapidamente, uma carga de superfície irá aparecer para ser novamente neutralizada. Para obter variações por efeito piroelétrico, o sinal de entrada precisa ser modulado, o que é conseguido por um chopper. Para uma radiação absorvida pelo material, uma corrente alternada irá fluir por um circuito externo conectado em faces opostas do material. A amplitude da corrente que flui devido à tensão aplicada externamente depende da intensidade e taxa de alteração da radiação absorvida [KRUSE, 2001].

O detector piroelétrico utilizado em nossas medidas foi fabricado pela Spectrum Detector Inc. modelo SPH-65THz, otimizado para medidas de fontes THz de baixa intensidade, mostrado na figura 24. Composto por um filme fino de cristal piroelétrico LiTaO3 (Tantalato de Lítio) com 5 mm de diâmetro na superfície sensível, montado sobre um substrato de cerâmica, que por sua vez é suspenso sobre um amplificador com baixo ruído no modo de saída. O elemento sensor é coberto por uma capa metálica absorvedora. O sensor pode ser instalado em distintas posições no circuito em pinagens diferentes, dependendo da necessidade. A caixa de testes contendo o detector é alimentado por duas baterias de 9V, e inclui resistores seletivos de carga para ajuste da responsividade e largura de banda do detector [SPECTRUM, 2009].



Figura 24 - Imagem do módulo detector piroelétrico fabricado pela empresa Spectrum Detector Inc. Em (a) uma imagem do sensor, em (b) eletrônica onde o sensor é acoplado e baterias.

O modulo piroelétrico construído pela empresa Spectrum Detector Inc. [SPECTRUM, 2009], modelo SPH65-THz, foi testado no laboratório do Centro de Componentes Semicondutores (CCS), Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), e no Observatório Solar "Bernard Lyot" (OSBL). Algumas montagens utilizaram uma fonte de corpo negro Newport modelo Oriel 67000, com chopper interno centrado na frequência de 20 Hz, e outras uma resistência de níquel-cromo conforme apresentado na figura 25.



Figura 25 - Em (a) o esquemático da montagem realizada no CRRAM, com a resistência de níquel-cromo irradiando potência no detector piroelétrico, precedido por filtros passa-baixa e passa-faixa. Em (b) uma imagem do experimento.

A resposta do detector é mostrada na figura 26, para radiação incidente na faixa do espectro eletromagnético compreendendo os comprimentos de onda acima de 20 µm, e usando os filtros de membrana passa-baixa Tydex Black e Zitex G110. A resposta do sensor piroelétrico para variações de temperatura foi consideravelmente melhor definida quando comparada com a resposta do sensor de microbolômetros. As leituras com o filtro passa-baixa Zitex G110 são maiores do que as leituras com Tydex Black, para aumento de temperaturas. Na figura 26 (b), é verificado que para temperaturas entre 600 e 700 K, a resposta do detector piroelétrico para o filme fino de Zitex G110 é de 20 mV e para TydexBlack é de 3 mV. Este efeito pode corresponder a uma fração da potência na faixa do visível e infravermelho próximo transmitido pela membrana Zitex G110 [KAUFMANN et al., 2009].



Figura 26 - Gráficos de resposta detector piroelétrico para diferentes valores de temperatura. Em (a) observa-se a resposta do detector para aumento de temperatura de 350 a 700°K, com resposta em milivolts na saída do módulo. Igualmente feito no detector bolométrico, são apresentadas 3 curvas: Livre sem nenhum tipo de filtro, com filtros Zitex G110 e TydexBlack. Em (b) ampliada a resposta com filtro Zitex G110 e TydexBlack, apresentando uma variação de 15 μ V/Kelvin.

A transmissão de uma pequena porcentagem de potência é permitida pelo uso do filtro passa-baixa, consistente com a supressão eficiente da radiação na faixa espectral do visível e infravermelho próximo, resultando em uma resposta do sensor em 15 mV/Kelvin. Testes de transmissão foram feitos adicionando o filtro passa-faixa de malha metálica ressonante centrado em 2 THz. Para altas temperaturas foi indicada uma redução na potência transmitida, qualitativamente consistente com a atenuação esperada na frequência central da malha metálica.

Com a interposição do filtro passa-faixa à malha metálica ressonante juntamente com a membrana passa-baixa TydexBlack, a leitura do sinal de saída em tensão do detector piroelétrico, realizada em osciloscópio para variação da temperatura de corpo negro irradiando no sensor, foi muito próxima à flutuação de leitura, comprometendo as medidas para diferentes temperaturas. Além desta limitação, as medidas com detector piroelétrico apresentaram acentuados efeitos de microfonia.

3.3.3 SENSOR OPTOACÚSTICO

Este detector consiste em uma célula de Golay que corresponde a um único pixel baseado no primeiro projeto proposto pelo Dr. M.J.E. Golay em 1947. Este detector pode ser eficientemente usado em diversas aplicações devido a operação em temperatura ambiente, tamanho reduzido, alta sensibilidade, boa eficiência, e extensa faixa de comprimentos de onda de operação. Está classificado entre os detectores não refrigerados e não seletivos em frequência. É amplamente usado em pesquisa de fontes infravermelho e detectores, monitorando e controlando campos infravermelhos, medindo baixos fluxos no infravermelho em espectrometria e fotometria de baixas temperaturas, meteorologia, entre outras diversas aplicações, com detecção eficiente de sinais de baixas energias em comprimentos de onda que vão de 15 µm a 8 mm.

O detector optoacústico fabricado pela Tydex, modelo GC-1P, é formado por uma câmara frontal, um microfone óptico e um pré-amplificador. A figura 27 (a) mostra uma imagem do sensor, e 27 (b) apresenta o esquemático para o funcionamento do sistema sensor. Um feixe de radiação modulado passa pela entrada do cone (I) e chega à entrada da segunda janela (II) até um filme translúcido no meio da câmara (III). A energia absorvida no filme aquece o gás (Xenônio) na câmara causando uma oscilação na pressão e na intensidade do sinal modulado. Estas oscilações passam pelo canal (IV) até uma membrana espelhada (V) que serve como parede da câmara, e simultaneamente um espelho para o microfone óptico.



Figura 27 - Do lado esquerdo (a) a imagem do detector célula de Golay fabricada pela empresa russa Tydex Company. Em (b) o diagrama esquemático da câmara que produz a resposta ao efeito optoacústico, descrito no texto.

A imagem do diodo emissor de luz (IX), que serve como microfone óptico, é projetada pelo condensador (VI) por um varredor óptico (VII), localizado no plano focal das lentes (VIII), até a membrana espelhada. Esta radiação é refletida de volta pela metade inferior do varredor óptico, e focada novamente pelo espelho (X), pelo diafragma (XI) até o fotodiodo (XII). Devido às variações da pressão do gás, a membrana oscilará periodicamente, deslocando a imagem das linhas transparentes da metade superior do varredor óptico das linhas opacas da metade inferior, que é direcionada ao fotodiodo.

Um pré-amplificador, baseado em um amplificador operacional e um "FET dual" (CMOS), converte a oscilação da fotocorrente em um sinal elétrico alternado. A resistência de carga do fotodiodo conectada ao terminal negativo realimenta o circuito amplificador. A tensão do sinal de saída é fornecida por um cabo conectado a entrada de um dispositivo de gravação e apresentação do dispositivo [TYDEX GOLAY, 2009].

O desempenho do sensor Célula de Golay modelo GC-1P fabricado pela empresa Tydex, São Petersburgo, Rússia, foi investigado em condições similares. A primeira sequência de medidas foi realizada na Tydex Company, utilizando um corpo negro padrão, diafragma com abertura de 2 mm na frente da fonte do corpo negro, e chopper rotativo. Os filtros e diafragma foram colocados na frente do sensor. O esquema da montagem está apresentado na figura 28.



Figura 28 - Montagem para medidas com o sensor célula de Golay, realizada no laboratório da Tydex Company. Corpo negro gerando radiação, modulada, e filtrada incidindo no sensor.

A figura 29 mostra o resultado das medidas feitas com o diafragma próximo ao sensor, e o chopper centrado operando em 20 Hz. O filtro de malha metálica ressonante centrado em 2 THz foi fabricado separadamente no CCS, e acoplado ao filtro de membrana passa-baixa TydexBlack, produzindo uma resposta praticamente linear em 2,5 μ V/K . A redução do sinal na saída do detector para o filtro passa-baixa (frequências < 15 THz) com relação ao filtro passa-baixa baixa acoplado ao passa-faixa (2 ± 0,2 THz) é consistente com a redução espectral de potência na banda respectiva. A sensibilidade da célula de Golay pode ser melhorada com a adição de cones coletores de fótons ou adicionando uma pequena abertura reflexiva.

O detector célula de Golay foi o único que apresentou resposta mensurável às variações de temperatura da fonte de corpo negro, com todos os filtros e malha ressonante interpostos, com uma relação de 2 μ V/K. Isto se deve a maior sensibilidade do detector, sendo assim escolhido para ser utilizado nas medidas do protótipo [KAUFMANN et al., 2009].

Dois sensores célula de Golay foram comprados para este projeto. Uma das características observadas deste detector durante os experimentos está apresentada na figura 29 (c), e foi a linearidade de saída. Mesmo com todos os filtros interpostos: membrana passa-baixa e malha passa-faixa, a resposta em tensão é linear com o aumento da temperatura. Notou-se também que a flutuação para baixas temperaturas (entre 50 e 400 K) corresponde a pouca potencia irradiada combinada com a atenuação dos filtros interpostos.



Figura 29 - Gráficos de resposta para o sensor célula de Golay para diferentes valores de temperatura realizadas no laboratório da Tydex. Em (a) observa-se a resposta direta do detector para aumento de temperatura de 50 a 800° C, com resposta em milivolts na saída do dispositivo. Semelhante as medidas feitas com os outros detectores, em (b) a resposta utilizando o filtro a membrana TydexBlack bloqueando comprimentos de onda inferiores a 20 µm, e em (c) adicionando a malha metálica ressonante centrada em 2 THz.

3.4 TABELA RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS DETECTORES

São apresentadas as características consolidadas dos três detectores estudados neste trabalho, de acordo com as especificações técnicas de cada um dos sensores. Os parâmetros mais importantes para caracterizar a sensibilidade dos detectores para esta aplicação são: a faixa espectral para a qual o sensor responde, a potencia equivalente de ruído, e a detetividade. O sensor optoacústico apresenta a melhor resposta, quando comparado com o piroelétrico. A câmera de bolômetros não pode ser comparada por causa da falta de informações contidas na especificação, e também por possuir uma diferente forma de operação.

Características	Optoacústico	Piroelétrico	Bolométrico
Resposta para radiação	15 μm - 8 mm	10 µm - 6 mm	8 μm - 12 μm
Chopper otimizado	20 Hz	20 Hz	Não utiliza
Elemento Sensor	Único detector	Único detector	Matriz 160x120 detectores
Tamanho elemento sensor	diâmetro 0,5 cm	diâmetro 0,5 cm	retangulo 0,8x0,6 cm
Potência equivalente de ruído	1,4 x 10^-10	1 x 10^-9	não informado
Detectividade	7 x 10^9	4 x 10^8	não informado
Tempo de resposta otimizado	50 ms	50 ms	3 ms
Temperatura ambiente	Sim	Sim	Sim
Pressão ambiente	Sim	Sim	Sim
Sinal de saída	Analógico	Analógico	Digital
Imageamento	Não	Não	Sim

Tabela 2 - Especificação técnica fornecida pelo fabricante dos três detectores caracterizados.

3.5 USO DE CHOPPER

Chopper é um modulador mecânico para radiação incidente em sensores que necessitem uma variação do sinal de entrada. Esta variação é essencial para os detectores piroelétricos e também para optoacústicos quando a variação das temperaturas é lenta. Nos detectores piroelétricos o chopper é essencial devido à neutralização das cargas de superfície, e nos detectores optoacústicos, o gás dentro da membrana precisa ser resfriado e aquecido novamente, pois sua resposta está relacionada à escala de tempo da variação da radiação incidente.

Desde que sensores optoacústicos foram construídos para trabalhar com sinais modulados senoidais, um chopper deve ser usado para modular o feixe de radiação incidente. Para nossa realização experimental foi utilizado um chopper óptico ThorLabs, modelo MC1000A, apresentado na figura 30. É um instrumento de precisão utilizando características avançadas para as aplicações mais precisas. Utiliza um controle para velocidade do motor PLL (phased-lock loop), desenvolvido para manter uma velocidade precisa e constante com um sinal
de referência. Um sintetizador interno com frequência estabilizada por cristal provê uma frequência de referência estável e precisa.

O chopper admite o uso de uma série de hélices, com diferentes espaçamento entre as laminas. Assim, é possível uma combinação entre as rotações e as laminas específicas para frequências desejadas. Um motor em corrente contínua de alta qualidade e um fotodetector choperizado pela hélice conduzem a precisão. Controladores e display no driver monitoram a frequência do chopper [THORLABS, 2009].



Figura 30 - Imagem do modulador mecânico ou chopper rotativo fabricado pela Thor Labs.

Outra opção consiste no chopper à diapasão ressonante com uma frequência fixa, modulado eletromagneticamente e apresentado na figura 31. Utiliza duas palhetas com formatos e superfícies específicas para aplicação desejada acopladas a dois braços finos que se movem modulando um feixe de radiação incidente com movimento senoidal. Os choppers utilizados no experimento são de 20 Hz e 50 Hz, devido à melhor resposta dos sensores para estas frequências.

A abertura deste *chopper* é uma função do tamanho das palhetas e do tipo de ciclo. O tipo mais comum de abertura é 50 % aberto na posição de repouso, com 90 % de ciclo de trabalho. Quando o modulador estiver operando nesta configuração, a abertura produzida será máxima. As palhetas são ajustadas em fábrica para que quando forem completamente iluminadas a excursão do sinal irá gerar uma onda senoidal quase completa. Assim, a radiação transmitida chega a 90 % em cada ciclo. Chopper com modulação com 50 % de ciclo de trabalho as palhetas

são ajustadas para permanecerem fechadas na posição de descanso, e abertura completa para 50 % do ciclo de trabalho [EPOC, 2009].



Figura 31 - Imagem do modulador mecânico ou chopper ressonante a diapasão fabricado pela Electrooptical Products Corporation (EPOC), e diagrama mostrando diferentes ciclos de trabalho.

Capitulo 4

Sistema Protótipo Para Fotometria THz

4.1 Detecção de Fontes Pequenas em Campo Angular Extenso

As explosões solares são produzidos em regiões ativas consideravelmente menores que o disco solar (menores ou muito menores que 1 minuto de arco para um disco de 30 minutos de arco), conforme figuras 7 e 8. A componente impulsiva ocorre em escalas de tempo menores (fração de segundos a dezenas de segundo) que componentes lentas (dezenas de minutos a horas), em diferentes regiões do disco solar cujas posições no disco não são conhecidas previamente. Isso dificulta a detecção de explosões com sensibilidade suficiente sem perder dados em espaço ou tempo.

Sensibilidade mais alta requer aberturas de tamanhos maiores, o que reduz o ângulo limite de difração do feixe principal para fontes pequenas. Não é possível predizer o apontamento para uma região ativa em abrilhantamento em uma curta escala de tempo, pois o rastreio de todo disco solar pode levar mais tempo que o próprio evento. O problema então é como observar o sol todo com sensibilidade suficiente para detectar abrilhantamentos em escalas muito pequenas, com ganho suficiente.

Para resolver este problema, foram combinadas duas propriedades bem conhecidas. Uma delas é óptica, uma equação relacionando o diâmetro d da imagem formada no plano focal para um objeto remoto com diâmetro angular θ , para distância focal f:

$$d = f \tan \theta \quad [m] \tag{12}$$

onde d é o diâmetro da imagem formada, f a distância focal, e θ o tamanho angular do objeto.

É importante notar que esta equação é independente do diâmetro de abertura e do comprimento de onda. Com o aumento do diâmetro, para a mesma imagem formada, aumentase o ganho.

A segunda propriedade, a partir de relações e definições conhecidas, [KRAUS, 1950; 1986] o ganho de potência de uma abertura, G para radiação incidente é dado pela equação:

$$G(\delta, \phi) = \frac{W(\text{potência de saída})}{W(\text{potência de entrada})} = \frac{4 \pi A_e(\delta, \phi)}{\lambda^2}$$
(13)

onde $G(\delta, \varphi)$ é o ganho de potência do telescópio, W(potência de saída) a potência de saída, W(potência de entrada) a potência de entrada, A_e a abertura de área efetiva, e (δ, φ) os ângulos da fonte externa em relação ao eixo perpendicular à abertura.

A combinação dos dois efeitos constituem um novo conceito utilizado no projeto de telescópio fotométrico [MARCON, KAUFMANN, 2011], permitindo ganho suficiente para detectar pequenos abrilhantamentos com tamanho angular inferiores ao tamanho da fonte maior, detectada simultaneamente.

A figura 32 mostra o conceito [patente depositada, MARCON, KAUFMANN, 2011]. O feixe proveniente de uma fonte distante, com tamanho angular θ mostrado, atinge o refletor côncavo (ou lente) e a radiação é concentrada no foco, formando uma imagem com tamanho d no plano focal.



Figura 32 - Esquema óptico desenvolvido para obtenção de sensibilidade suficiente para detectar pequenas variações de radiação, em dimensões angulares pequenas, em campos extensos [MARCON, KAUFMAN, 2011].

A imagem do disco solar ficará borrada, com aberrações pronunciadas para aberturas de grande diâmetro (aberração esférica ou coma para abertura parabólica). Entretanto isto não influenciará nas medidas fotométricas desde que todos os fótons recebidos estejam contidos na imagem de diâmetro d formada no foco. O tamanho da imagem do Sol no plano focal pode ser dimensionado para ser menor que a superfície sensível do dispositivo detector para otimizar a detectabilidade. Isto corresponde a uma grande área de detecção quando um cone concentrador de fótons [RIEDL, 2001] é colocado a frente de um elemento sensor.

A resposta do receptor no espaço todo pode ser expressa por uma função de Bessel. O ângulo de visão, ou do feixe, entre os primeiros "zeros" pode ser expresso por [KRAUS, 1950; 1986]:

$$\varphi_0 = 2,44 \left(\frac{\lambda}{D}\right) rd = \frac{140 \lambda}{D} [graus]$$
 (14)

onde φ_0 é o ângulo entre os primeiros zeros da função de Bessel, λ o comprimento de onda, e D o diâmetro da abertura

O ângulo de ganho de meia potência pode ser aproximado [KRAUS, 1986; KRAUS, 1950]:

$$\varphi_{\text{HPBW}} = \frac{58\,\lambda}{D} \quad [\text{graus}]$$
(15)

onde φ_{HPBW} é o ângulo do ganho de meia potência.

A aproximação de Rayleigh-Jeans para lei de Plank permanece válida acima do infravermelho médio ($\lambda > 10 \mu$ m ou f < 30 THz). Assim, a densidade do excesso de fluxo pode ser representada pela conhecida relação [KRAUS, 1986]:

$$\Delta S = \frac{2k\Delta T\Omega}{\lambda^2} \quad [W m^{-2} Hz^{-1}] \tag{16}$$

onde ΔS é a densidade de excesso de fluxo, k a constante de Boltzman, ΔT o excesso de temperatura, Ω o elemento de ângulo sólido.

Para uma fonte de abrilhantamento com tamanho angular menor que φ_{HPW}, podemos aproximar:

$$\Delta S = \frac{2 \, k \, \Delta T}{A_e} \, \left[W \, m^{-2} \, H z^{-1} \right] \tag{17}$$

Esta aproximação é valida para fontes cuja dimensão angular é menor do que o ângulo de visada subentendido pela abertura [KRAUS, 1986].

4.2 Configuração Fotômetro Protótipo para Testes

A caracterização de sensores na faixa terahertz requer uma fonte para a geração de sinais na faixa de frequência desejada, já que o sensor optoacustico tem a característica de responder a comprimentos de onda de 15 a 8000 µm [TYDEX GOLAY, 2009]. Para isto, foi elaborada uma metodologia específica para o experimento em questão utilizando a célula de Golay. A proposta apresentada utiliza conceitos de óptica para tratamento do sinal emitido por uma fonte de corpo negro, uma sequência de filtros para estreitamento da banda do sinal desejado, e a detecção da radiação terahertz. Diagrama esquemático está apresentada na figura 33 (a) e (b).

Alguns ensaios utilizaram como corpo negro um pequeno cilindro de carvão, aquecido por uma resistência de níquel-cromo e temperatura medida por um termopar acoplado. Uma fonte DC controla a corrente e temperatura da resistência. O cilindro de carvão é colocado no foco de um espelho côncavo com 150 mm de diâmetro e distância focal de 600 mm. Um feixe plano paralelo irradia do espelho, onde o corpo negro simula o tamanho do sol observado pela abertura do fotômetro. Uma segunda opção, apresentada na figura 33 (b), foi a utilização de corpo negro marca Newport, modelo Oriel 67000.



Figura 33 - Esquema do protótipo montado no CCS - Unicamp. Em (a) temos a montagem da fonte emissora de radiação para simulação de aumento abrupto de temperatura, juntamente como o protótipo do radiômetro THz. Em (b) a fonte de radiação de corpo negro da *Newport*, que produz uma rampa de subida lenta, porém constante e com valores exatos [FERNANDES et al., 2011].

O protótipo do fotômetro THz consiste em um espelho rugoso colocado a 45 graus que reflete a radiação que chega do espelho côncavo. A reflexão no espelho rugoso difunde cerca de 30-40 % da radiação emitida na faixa do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. O telescópio Newtoniano com refletor primário com 76 mm de diâmetro é colocado a uma distância onde o diâmetro aparente do carvão no plano focal é comparável ao diâmetro do Sol. O sensor é colocado no foco do telescópio Newtoniano. O sistema de filtros

consiste na multiplicação das eficiências dos filtros interpostos: espelho rugoso passa-baixa, membrana passa-baixa TydexBlack, e malha metálica ressonante passa-faixa. Uma imagem da montagem está apresentada na figura 34.



Figura 34 - Montagem no Laboratório do Centro de Componentes Semicondutores para teste de resposta com o telescópio Newtoniano com 76 mm de diâmetro para variações de temperatura do Sol artificial. (I) Fonte de corpo negro Newport modelo Oriel 67000 com roda para selecionar a janela diafragma de saída colocada no foco do (II) espelho côncavo 15 cm de diâmetro, que reflete um feixe plano paralelo ao (III) espelho plano com superfície rugosa (E10) colocado a 45 ° de inclinação. Este direciona a radiação ao (IV) telescópio Newtoniano com 76 mm, com foco na (VIII) célula de Golay, precedido por um (V) chopper tunning fork a 20 Hz, (VI) filtro passa- faixa de malha metálica ressonante centrado em 2 THz, e (VII) filtro passa-baixa a membrana Tydex Black. A saída do módulo célula de Golay é (IX) filtrada, amplificada, retificada e integrada.

4.2.1 Tratamento Analógico de Dados

A saída do sensor célula de Golay consiste em uma componente DC em torno de 9 volts. O sensor optoacústico responde uma tensão de saída para variações do sinal de entrada, e assim é necessário uso do modulador mecânico (chopper). O sensor célula de Golay irá apresentar em sua saída a diferença de sinal entre temperatura de emissão equivalente do corpo negro na entrada em contraste com temperatura da paleta do chopper usualmente em temperatura ambiente. O sinal produzido na saída da Golay possui 20 Hz de modulação. Conforme a especificação do fabricante, o ruído do sensor para uma frequência de chopper de 20 Hz é de 10 μ V / \sqrt{Hz} , e o NEP = 1,4 x 10⁻¹⁰ W / \sqrt{Hz} . Para melhorar a qualidade do sinal de saída do sensor, optamos por testar o tratamento digital e analógico dos dados, separadamente.

Para o tratamento analógico, foi desenvolvido um circuito eletrônico formado com componentes eletrônicos especiais, específicos para atingir a sensibilidade desta aplicação. Foram utilizados amplificadores operacionais de baixo ruído, trimpots, resistores, capacitores, material para filtragem e isolarmos o circuito da radiação ambiente. O circuito eletrônico foi primeiramente simulado no software PSpice [PSPICE, 2012], posteriormente montado em Protoboard, e finalmente construído em placa de circuito impresso. A figura 35 apresenta o esquema do filtro simulado e posteriormente construído para eliminar ruídos em alta frequência no sinal de saída do sensor.



Figura 35 - Filtro passa-baixa simulado em PSpice e posteriormente construído para excluir componentes de alta frequência existentes no sinal de saída do sensor célula de Golay.

Após o filtro passa-baixa elaborado para excluir componentes de alta frequência existentes no sinal de saída do sensor célula de Golay, simulamos um circuito amplificador, retificador, e integrador. Este circuito eletrônico amplifica o sinal de saída do sensor em 100 vezes. Após o ganho, a senóide formada pela modulação do chopper é retificada, e integrada em 200 milisegundos, apresentado um valor DC constante de saída do circuito.



Figura 36 - Circuito simulado no PSpice contendo amplificadores operacionais de baixo ruído (OP27e). Em seguida o sinal é retificado, e por fim integrado em 200 milisegundos. Um buffer também foi utilizado para conectar e isolar a entrada.

O circuito apresentado na figura 36 foi montado com diferentes seleções dos componentes na procura da melhor resposta para amplificação, filtragem, retificação e integração do sinal. A conexão I recebe a saída do filtro passa-baixa apresentado na figura 35. Em II está esquematizado um pré-amplificador, que irá amplificar 10, 50, 100, 200, 500 vezes o sinal de entrada, mediante a troca do resistor, de acordo com a necessidade de tensão para a

leitura do sinal de saída. Em III, está apresentado o circuito detector de pico com onda completa. Consiste em um retificador utilizando diodos de germânio, cuja queda de tensão é de 0,3 V, melhor para esta operação quando comparado com silício de 0,7 V. Em IV, temos um buffer de saída, com um circuito integrador composto de resistor em paralelo com capacitor.

Montado em *Protoboard*, e duas versões foram montadas em placa de circuito impresso, conforme apresentado na figura 37, com amplificação, retificação, e integração do sinal de entrada, e filtragem do ruído durante leituras de tensão para diferentes valores de temperatura do corpo negro. Utilizaram-se duas baterias de 9 V, chave on-off, e led para sinalização de funcionamento. Um gerador de sinais senoidais, triangulares, e retangular/degrau foi utilizado para testar o circuito analógico construído. A melhor resposta apresentada foi para o sinal senoidal. O sinal senoidal é o que mais se aproxima da resposta para a modulação do chopper.



Figura 37 - Em (a) está apresentada uma imagem do circuito completo, contendo filtro / amplificador / retificador / integrador montado no CRAAM - Mackenzie, (b) construído em placa de circuito impresso no CCS – Unicamp para leitura de dados em osciloscópio analogicamente.

Atendendo ao limite de detctabilidade de 3 σ , o mínimo sinal detectável deve ser 30 μ V em uma componente DC de 9V. Os valores finais dos componentes do circuito eletrônico foram obtidos durante as medidas. Como o ruído do sensor era da ordem de 10 μ V, utilizamos valores de resistência que nos proporcionassem uma resposta superior a 30 μ V / Kelvin. Na figura 38 estão apresentados dois gráficos de leitura dos valores de tensão na saída do circuito analógico

tratando o sinal na saída do sensor célula de Golay. Em seguida, as leituras foram feitas no osciloscópio Minipa.

A figura 38 apresenta a resposta na saída do circuito analógico para variação da temperatura de corpo negro. É uma relação entre a irradiância do corpo negro em variação da temperatura com a leitura em tensão da saída do sistema completo. A figura 38 (a) apresenta uma amplificação de 50 vezes da tensão de saída da célula de Golay, com uma relação de 27 μ V / Kelvin. Em (b), com uma amplificação de 100 vezes, foi atingida uma relação de 47 μ V / Kelvin.



Figura 38 - Resposta do sensor célula de Golay, a temperatura de entrada para diferentes valores de amplificação no circuito analógico. Em (a) utilizamos uma amplificação de 50 vezes, obtendo uma variação de 27 μ V / Kelvin. Em (b) com uma amplificação de 100 vezes, obtivemos uma relação de 47 μ V / Kelvin.

4.2.2 Tratamento Digital de Dados

Para análise das diversas montagens e medidas com os circuitos analógicos, foi adquirida para o projeto uma placa para conversão de dados analógico/digital do fabricante National Instruments. A placa está aliada ao software LabView para realização de filtros, amplificadores, integradores, gráficos, e também aquisição de dados digitalmente. Com o circuito analógico, não foi possível gravar os dados digitalmente. Decidiu-se realizar todo tratamento, anteriormente utilizando um circuito analógico, mas com uma conversão de analógico para digital. A figura 39 apresenta o diagrama dos blocos, descrevendo respectivos softwares associados, elaborado para realização das medidas com a placa de captura. Após a leitura do sinal analógico, realizou-se a conversão para digital. Em seguida, realizaram-se os procedimentos de filtragem, amplificação, retificação, e integração no sinal digital armazenado, e posteriormente a exibição dos dados oferecidos pelo sensor. Permitiu também o armazenamento de todas as informações em planilha Excel e também a exibição durante todo o processo de captura.



Figura 39 - Programação em blocos com Software LabView para leitura digital dos dados fornecidos pela célula de Golay. Item I apresenta configuração da entrada analógica e conversão para sinal digital. Item II apresenta um filtro passa faixa do sinal de entrada em 20 Hz. Em III está a captura dos dados. Em IV uma integração do dado de entrada. Em V o espectro do sinal, centrado em 20 Hz.



Figura 40 - Modelo para tela no microcomputador com as janelas para os gráficos de saída. Janelas com sinais analógicos capturados diretamente da célula de Golay, posteriormente tratados digitalmente, e sinais filtrados, retificados, amplificados, e integrados pelo circuito eletrônico, e espectro.

Definidas as especificações para aquisição de dados, foi montada uma bancada para teste com o sistema completo. Na Figura 41 temos (I) a mesma montagem mostrada na figura 34, acoplado ao sistema de aquisição e gravação de dados digital (fonte de corpo negro, espelho côncavo, telescópio Newtoniano e célula de Golay com filtros). O sinal produzido na saída do sensor é direcionado tanto para o circuito analógico (II) como para a placa de aquisição de dados (IV). O osciloscópio (III) é utilizado para auxiliar a maximizar o alinhamento. A leitura dos dados é feita no computador com o programa de aquisição (V).



Figura 41 - Protótipo do experimento SOLAR-T, com a fonte de emissão de corpo negro e sistema óptico em (I), e aquisição de dados analógica/digital em (II) na bancada do laboratório do CCS - Unicamp.

A figura 41 apresenta o protótipo completo do fotômetro THz operando em 2 THz juntamente com a fonte de calibração com sistema óptico que simula um Sol artificial, montado no CCS/Unicamp. A fonte de corpo negro Newport Oriel que possui uma coroa para selecionar o diâmetro da janela de emissão, (diafragma) que foi colocada no foco de um espelho côncavo com 150 mm de diâmetro e 600 mm de distância focal, refletindo um feixe plano paralelo de radiação. Para a abertura selecionada com 5,08 mm (0,2'') de diâmetro, é visto como 0,48 ° após a reflexão no espelho côncavo, que corresponde aproximadamente ao disco solar artificial usado para testes.

A radiação na entrada do protótipo é primeiramente refletida por um espelho plano colocado a 45 ° de inclinação, com superfície rugosa para difundir uma fração substancial da potência no visível e infravermelho próximo [KOSTIUK, DEMING, 1991; KORNBERG et al., 2008]. A radiação é direcionada em um telescópio Newtoniano com 76 mm de abertura da marca Celestron modelo FirstScope, com 300 mm de distância focal. Após a reflexão no espelho plano secundário, a radiação é direcionada para a célula de Golay. O telescópio forma uma imagem do disco do Sol com aproximadamente 4,7 mm de diâmetro no plano focal onde o cone com 10 mm da célula de Golay está localizado para concentrar a radiação em uma superfície sensível com 5 mm. Antes de incidir a superfície sensível, a radiação passa por um modulador mecânico formado por um diapasão ressonante com frequência fixa em 20 Hz. A entrada no sensor é precedida por um filtro passa-faixa de malha metálica ressonante fabricado em nosso laboratório, com frequência central em 2 THz (± 10 %) [MELO et al., 2008] e filtro a membrana passa- baixa TydexBlack [TYDEX,2008] para uma completa supressão das emissões na faixa do visível e infravermelho próximo [KAUFMANN et. al, 2010a; KAUFMANN et. al, 2010b]. Antes da leitura, o sinal de saída da célula de Golay é amplificado, retificado, e integrado por circuito RC em 200 ms.

4.2.2.1 Aquisição de Dados e Armazenamento

Foram tomadas medidas do protótipo durante 23,7 minutos continuamente para o aumento de temperatura do corpo negro de 600 até 1300 K, e assim avaliar a resposta do sistema para variações de temperatura e estabilidade. O sinal de saída do sistema protótipo mostrado na figura 33 passa pelo circuito amplificador, retificador, e integrador, e então é lido digitalmente em uma taxa de 10 amostras por segundo.

O resultado está apresentado na figura 42, com leituras a uma taxa de 10 amostras por segundo e sem média corrida acima, com média corrida de 10 amostras no centro, e média corrida de 100 amostras em baixo [MARCON et al, 2012]. A fonte de corpo negro apresentou uma rampa constante e estável. O sistema fotométrico possui uma resposta em tensão linear para temperaturas, e as flutuações de ruído de temperatura permanecem as mesmas para todos os valores de temperatura de entrada. Com este gráfico da figura 42, cálculos demonstram que o ruído cai de 40° K com 10 amostras por segundo, para 4° K com média corrida de 10 pontos, e para 0,4° K com média corrida de 100 pontos. O ruído expresso em variações relativas de temperatura permanece o mesmo para temperaturas mais altas, e a resposta de saída do sistema

é linear com a temperatura. Este comportamento está melhor descrito pela estatística de Allan, na figura 45.



Figura 42 - Dados originais obtidos com taxa de 10 amostras por segundo (a) durante rampa de subida de temperatura previamente estabelecida no corpo negro. Média corrida com 10 pontos (b) e média corrida com 100 pontos (c) [MARCON et al, 2012].

Após realizarmos o experimento com a placa de aquisição de dados, utilizamos um módulo de leitura dos sinais produzido pela Tydex Company para a célula de Golay. Este módulo chamado Golay Cell *Frontend* apresentado na figura 43, teve software desenvolvido especialmente para ser conectado a saída do sensor, adquirindo dados e convertendo-os de analógico para digital. O *software* instalado em um computador convencional possui uma saída USB para conexão. Pode ser utilizado para detecção, processamento e análise de sinais, e ajuste

de parâmetros para adequar a detectabilidade do sensor a aplicação específica. A figura 44 apresenta a imagem produzida pelo *software* Golay Cell frontend, quando acoplado ao sensor célula de Golay com corpo negro e chopper centrado em 20 Hz.



Figura 43 - Módulo conversor A/D Tydex USB utilizado com software Golay Cell Frontend para leitura e aquisição de dados.



Figura 44 - Software Golay Cell Frontend. Em (a) apresenta a forma de onda na saída do detector com parâmetros para leitura. Em (b) o espectro de Fourier do sinal modulado com a componente em 20 Hz, para cada 128 pontos.

4.3 Sensibilidade do Experimento

Existem diversos métodos para demonstrar a estabilidade deste sistema montado, mesmo sem o controle de temperatura ambiente no laboratório. A inspeção dos gráficos mostrados na figura 42 indicam que a aplicação de médias corridas reduz as flutuações do sinal. Variações lentas, da ordem de 10 K na escala temporal de alguns minutos também são observadas. Os valores de temperatura são crescentes devido a rampa de subida do corpo negro. O mesmo resultado pode ser obtido mantendo o corpo negro em uma temperatura fixa, durante o mesmo período de tempo.

Constata-se também que o ruído observado é o mesmo para diferentes valores de temperatura.

A estabilidade do sistema pode ser descrita utilizando a estatística de Allan [ALLAN D.W, 1966], usada para caracterizar a estabilidade em frequência de osciladores, pode ser utilizada para descrever quantitativamente as flutuações do sistema. A variância de Allan foi derivada de 14200 pontos medidos durante 23,7 minutos para diferentes valores de média corrida (ver figura 42), ou números sucessivos de pontos (N).

O desvio de Allan, é a raiz quadrada da variância de Allan explicado a seguir. Os valores de δT_n e δT_{n+1} são as sucessivas diferenças de temperatura a respeito da melhor aproximação da reta média dos 14200 pontos. O desvio de Allan, expresso em K, está mostrado na figura 45, para diferentes números de pontos usados na média corrida ou equivalente em intervalo de tempo. O desvio de Allan mostra a sensibilidade do sistema para diferentes números de pontos utilizados para a média corrida.

$$\sqrt{\sigma_N^2} = \frac{1}{2} \left(\delta T_{n+1} - \delta T_n\right)^2 \tag{18}$$

onde σ_{N^2} é a variância de Allan, e δT são valores de temperatura.



Figura 45 - Estatística de Allan. Gráfico resultante do desvio de Allan, que é a raiz quadrada da variância de Allan [MARCON et al, 2012].

O desvio de Allan para todo o sistema mostra que variações de temperatura ∆T menores que 1 grau Kelvin podem ser detectadas com média corrida em 40 pontos com uma taxa de 10 amostras por segundo (equivalentemente um intervalo de 4 segundos). O resultado é uma representação do desempenho de todo o sistema, que inclui os dados integrados em 200 milisegundos, antes de serem amostrados com uma taxa de 10 amostras por segundo, e estruturas com variações lentas em tempo de origem desconhecidas. Podem-se considerar causas externas ao detector, como variações não controladas do ambiente externo.

O valor aproximado da potência equivalente de ruído NEP (Noise Equivalent Power) para todo o sistema pode ser estimado. Para uma relação sinal/ruído (SNR – Signal to Noise Ratio) igual a 1, apresentamos o cálculo [PHILLIPS, 1987]:

$$NEP \approx \left(\frac{2 \, k \, \Delta T \, \Delta f}{SNR}\right) \sqrt{\tau} \tag{19}$$

onde NEP é a potência equivalente de ruído, Δf a banda passante, e τ o tempo de resposta.

Na equação (19), (2 k Δ T Δ f) é a potência equivalente de ruído das flutuações medidas. O filtro passa-faixa de malha metálica ressonante centrado em 2 THz tem uma banda passante Δ f = ± 10 %, ou seja 4.10¹¹ Hz. Com um tempo de integração de τ = 0,2 segundos, foi medido Δ T ≈ 40 K na saída do integrador RC. Logo, obtemos NEP ≈ 2.10⁻¹⁰ W Hz^{-0,5}. Esta estimativa aproximada é duas vezes maior que a especificação nominal da célula de Golay usando um chopper com 20 Hz [TYDEX, 2009].

A eficiência de abertura do telescópio, definido como a razão entre a abertura efetiva e abertura física, pode ser estimada aproximadamente. A principal perda é causada pelo bloqueio da radiação incidente na parte de traz do refletor secundário e nos braços de suporte. Outras perdas podem ser causadas por desalinhamentos mínimos residuais. Foi assumido conservadoramente uma eficiência de abertura de 50 % com incerteza de 20 %.

Da equação (17), usando uma abertura física A_e de 76 mm, a mínima diferença de temperatura detectável Δ T é aproximadamente de 1 K, correspondendo a uma densidade de fluxo mínima detectável Δ S da ordem de 100 SFU (1 SFU = 10⁻²² W m⁻²Hz⁻¹).

A dificuldade de observar o disco solar inteiro com sensibilidade suficiente para detectar explosões com escalas de tamanho inferior foi resolvida com um concentrador de fótons [MARCON e KAUFMANN, 2011], que combina a formação de uma imagem do disco solar de tamanho d no plano focal, de acordo com a conhecida relação (12).

Para produzir uma imagem do disco solar com 4,7 mm de diâmetro no plano focal do sistema, menor que o cone capturador de fótons com 10 mm de diâmetro da célula de Golay colocado na frente da superfície sensível, utilizamos uma distância focal de 500 mm. A imagem do disco solar no plano focal pode estar desalinhada em até 5 mm do centro e mesmo assim toda a radiação dos fótons incidirão sobre o detector, conforme esquema apresentado na figura 32.

$$d = 0.5 * \tan(0.5) = 4.7$$
 [mm]

Esta equação é bem conhecida em óptica, e relaciona a distância focal com a dimensão da imagem no foco d, para objeto distante com diâmetro angular θ .

Este desempenho qualitativo é adequado para os propósitos desta aplicação, pois o sistema possui sensibilidade necessária para detectar eventos da ordem de 100 SFU. Uma explosão solar com fluxo de 100 SFU é relativamente pequena quando comparada com a classificação em raios X do satélite GOES. Assim garantimos a detectabilidade de eventos pequenos, caso haja emissão nestas faixas de frequência. Espera-se um sinal mais limpo, com menos ruído, para variações de temperatura no modelo do fotômetro definitivo. Isto se deve ao fato de possuir controle de temperatura interno eletrônico, e sensores instalados em caixa selada.

Capítulo 5

Projetos Presentes e Futuros

5.1 Fotometria Solar THz do Espaço

Os desenvolvimentos e resultados obtidos nesta dissertação trouxeram subsídios para a realização de fotômetros THz para medida de explosões solares do espaço. Resumimos a seguir as justificativas e resultados correntes dos novos desenvolvimentos, bem como os planos de trabalho para o futuro. Como já mencionado, para o completo entendimento da natureza de emissão em altas frequências durante explosões solares, é necessário medir completamente o espectro de emissão em frequências THz. Isto requer observações com detectores e sensores fora da atmosfera terrestre, assim como foi feito para os experimentos não solares na faixa do infravermelho distante SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) com aeronaves para altas altitudes [ERICKSON, 1985], PACS (Photodetector Array Camera and Spectromter) no satélite HERSCHEL [POGLITSCH et. al, 2010], e experimentos de varredura solar a bordo de balões estratosféricos [DEGIACOMI, KNEUBÜHL, HUGUENIN, 1985]. Observação de radiação solar em janelas de transmissão atmosférica na faixa THz é possível em poucas regiões do globo terrestre, em bases no solo em locais com excepcional altitude e baixo conteúdo vapor d'agua (Polo Sul, Atacama) [LAWRENCE, 2004].

O protótipo aqui descrito foi construído com fotômetros THz para medir a variação de temperatura no contínuo, juntamente com uma fonte de calibração de corpo negro nas dimensões de um Sol artificial [MARCON, 2012].

Um sistema fotométrico com duas frequências THz para operar fora da atmosfera terrestre está sendo construído de acordo com o protótipo descrito para operar a bordo de balão estratosférico em voos de longa duração. O experimento é chamado de SOLAR - T. Consiste essencialmente no mesmo conceito exibido na figura 32, duplicados para operar em duas frequências centradas em 3 e 7 THz, com algumas modificações ópticas e mecânicas. A figura 46 apresenta o projeto dos fotômetros com a possibilidade de configuração de dois canais. O telescópio definitivo possui uma geometria *Cassegrain*, usando um espelho côncavo primário com 76 mm padrão fabricado pela empresa *Edmund Optics*, com 76 mm de distância focal, montado com um espelho convexo secundário de 25 mm de diâmetro e distância focal de – 25,8 mm. A figura 40 apresenta a configuração do telescópio, sensor, e filtros.



Figura 46 - Projeto de fotômetro operando em 3 e 7 THz para observação solar em plataforma estratosférica (a). Óptica Cassegrain, com espelho primário rugoso, janelas de TPX, chopper, malha metálica ressonante e membrana TydexBlack. Sensor célula de Golay (b).

A distância focal efetiva total da montagem *Cassegrain* está relacionada com a magnificação do sistema, que depende da distância entre os espelhos primário e secundário [TEXEREAU, 1984]. Os dois espelhos foram ajustados opticamente para produzir uma distância focal de 500 mm, antes de desbastar o espelho primário para deixá-lo rugoso. Esta montagem produz uma imagem do disco solar com 4,7 mm de diâmetro no plano focal do dispositivo sensor, menor que o cone concentrador de fótons com 10 mm na entrada do sensor célula de Golay, em frente à superfície sensível. A imagem do disco solar no plano focal poderá

apresentar um desapontamento de até 5 mm do centro e ainda sim teremos a radiação de todos os fótons incidindo no detector. De acordo com (12), a tolerância angular de desalinhamento para o plano focal de 500 mm é equivalente a um desapontamento aceitável de menos de 0,5 °, por onde todos os fótons são detectados.



Figura 47 - Princípio para radiação incidente no sensor, passando pelo telescópio com superfície primária desbastada, janelas de TPX, modulador mecânico, filtro passa- faixa de malha metálica ressonante centrada em 3 ou 7 THz, e filtro passa- baixa TydexBlack.



Figura 48 - Os dois telescópios Cassegrain com 76 mm de diâmetro fabricados no Observatório Solar "Bernard Lyot" em Barão Geraldo, Campinas.

A superfície primária foi desbastada utilizando partículas de Carborundum 10 μm, produzindo uma superfície rugosa com 1,25 μm, o que resulta na difusão de uma fração significante de radiação com comprimento de onda abaixo de 20 μm [KORNBERG et al., 2008]. Foram construídos dois telescópios Cassegrain com 76 mm de diâmetro no laboratório do Observatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, Brasil, mostrados na figura 48.

Antes de serem enviados para integração no modelo final de voo, cada telescópio teve sua efetiva difusão da radiação na faixa do visível e infravermelho próximo testada, juntamente com resposta para variações de temperatura com sucesso, utilizando a montagem apresentada na figura 49. A montagem é a mesma apresentada nas figuras 34 e 41, exceto pelo telescópio *Cassegrain* com superfície do espelho primário desbastada, substituindo o espelho plano rugoso e telescópio Newtoniano. Para testá-lo, o telescópio foi apontado diretamente ao espelho côncavo, que reflete a radiação emitida pela fonte de corpo negro do Sol artificial.



Figura 49 - Protótipo radiômetro THz utilizando os telescópios Cassegrain, montados para receber a radiação emitida pela corpo negro Newport Oriel 67000. Em (I) está mostrado o corpo negro Newport, em (II) uma coroa para selecionar o diâmetro de abertura do corpo negro, (III) o espelho côncavo com 15 cm

de diâmetro, (IV) o telescópio com montagem Cassegrain, (V) detector célula de Golay, (VI) filtros passabaixa, passa-faixa, e chopper.

Cada telescópio teve o efeito de difusão de radiação nas faixas do visível e infravermelho próximo testado, e também a resposta para variações de temperatura usando a montagem da figura 49. A resposta do sistema para temperaturas está mostrada na figura 50. As respostas dos dois telescópios *Cassegrain* foram similares. A amplificação do sinal foi realizada no módulo *Tydex Golay Cell Frontend*.



Figura 50 - Gráfico de resposta para telescópio com espelho primário rugoso. As medidas tomadas com a montagem apresentada na Figura 42, são utilizadas para calibração do sistema.

Os telescópios e filtros passa-faixa de malhas metálica ressonante centrados em 3 e 7 THz fabricados no Centro de Componentes Semicondutores da Unicamp foram enviados para a empresa Tydex, em São Petersburgo para serem integrados em uma caixa completa termalizada com os fotômetros. Após serem enviados a Tydex, foram realizadas medidas de transmitância no sistema completo, com o telescópio e todos os filtros interpostos. A figura 51 apresenta a resposta dos dois sistemas de filtros, um centrado em 3 e outro em 7 THz, medidos com FTIR na

empresa Tydex em São Peterburgo, Rússia. Consiste na soma de filtros Tydex Black, janela de TPX e malha metálica ressonante, centrados em 3 e 7 THz.



Figura 51 - Transmitância dos filtros conjuntos combinados em vermelho para 3 THz (100 μm) e azul para 7 THz (42 μm), corresponde à previsão do projeto.

5.2 Experimento SOLAR-T

O experimento SOLAR-T, apresentado na figura 52, consiste em dois detectores células de Golay, duplicado para operar nas duas frequências centrais de 3 e 7 THz, precedidas por filtro passa baixa a membrana TydexBlack especialmente fabricado para esta aplicação, janela de TPX, chopper à diapasão ressonante EPOC, reguladores de tensão, aquecedores, e sensores de temperatura. Os dados das células de Golay serão amostrados a uma taxa de 500 amostras por segundo pelos módulos de aquisição da Tydex - hardware e software, e entregues como formas de onda e transformada rápida de Fourier de sinais choperizados para um sistema separado de aquisição de dados.



Figura 52 - Caixa selada SOLAR – T fabricada pela empresa Tydex Company em São Petersburgo na Rússia. Em (a) vista interna da caixa com dois sensores célula de Golay instalados, juntamente com módulo de leitura dos detectores, hardware para aquisição de dados, telescópios *Cassegrain*, resistência para aquecimento/termalização da caixa, e isolamento interno e externo. Em (b) uma vista traseira da caixa com as conexões para entrada/saída de sinais, comandos, e alimentação elétrica. Em (c) uma vista lateral com chapa metálica para troca de calor com ambiente externo. Em (d) detalhe do telescópio *Cassegrain* instalado, com refletor primário branco ao fundo e secundário suspenso no suporte. Em (d) o equipamento em câmara de vácuo para teste de pressão (1000 hPa) e baixa temperatura (- 25 °C).

5.3 Subsistemas para Aquisição de Dados e Telemetria

O experimento SOLAR – T fabricado pela Tydex converte do sinal analógico da célula de Golay para digital amostrado com taxa de 500 amostras por segundo, através do módulo USB da Tydex. A empresa Propertech de Jacareí – SP realizou a aquisição e condicionamento dos dados, e a integração de todo o sistema. Após a aquisição, estes dados são enviados ao computador de controle da missão em tempo real por um sistema de telemetria, fornecido pela empresa Neuron de São José dos Campos – SP, baseado no "*short data burst service*" da rede *Iridium* de satélites. A integração completa com aquisição de dados e telemetria está sendo feita no Brasil.

Este projeto foi convidado para participar em dois voos estratosféricos. Um voo em cooperação com a Universidade da Califórnia, Berkeley, nos Estados Unidos, e outro com Instituto Lebedev de Física de Moscow, na Rússia. Os projetos possuem características distintas como o apontamento, a alimentação elétrica, o modelo de lançamento e pouso, entre outros. Assim, o projeto do sistema de aquisição de dados está sendo preparado para atender as especificações técnicas exigidas pelo experimento de Berkeley, que providenciará energia e apontamento para o SOLAR – T. A figura 53 apresenta o diagrama esquemático.



Figura 53 - Projeto da empresa Propertech para realizar a aquisição e armazenamento dos dados, comunicação com telemetria, regulagem de tensão provida pelo experimento de Berkeley, GPS, relógio, e dados auxiliares, como temperatura interna e acionamento do aquecedor.

O diagrama de blocos para aquisição de dados está mostrado na figura 53. O sistema é capaz de operar independentemente do GRIPS (Gama-ray Imager/Polarimeter for Solar flares), com relógio GPS próprio. O sistema consiste em duas CPU's que coletam sinais de saída de duas células de Golay, com uma montagem de 4 módulos de leitura, assegurando redundância no caso de falha. Outros parâmetros também serão lidos com taxas menores, como tensão e temperatura. Os módulos apresentam uma amostragem de 500 amostras por segundo, cada. Após um primeiro processamento os dados do radiômetro serão integrados em 10 amostras por segundo para transmissão. Todos os dados serão armazenados a bordo.

Os dados compactados, relógio, e dados auxiliares serão transmitidos e interfaceados por um sistema de telemetria, baseado na rede de satélites Iridium. A rede Iridium é a que melhor se aplica ao experimento, pois permite transmissão em regiões como a Antártica. O diagrama de blocos para o sistema de telemetria está mostrado na figura 46. Composto por um modem Iridium modelo 9602, um circuito eletrônico com controladores, memória, regulador de tensão, e conversor DC/DC. O modem transmite e recebe pacotes de dados digitais pelo serviço de Iridium SBD (Short Burst Data). Pacotes de dados são transmitidos para estações na Terra com um tamanho máximo de 340 bytes, e recebidos do solo com 270 bytes. A figura 54 apresenta um diagrama esquemático para o funcionamento da telemetria via rede Iridium.



Figura 54 - Diagrama rede Iridium. O modem Iridium integrado a um circuito eletrônico e a rede de dados até o computador de controle da missão. São os dois modems na saída do sistema integrado mostrado em blocos na figura 53.

A latência da rede de satélites atual para transmissão e recepção de pacotes de dados assim como o aquecimento do modem durante cada transmissão definem a taxa máxima de transmissão de dados, e consequentemente capacidade de telemetria do canal. A função do sistema de telemetria é controlar o modem 9602 para estabelecer a comunicação com a rede de satélites Iridium e monitorar o estado da comunicação; controlar a interface do modem 9602 com o módulo de aquisição de dados da Propertech para permitir transmissão e recepção de pacotes de dados para e do solo; condicionar a tensão do barramento do balão para gerar tensão secundária requerida para demais sistemas; gerar tensão para sistema de telemetria permitindo monitorar temperatura de operação do modem 9602.

Para comunicação com o computador de controle da missão, foi elaborado pela empresa Propertech de Jacareí - SP um programa em C# para ler os dados fornecidos pelo modulo da Tydex e realizar a integração com os demais dados fornecidos pelo sistema completo, apresentado na figura 55.



Figura 55 - Tela de apresentação no computador de base da missão com o software para controle da missão que deverá receber todas as informações geradas pelo SOLAR – T. No gráfico em (a) está apresentado o espectro, centrado em 20 Hz. Em (b) a localização espacial do SOLAR-T utilizando GPS. Em (c) a resposta do sensor para variações de temperatura, ainda não calibrado.

Após a integração final do experimento, o SOLAR-T completo poderá ser enviado ao Observatório Solar "Bernard Lyot" em Barão Geraldo, distrito de Campinas/SP para novos testes em câmara de vácuo. Em seguida, poderá ser enviado ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – CTI, em Campinas/SP para teste em temperaturas ainda mais baixas (- 65°C) em câmera fria. O SOLAR – T em voo estratosférico acoplado à gôndola em balão estratosférico deverá subir a 40 km de altura, passando por regiões (10 km) com temperaturas de até - 60 °C. A figura 56 apresenta o modelo de voo construído.



Figura 56 - Experimento SOLAR - T com sistemas de aquisição de dados e telemetria.

5.4 Planejamento de Voo

O experimento Solar-T com dois fotômetros centrados em 3 e 7 THz está programado para voar a bordo de balão estratosférico de longa duração acoplado ao GRIPS, experimento de raios gama [SHIH et al., 2008] em cooperação com a Universidade da Califórnia, Berkeley, US. Um voo de engenharia está agendado para 2013 nos EUA e outro voo sobre a Antártica com duração de duas semanas entre 2015-2016. A figura 57 apresenta o projeto do experimento GRIPS com o SOLAR-T integrado na estrutura.



Figura 57 - Voo acoplado ao experimento GRIPS.

Outro voo de longa duração em balão estratosférico sobre a Rússia está planejado em cooperação com o Instituto Lebedev de Física de Moscou (2014-2015). Figura 58.



Figura 58 - Voo em balão estratosférico em cooperação com Instituto Lebedev de Física.

O objetivo dos voos de balão estratosférico de longa duração é detectar uma explosão solar com os sensores operando na faixa THz (3 e 7 THz), possibilitando a obtenção de novos pontos no espectro destas misteriosas emissões. Estas informações são cruciais para fornecer subsídios para pesquisa visando a explicação destes fenômenos.

Capítulo 6

Conclusões

O estudo apresenta resultados da caracterização de filtros passa-baixa, passa-banda, sensores bolométrico, piroelétrico, e optoacústico, sistemas combinados de detecção, e a ótica mais adequada para o experimento.

O sensor bolométrico adaptado para detectar radiação THz possui uma detecção insuficiente em frequências inferiores a 30 THz. Não responde quando o filtro passa-banda de malha metálica é inserido no sistema.

Detector piroelétrico respondeu satisfatoriamente pra frequências acima de 0,1 THz e apresentou uma resposta superior ao microbolômetro. Entretanto, com a adição do filtro passabanda de malha metálica, as leituras foram próximas as flutuações e apresentou efeito de microfonia.

O detector optoacústico célula de Golay apresentou a melhor resposta entre os 3 detectores testados. Foi o único sensor que respondeu quando todos os filtros foram interpostos, inclusive o filtro passa-faixa.

Com os resultados aqui apresentados, foi passível estabelecer os parâmetros necessários para o projeto e construção de um modelo de voo.

76 Universidade Estadual de Campinas
Referências e Bibliografia

ALLAN, D. W. "Statistics of Atomic Frequency Standard", Proceedings of the IEEE, 54, No. 2, 221-231, 1966.

ARBEX, C. J. N., Dissertação de mestrado em preparação, FEEC, Unicamp, 2003.

ARMSTRONG, Carter M.; HAGEN, Chad " The truth about terahertz", IEEE Spectrum, 28-33, September 2012.

BENFORD, D. J.; GAIDIS, M. C.; KOOI, J. W. "Optical properties of Zitex in the infrared to submillimeter", Applied Optics, 42, 5118-5122, 2003.

BENNETT, H. E.; PORTEUS, J. O. "Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence", J. Opt. Am., 51, 123-129, 1961.

BORTOLUCCI, E.; KAUFMANN, P.; FERNANDES, L. O. T.; ZAKIA, M. B.; DINIZ, J. A.; SILVA, A. M. P. A.; FLACKER, A.; TIMOFEEVSKY, A. V.; NIKOLAEV, V. A., "THz band-pass resonant metal mesh filters for a space solar photometry experiment", VII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology - Seminatec, 77-78, 2012.

CASSIANO, M. M.; KAUFMANN, P.; MARCON, R.; KUDAKA, A. S.; MARUN, A.; GODOY, R.; PEREYRA, P.; MELO, A. M.; LEVATO, H., "Fast Mid-IR Flashes Detected During Small Solar X-RAys Bursts", Solar Phys., 254, 71-79, 2010. DAVIES, H. "The reflection of electromagnetic waves from a rough surface.", Proceedings of The Institution of Electrical Engineers - London, vol. 101, 209-214, 1954.

DEGIACOMI, C. G.; KNEUBÜHL, F. K.; HUGUENIN D. "Far-infrared solar imaging from a balloon-borne platform", Astrophys. J., 298, 918-933, 1985.

DEMING, D.; KOSTIUK, T.; GLENAR, D., "The Solar Infrared Explorer (SIRE): A Small Explorer Mission for Solar Physics", American Astronomical Society, 23, 1038, 1991.

ERICKSON, E. F. "SOFIA: the next generation airborne observatory", Space Sci. Rev., 84, 91-100, 1985.

FERNANDES, L. O. T.; KAUFMANN, P.; MARCON, R.; KUDAKA, A. S.; MARUN, A.; GODOY, R.; BORTOLUCCI, E.; ZAKIA, M. B.; DINIZ, J. A. "Photometry of THz radiation using Golay cell detector", XXX URSI General Assembly, Istanbul, Turkey, JP2.10, 14-20, 2011.

GEZARI, D. Y.; JOYCE, R. R.; SIMON, M., "Measurement of solar brightness temperature at 345 μ, 450 μ and 1000 μ". Astron Astrophys., 26, 409-411, 1973.

HALIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. "Fundamentals of Physics Extended fifth edition". New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons, INC., 1997.

HARRIS, D. C. "Materials for infrared windows and domes". SPIE Optical Engineering Press, Washington, USA, 1999.

KAUFMANN, Pierre, "La atmósfera solar y su investigación a través de ondas radioelétricas", Livro Unesco, 1976. KAUFMANN, Pierre, "Fast discrete emission at hard x-rays and sub-mm-ir waves in the impulsive phase of solar bursts", Solar Physics, **169**, 377-388, 1996.

KAUFMANN, Pierre et al., FIRE Flare InfraRed Experiment, NASA AO-98-OSS-01, proposto para programa de microsatelite Franco-Brasileiro, aprovado pela Academia Brasileira de Ciências, 1998.

KAUFMANN, P.; RAULIN, J.-P.; GIMÉNEZ DE CASTRO, C. G.; LEVATO, H.; GARY, D. E.; COSTA, J. E. R.; MARUN, A.; PEREYRA, P.; SILVA, A.V. R.; CORREIA, E., "A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range". The Astrophysical Journal, 603, L121, 2004.

KAUFMANN, P.; RAULIN, J. –P. "Can microbunch instability on solar flare accelerated electron beam account for bright broadband coherent synchrotron microwaves?". Phys. Plasmas, 13, 070701-070701-4, 2006.

KAUFMANN, P. ; KUDAKA, A. S.; CASSIANO, M. M.; MELO, A. M.; MARUN, A.; PEREYRA, P.; GODOY, R.; LEVATO, H.; MARCON, R.; TIMOFEEVSKY, A. V.; NIKOLAEV, V. A.; "Continuum Terahertz Radiation Detection Using Membrane Filters", International Microwave and Optoelctronics Conference. SBMO & IEEE-MTT, Nov. 3-6 2009, Belem, Pará, Brazil, 262-266, 2009.

KAUFMANN, P.; MARCON, R.; MARUN, A.; KUDAKA, A. S.; BORTOLUCCI, E.; ZAKIA, M. B.; DINIZ J. A.; CASSIANO, M. M.; PEREYRA, P.; GODOY, R.; TIMOFEEVSKY, A. V.; NIKOLAEV, V. A.; SILVA, A. M. P. A.; FERNANDES, L. O. T. "Selective spectral detection of continuum terahertz radiation". In Millimeter, Submillimeter and Far-IR Detectors and Instrumentation for Astronomy V, ed. by W.S. Holland, J. Zmuidzinas, Proc. of SPIE 7741, 774125 1-1, 2010a.

KAUFMANN, P.; MAKHMUTOV, V. S.; STOZHKOV, Y. I.; CASTRO, C. G. G.; RAULIN, J.-P.; VALIO, A. S.; CORREIA, E.; VILLELA, T.; MARCON, R.; MARUN, A.; PEREYRA, P. "Search for continuum solar flares radiation in the terahertz range". In IRMMW-THz International Society of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Rome, Italy. Conference paper Mo-F3.1, September 2-10, 2010b.

KAUFMANN, P.; MARCON, R.; KUDAKA, A. S.; CASSIANO, M. M.; FERNANDES, L. O. T.; MARUN, A.; PEREYRA, P.; GODOY, R.; BORTOLUCCI, E.; ZAKIA, M. B.; DINIZ, J. A.; SILVA, A. M. P. A.; TIMOFEEVSKY, A.V.; NIKOLAEV, V.A. "Uncooled detectors of continuum terahertz radiation", Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications 10, 288-294, 2011-a. ***TEXTO***

KAUFMANN, P.; MARCON, R.; CASTRO, C. G. G.; WHITE, S. M.; RAULIN, J.-P.; CORREIA, E.; FERNANDES, L. O. T.; SOUZA, R. V.; GODOY, R.; MARUN, A.; PEREYRA, P. "Sub-Thz and Hα Activity During the Preflare and Main Phases of a GOES Class M2 Event". In The Astrophysical Journal. 742:106 (5pp), December 1, 2011-b. ***TEXTO***

KINCH, M. A. "Fundamentals of infrared detector materials". SPIE Optical Engineering Press, TT76, Washington, USA, DC, 2007.

KLOPF, J. M. in 1st SMESE Workshop, 10-12 March, Paris, France, 2008.

KORNBERG, M. A.; MARCON, R.; SOUZA JR J.; KAUFMANN, P.; MELO, A. M.; ZAKIA, M. B.; KUDAKA, A. S.; BAUER, O. H.; POGLITSCH, A. "Rough mirrors for the THz frequency range". Proc. MOMAG 2008 – 13th SBMO and 8th CBMAG, Florianópolis, SC, Brazil, 7-10 September, 365-367, 2008. KOSTIUK, T.; DEMING, D. "A solar infrared photometer for space flight application". Infrared Physics 32, 225-233, 1991.

KRAUS, J. D. "Radio astronomy", 2nd edition (Cygnus-Quasar Books, Powell, Ohio, 1986), pp. 6.1-6.127 Book chapter.

KRAUS, J. D., "Antennas", (Mcgraw-Hill, New York, 1950), pp. 324-352 Book chapter.

KRUSE, P. W. "Uncooled Thermal Imaging – Arrays, Systems, and Applications", 2001.

LAWRENCE, J. S. "Infrared and submillimeter atmospheric characteristics of high Antarctic plateau sites", Publ. Astron Soc. Pacific, 116, 482-492, 2004.

MACDONALD, M. E.; ALEXANIAN, A.; YORK, R. A.; POPOVIC, Z.; GROSSMAN, E. N., "Spectral transmittance of lossy printed resonant-grid terahertz bandpass filters", IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques 48, 712-718, 2000.

MARCON, R.; KAUFMANN, P.; MELO, A. M.; KUDAKA, A. S.; TANDBERG-HANSSEN, E., "Association of mid-infrared solar plages with calcium K line emissions and magnetic structures", Publications of The Astronomical Society of the Pacific, Volume 120, 16-19, 2008.

MARCON, R.; KAUFMANN, P.; "Método para maximizar ganho na detecção simultânea de radiação de fontes pequenas em campo extenso de visão". Requerimento de Patente no Brasil, Universidade Estadual de Campinas, e Instituto Presbiteriano Mackenzie, 30 de Março de 2011.

MARCON, R.; KAUFMANN, P.; FERNANDES, L. O. T; GODOY, R.; MARUN, A.; BORTOLUCCI, E. C.; ZAKIA, M. B.; DINIZ, J. A.; KUDAKA, A. S., "Terahertz photometer to observe solar flares in continuum", J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 33, 192-205, 2012.

MELO, A. M., "Radiometria com sensores de banda larga para faixa THz', Dissertação de mestrado, FEEC, Unicamp, 2004.

MELO, A. M.; KAUFMANN, P.; KUDAKA, A. S.; RAULIN, J.-P.; MARCON, R.; MARUM, A.; PEREYRA, P.; LEVATO, H., "A new setup for ground-based measurements of solar activity at 10 μm", Publications of The Astronomical Society of the Pacific, Volume 118, 1558-1563, 2006.

MELO, A. M.; KORNBERG, M.; KAUFMANN, P.; PIAZZETTA, M. H.; BORTOLUCCI, E. C.; ZAKIA, M. B.; BAUER, O. H.; POGLITSCH, A.; SILVA, A. M. P. A., "Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies". Applied Optics 384 47, 6064-6069, 2008.

MLYNCZAK, M. G.; JOHNSON, D.G.; BRINGHAM, G. E., JUCKS, K. W.; TRAUB, W. A.; GORDLEY, L.; YANG, P., "The Far-Infrared Spectroscopy of the Troposphere (FIRST) project", Proceedings of Geosciences and Remote Sensing Symposium, 1, 512, 2003.

PHILLIPS, T. G. "Techniques of submillimeter astronomy", in Millimetre and submillimetre astronomy (Ed. by R.D. Wolstencroft and W.B. Burton), Lectures at Summer School, Stirling, Scotland, June 21-27, 1987 (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, 1988), pp. 1-25 Book chapter.

POGLITSCH, A.; WAELKENS, C.; GEIS, N.; FEUCHTGRUBER, H.; VANDENBUSSCHE, B.; RODRIGUEZ, L.; KRAUSE, O.; RENOTTE, E.; VAN HOOF, C.; SARACENO, P.; CEPA, J.; KERSCHBAUM, F.; AGNESE, P.; ALI, B.; ALTIERI, B.; ANDREANI, P.; AUGUERES, J. L.; BRALOG, Z.; BARL, L.; BAUER, O. H.; BISCHOF, H.; BLOMMAERT, J.; CALLUT, E.; CARA, C.; CERULLI, R.; CESARSKY, D.; CONTURSI, A.; CRETEN, Y.; DE MEESTER, W.; DOUBLIER, V.; DOUMAYROU, E.; DOUBAND, L.; EXTER, K.; GENZEL, R.; GILLIS, J. M.; GROZINGER, U.; HENNING, T.; HERREROS, J.; HUYGEN, R.; INGUSCIO, M.; JAKOB, G.; JAMAR, C.; JEAN, C.; DE JONG, J.; KATTERLOHER, R.; KISS, C.; KLAAS, U.; LEMKE, D.; LUTZ, D.; MADDEM, S.; MARKET, B.; MARTIGNAC, J.; MAZY, A.; MERKEN, P.; MONTFORT, F.; MORBIDELLI, L.; MULLER, T.; NIELBOCK, M.; OKUMURA, K.; ORFEI, R.; OTTENSAMER, R.; PEZZUTO, S.; POPESSO, P.; PUTZEYS, J.; REGIBO, S.; REVERT, V.; ROYER, P.; SAUVAGE, M.; SCHREIBER, J.; STEGMAIER, J.; SCHMITT, D.; SCHUBERT, J.; STURM, E.; THIEL, M.; TOFANI, G.; VAVREK, R.; WETZSTEIN, M.; WIEPRECHT, E.; WIEZORREK, E., "The photodetector array camera and spectrometer (PACS) on the Herschel space observatory" Astron. Astrophys., 518, L2, 1-12, 2010.

PORTERFIELD, D. W.; HESLER, J. L.; DENSING, R.; MUELLER, E. R.; CROWE, T. W.; WEIKLE II, R. M. "Resonant metal mesh band-pass filters for the far infrared", Applied Optics, 33, 6046-6052, 1994.

RIEDL, M. J. "Optical design fundamentals for infrared systems" (SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001), pp. 19-35 Book chapter.

SHERWIN, M. S.; SCHMUTTENMAER, C. A.; BUCKSBAUM, P. H., "Proceedings of DOE-NSF-NIH Workshop on Opportunities in THz Science", Arlington, VA, 2004.

SHIH, A.Y.; LIN, R. P.; HURFORD, G. J.; BOGGS, S. E.; ZOGLAUER, A. C.; WUNDERER, C. B.;
SAMPLE, J. G.; TURIN, P.; McBRIDE, S.; SMITH, D. M.; TAJIMA, T. H.; LUKE, P. N.; AMMAN,
M. S. "The Gamma-Ray Imager/Polarimeter for Solar Flares (GRIPS)". American Geophysical
Union, Fall Meeting, abstract SM11B-1602 (2008). ***SPIE/AGU***

SIEGEL, P. H. "THz Technology: An Overview", International Journal of High Speed Electronics and Systems, 13, no. 2, 1-44, 2003.

STRABALA, K. I.; ACKERMAN, S. A.; MENZEL, W. P., "Cloud Properties Infrared from 8-12µm Data". Journal of Applied Meteorology, 33, 212, 1994. SWART, J. W., "Semicondutores - Fundamentos, técnicas e aplicações", Editora Unicamp, pp 25-39, Book Chapter.

TEXEREAU, J. "How to make a Telescope", 2th English Edition (Wilmann-Bell Inc., Richmond, VA, 1984). pp. 139 – 175 Book chapter.

VIAL, J.-C.; AUCHÈRE, F.; CHANG, J.; FANG, C.; GAN, W. Q.; KLEIN, K. -L.; PRADO, J.-Y.; ROUESNEL, F.; SÉMERY, A.; TROTTET.; G.; WANG, C., "SMESE (SMall Explorer for Solar Eruptions): A microsatellite mission with combined solar payload", Advances in Space Research. 41, 183-189, 2008.

WILLIAMS, G. P. "FAR-IR/THz radiation from the Jefferson Laboratory, energy recovered linac, free electron laser", Rev. Sci. Instrum., 73, 1461-1463, 2002.

ENDEREÇOS DA INTERNET / ARQUIVOS

TYDEX, 2008 Endereço da internet: http://www.tydexoptics.com/pdf/THz_Low_Pass_Filter.pdf, último acesso em 24.10.2012.

BLACKBODY CALCULATOR, 2012 Endereço da internet: http://www.spectralcalc.com/blackbody_calculator/blackbody.php, último acesso em 24.10.2012. http://www.spectralcalc.com/blackbody_calculator/

CST Microwave Studio Endereço da internet: www.cst.com último acesso em 24.10.2012.

INO, 2008 Endereço da internet: http://www.ino.ca/en-CA

último acesso em 24.10.2012.

SPECTRUM, 2009 Endereço da internet: http://www.spectrumdetector.com último acesso em 24.10.2012.

TYDEX, 2009 Endereço da internet: http://www.tydexoptics.com/products1/thz_optics/golay_cell/ http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf

THORLABS, 2009 Endereço da internet: http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=287 último acesso em 24.10.2012.

EPOC, 2009 Endereço da internet: http://www.eopc.com/ch10_ch20.html#CH-10 último acesso em 24.10.2012.

PSPICE, 2012 Endereço da internet: http://www.cadence.com/products/orcad/pspice_simulation/Pages/default.aspx último acesso em 24.10.2012.

SDO, 2013 Endereço da internet: http://www.sdo.gsfc.nasa.gov

SOLARMONITOR, 2013 Endereço da internet http://www.solarmonitor.org 86 Universidade Estadual de Campinas

Apêndice A

Processo de Fabricação das Malhas

O processo de fabricação foi desenvolvido no Centro de Componentes Semicondutores (CCS) na Universidade Estadual de Campinas. Foi utilizado substrato de Silício, previamente preparado com filme de titânio (Ti – 200 Å) e ouro (Au – 1 μ m). Este substrato é preparado com filme de ouro devido à boa condutividade para eletrólise com níquel. A camada de titânio é usada para melhorar a adesão ao ouro. A litografia foi feita usando um fotoresiste SU-8/10, com diluição adequada para resiste com espessura de 10 µm, depositado a 2500 r.p.m., resultando em um filme de fotoresiste com espessura de 10 µm. Este filme depositado está relacionado com a espessura desejada da malha metálica. A amostra obtida foi submetida a um processo de cura (pre-bake) em placa quente, primeiro em 65 graus Celsius por 3 minutos, e em seguida em 90 graus Celsius por 5 minutos. Em seguida fotoresiste exposto à radiação ultravioleta em alinhadora MJB-3 da Carls Suss por 16 segundos, usando potência de 190 Watts em regime de potência constante, juntamente com uma máscara para sensibilizarmos apenas a região onde o fotoresiste deveria ser retirado da lâmina. Novamente realizado cura do resiste, primeiro 1 minuto em 65 graus Celsius, em seguida 2 minutos em 90 graus Celsius. Depois de feita a revelação em revelador próprio para SU-8 durante 3 minutos. Lava-se a amostra com álcool isopropílico e água. Seca-se a amostra e inspeciona se existe necessidade de nova revelação. Para estabilizar o resiste é feito um último bake por 15 minutos a 90 graus Celsius. Em seguida foi feita a eletrólise em uma solução com sulfeto de níquel, níquel cloro, acido bórico, e água, com densidade de corrente de 3A/cm², que depende do cálculo da área e da espessura. Nesta fase ocorre a deposição do níquel e a formação da malha junto à superfície da lâmina. A última etapa do processo é a corrosão. Para remoção do fotoresite utiliza-se ácido sulfúrico aquecido a 80 graus Celsius. Para remoção do oxido de silício, utiliza-se a solução buffer de HF durante 12 horas. Em seguida é feito o "*peeling*" do níquel, puxando com ajuda de uma pinça. Remoção do Ouro em solução baseada em cianeto de potássio do filme de níquel já removido do substrato. Caracterização da amostra quanto a defeitos e medidas das dimensões principais.

Anexo - Publicações

KAUFMANN, P., Marcon, R., GIMENEZ DE CASTRO, C. G., CORREIA, E., FERNANDES, L. O. T., GODOY, R., Marun, A.," H-alpha dynamic solar flare counterparts at sub-THz and microwave of the 8 February 2010 M2.2 GOES X-ray burst" In: AGU - The Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguassu. **AGU - The Meeting of the Americas**, 2010.

AGU Americas

H-alpha dynamic solar flare counterparts at sub-THz and microwaves of the 8 February 2010 M2.2 GOES X-ray burst

Pierre Kaufmann[1,2] Rogério Marcon[3,4] C. Guillermo Giménez de Castro[1] Emilia Correia[1,5] Luis Olavo Fernandes[1] Rodolfo Godoy[6] Adolfo Marun[6]

 CRAAM, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brazil

[2] CCS, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil

[3] IFGW, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil

[4] Observatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, Brazil

[5] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brazil

[6] Complejo Astronômico El Leoncito, CONICET, San Juan, Argentina

We report the observations at sub-THz by the solar submillimeter telescope (SST) (212 and 405 GHz), at microwaves by the Itapetinga 7 GHz solar patrol polarimeter, and at H-alpha by the "Bernard Lyot" Solar Observatory refractor of the solar soft X-ray burst GOES class M2.0 in February 8, 2010. A small sub-THz burst (30 SFU at 0.4 THz and < 2 SFU at 0.2 THz) was observed at 13 32 UT, at the start time of the X-ray burst and the first sudden H-alpha brightening 13 32-13 40 UT. It corresponded to a small 5 SFU 7 GHz rise-and-fall. One impulsive 7 GHz burst started at 13 43 UT in correspondence to a brighter H-alpha event, both at about the maximum of the soft X-ray emission. These phenomena were followed minutes later by the upward ejection of dark chromosphere material as shown in the H-alpha movie. The ejection originated from the same site where the initial brightening was observed. The time sequence of observed emissions indicates that the sub-THz and microwave bursts were independent in time and suggest that the sub-THz event was related to the original energy injection giving rise to the following flare manifestations.

KAUFMANN, P., Raulin, J.-P., HOLMAN, G. D., SU, Y., GIMENEZ DE CASTRO, C. G., CORREIA, E., FERNANDES, L. O. T., SOUZA, R. V., GODOY, R., Marun, A., "Solar Flare Emission at X-Rays, Submm-waves, Microwaves and Decameter wavelengths Detected on 20 January 2010 GOES M3.4 event" In: AGU - The Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguassu. **AGU - The Meeting of the Americas**., 2010.

AGU Americas

Solar flare emissions at X-rays, Submm-waves, Microwaves and Decameter wavelengths detected on 20 January 2010 GOES M3.4 event

Pierre Kaufmann [1,2] Jean-Pierre Raulin[1] Gordon D. Holman[3] Yang Su[3,4,5] C. Guitlermo Giménez de Castro[1] Emilia Correia[1,6] Luis Olavo Fernandes[1] Rodney V. de Souza[1] Rodolfo Godoy[7] Adolfo Marun[7]

 CRAAM, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brazil

[2] CCS, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil

[3] NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA

[4] The Catholic University of America, Washinbgton, DC, USA

[5] Purple Mountain Observatory, Nanjing, China

[6] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brazil

[7] Complejo Astronômico El Leoncito, CONICET, San Juan, Argentina

The soft X-rays GOES class M3.4 burst, detected on January 20, 2010, was well observed at X-rays by RHESSI, at submm-waves by SST, at several microwaves frequencies by USAF RSTN, at 7 GHz by the Itapetinga polarimeter, and at m-dm wavelength and by the WAVES dynamic spectrograph on STEREO. It corresponded to a limb subflare at AR 1041. The RHESSI X-rays began to rise around 17 52 UT with a 25-50 keV impulsive peak at 17 53:45 UT, close to the start time of a microwave impulsive burst peaking at about 17 54 UT with spectral maximum at 5 GHz. Despite the presence of large sky attenuation on that day, it was possible to detect the burst emission at both SST frequencies, 212 and 405 GHz. There were well detected pulsations at 212 GHz, with amplitude of about 40 SFU. superimposed to a suggested rise-and-fall enhancement between 17 50 - 18 00 UT. emitting about 400 SFU at 405 GHz and 50 SFU at 212 GHz. Pulsations were not well defined at 405 GHz due to spurious atmosphere transmission fluctuations. A remarkable weak but well defined rapid time structure was detected during the decayed phase of the impulsive burst, at about 18 03 UT, being observed simultaneously at 212 (50 SFU), 405 (100 SFU) and 7 GHz (3 SFU), with a suggestive correspondence to a weak Type III burst detected by WAVES/STEREO.

KAUFMANN, P., Marcon, R., Kudaka, A.S., CASSIANO, M. M., FERNANDES, L. O. T., Marun, A., PEREYRA, P., GODOY, R., Bortolucci, E., Zakia, M. Beny, Diniz, J.A., Silva, A.M. Pereira Alves da, Timofeevsky, A.V., Nikolaev, V.A. "Uncooled detectors of continuum terahertz radiation". Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications., v.10, p.288 - 294, 2011.

Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 10, No. 1, June 2011 288

Uncooled Detectors of Continuum Terahertz Radiation

P. Kaufmann

Universidade Presbiteriana Mackenzie, CRAAM – Escola de Engenharda, São Paulo, SP, Brazil, and Universidade Estadual de Campinas, CCS – Centro de Componentes Semicondutores, Campinas, SP, Brazil, pierrekau@gmail.com R. Marcon

Universidade Estadual de Campinas, IFGW, Campinas, SP, Brazil and Observatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, SP, Brazil, rmarcon@mpcnet.com.br

A.S. Kudaka, M. M. Cassiano, L.O.T. Fernandes

Universidade Presbiteriana Mackenzie, CRAAM – Escola de Engenharia, São Paulo, SP, Brazil, kudaka@mackenzie.br

A. Marun, P. Pereyra, R. Godoy

Complejo Astronomico El Leoncito, CONICET San Juan, Argentina, amarun@casleo.gov E. Bortolucci, M. Beny Zakia, J.A. Diniz, A.M. Pereira Alves da Silva Universidade Estadual de Campinas, CCS – Centro de Componentes Semicondutores, Campinas, SP, Brazil,

emilio@ccs.unicamp.br A.V. Timofeevsky, V.A. Nikolaev

Tydex J.S. Co, St. Petersburg, Russia, alexandertymofeevsky@tydex.ru

Abstract- THz continuum spectral photometry has new and unique applications in different civil and military areas presenting a number of distinctive advantages on the well known microwaves or mid- to near-infrared technologies. THz sensing is essential to investigate the emission mechanisms by high energy particle acceleration processes. Technical challenges appear to diagnose radiation produced by solar flare burst emissions measured from space as well as radiation produced by high energy electrons in laboratory accelerators, THz filters and detectors have been investigated for the construction of solar flare high cadence radiometers to operate outside the terrestrial atmosphere. Experimental setups have been assembled for testing THz continuum radiation response from distinct detectors: adapted commercial microbolometer array, pyroelectric module, and optoacoustic (Golay cell). The results permitted the final design of a THz double radiometer using Golay cells to be flown in stratosphere balloon missions.

Index Terms- Far IR continuum spectral photometry, THz radiometers, THz sensors, Solar THz radiation

I. INTRODUCTION

Technologies for photometry and imaging in the THz range (arbitrarily 0.1 – 30 THz) are in full expansion for a variety of new and unique applications in different civil and military areas presenting a number of distinctive advantages on the well known microwaves or mid- to near-infrared technologies. THz radiation propagates well through cloth, dust and fog [1,2,3]. Sensing in this range

KAUFMANN, P., Marcon, R., KUDAKA, A. S., CASSIANO, M. M., FERNANDES, L. O. T., Marun, A., PEREYRA, P., GODOY, R., Bortolucci, E. C., ZAKIA, M. B., DINIZ, J. A., SILVA, A. M. P. A. "Uncooled Detectors of Continuum Terahertz Radiation", In: MOMAG 2010 – 14^o SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 9^o CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2010, Vila Velha. **MOMAG 2010 – 14^o** SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 9^o CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2010, Vila Velha. **MOMAG 2010 – 14^o** SBMO – Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 9^o CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2010.

Uncooled Detectors of Continuum Terahertz Radiation

P. Kaufmann Universidade Presbiteriana Mackenzie CRAAM – Escola de Engenharia São Paulo, SP, Brazil Universidade Estadual de Campinas CCS – Centro de Componentes Semicondutores Campinas, SP, Brazil R. Marcon Universidade Estadual de Campinas IFGW Campinas, SP, Brazil Observatório Solar "Bernard Lyot" Campinas, SP, Brazil A.S. Kudaka, M.M. Cassiano, L.O.T. Fernandes Universidade Presbiteriana Mackenzie CRAAM - Escola de Engenharia São Paulo, SP, Brazil A.Marun, P. Pereyra, R. Godov Complejo Astronomico El Leoncito CONICET San Juan, Argentina E. Bortolucci, M.Beny Zakia, J.A. Diniz, A. M. Pereira Alves da Silva Universidade Estadual de Campinas CCS - Centro de Componentes Semicondutores Campinas, SP, Brazil A.V. Timofeevsky, V.A Nikolaev Tydex J.S. Co St. Petersburg, Russia

Abstract - THz continuum spectral photometry has new and unique applications in different civil and military areas presenting a number of distinctive advantages on the well known microwaves or mid- to near-infrared technologies. THz sensing is essential to investigate the emission mechanisms by high energy particle acceleration processes. Technical challenges appear to diagnose radiation produced by solar flare burst emissions measured from space as well as radiation produced by high energy electrons in laboratory accelerators. THz filters and detectors have been investigated for the construction of solar flare high cadence radiometers to operate outside the terrestrial atmosphere. Experimental setups have been assembled for testing THz continuum radiation response from distinct detectors: adapted commercial microbolometer array, pyroelectric module and Golay cell.

Keywords- THz radiometers, THz sensors, Solar THz radiation

I. INTRODUCTION

Technologies for photometry and imaging in the THz range (arbitrarily 0.1 - 30 THz) are in full expansion for a variety of new and unique applications in different civil and military areas presenting a number of distinctive advantages on the well known microwaves or mid- to near-infrared technologies. THz radiation propagates well through cloth, dust and fog [1,2,3]. Sensing in this range is proving to be particularly useful to determine internal characteristics of materials. In the search for drugs, mines and explosive materials. New Partially funded by Brazilian agencies FAPESP, CNP4, CNP4/INCT-NAMITEC and Mackpesquisa, and Argentina agency CONICET. biological and medical THz imaging applications are far reaching. Aerospace THz remote sensing applications include new approaches to determine atmospheric inhomogeneities and cloud characteristics [4,5,6].

Photometry and imaging at THz frequencies have important application in the diagnostics of radiation produced by high energy electrons, observed in laboratory accelerators [7] as well as by thermal and non-thermal space plasmas [8,9]. Solar flare accelerates electrons to high energies. Their radiation by synchrotron mechanism predicts intense fluxes in the far IR or THz range of frequencies [10]. The radiometry of temperature enhancements above a pre-existent bright level - as it is the case of flare radiation excess over the solar disk intense emission - requires the effective suppression of the incoming visible and near-infrared (NIR) radiation. This has be accomplished with the use of a number of THz low-pass filters [11], consisting in a combination of rough surface mirrors [12,13,14] and commercially available membranes [15,16]. We present the performance of distinct uncooled sensors in response to black body THz radiation for different sensors: microbolometer array, pyroelectric module and Golay cell.

II. TEST OF UNCOOLED THZ DETECTORS

A. Adapted microbolometer array

A custom-made detector consisted in a room-temperature vanadium oxide micro-bolometer focal plane array (FPA) camera IRM 160 A with HRFZ-Si THz window provided by INO Company, Quebec, Canada [17]. The camera total-power

KAUFMANN, P., Marcon, R., Marun, A., KUDAKA, A. S., Bortolucci, E. C., ZAKIA, M. B., DINIZ, J. A., CASSIANO, M. M., PEREYRA, P., GODOY, R., TIMOFEEVSKY, A. V., NIKOLAEV, V. A., SILVA, A. M. P. A., FERNANDES, L. O. T. Selective Spectral Detection of Continuum Terahertz Radiation In: SPIE, 2010, San Diego. **Proceedings - SPIE**., 2010. v.7741. p.25-1 - 25-10

Selective Spectral Detection of Continuum Terahertz Radiation

P. Kaufmann^{a,b}, R. Marcon^{c,d}, A. Marun^e, A.S. Kudaka^a, E. Bortolucci^b, M.Beny Zakia^b, J.A. Diniz^b, M.M. Cassiano^a, P.Pereyra^e, R. Godoy^e, A.V. Timofeevsky^f, V.A Nikolaev^f, A. M. Pereira Alves da Silva^b, L.O.T. Fernandes^a

^a CRAAM – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brazil.
^b CCS – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil.

° Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil.

^d Observatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, SP, Brazil.

° Complejo Astronômico El Leoncito, CONICET, San Juan, Argentina

^f Tydex J.S. Co, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

The knowledge of THz continuum spectra is essential to investigate the emission mechanisms by high energy particle acceleration processes. Technical challenges appear for obtaining selective spectral sensing in the far infrared range to diagnose natiation produced by solar flare burst emissions measured from space as well as radiation produced by high energy electrons in laboratory accelerators. Efforts are been carried out intended for the development of solar flare high cadence radiometers at two THz frequencies to operate outside the terrestrial atmosphere (i.e. at 3 and 7 THz). One essential requirement is the efficient suppression of radiation in the visible and near infrared. Experimental setups have been assembled for testing (a) THz transmission of "low-pass" filters: rough surface mirrors; membranes Zitex G110G and TydexBlack; (b) a fabricated 2.4 THz resonant grid band-pass filter transmission response for polarization and angle of incidence; (c) radiation response from distinct detectors: adapted commercial microbolometer array using HRFZ-Si window, pyroelectric module and Golay cell; qualitative detection of solar radiation at a sub-THz frequency has been tested with a microbolometer array placed at the focus of the 1.5 m reflector for submillimeter waves (SST) at El Leoncito, Argentina Andes.

Keywords: THz radiometers, THz low-pass filters, THz sensors, Solar THz radiation

1. INTRODUCTION

Technologies for photometry and imaging in the THz range (arbitrarily 0.1 - 30 THz) are in full expansion for a variety of new and unique applications in different civil and military areas presenting a number of distinctive advantages on the well known microwaves or mid- to near-infrared technologies. THz radiation propagates well through cloth, dust and fog^{1,2,3}. Sensing in this range is proving to be particularly useful to determine internal characteristics of materials, in the search for drugs, mines and explosive materials. New biological and medical THz imaging applications are far reaching. Aerospace THz remote sensing applications include new approaches to determine atmospheric inhomogeneities and cloud characteristics^{45,6}.

Photometry and imaging at THz frequencies have important application in the diagnostics of radiation produced by high energy electrons, observed in laboratory accelerators⁷ as well as by thermal and non-thermal space plasmas^{8,9}. Solar flare accelerates electrons to high energies. Their radiation by synchrotron mechanism predicts intense fluxes in the far IR or THz range of frequencies¹⁰. We are currently characterizing materials and subsystems needed to assemble THz radiometers to be used in solar flare observations at discrete frequencies from the ground through the atmosphere 0.4 THz "window" at a high altitude site, and from space at 3 THz and 7 THz. One essential requirement to perform these measurements is the effective suppression of incoming visible and near infra-red (NIR) radiation. This can be obtained using a number of THz low-pass filters¹¹. We present the experimental developments of low-pass filters using rough surface mirrors^{12,13,14} and commercially available membranes: Zitex G110 G¹⁵ and TydexBlack¹⁶. A new set of resonant

Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V, edited by Wayne S. Holland, Jonas Zmuidzinas, Proc. of SPIE Vol. 7741, 774125 © 2010 SPIE - CCC code: 0277-786W10/\$18 · doi: 10.1117/12.856930

Proc. of SPIE Vol. 7741 774125-1

KAUFMANN, Pierre, Marcon, Rogério, Giménez de Castro, C. Guillermo, White, Stephen M., Raulin, Jean-Pierre, Correia, Emilia, Fernandes, Luis Olavo, de Souza, Rodney V., Godoy, Rodolfo, Marun, Adolfo, PEREYRA, Pablo, "SUB-THz AND Hα ACTIVITY DURING THE PREFLARE AND MAIN PHASES OF A. GOES CLASS M2 EVENT" The Astrophysical Journal., v.742, p.106 - 110, 2011.

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 742:106 (5pp), 2011 December 1 (5 2011. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A. doi:10.1088/0004-637X/742/2/106

SUB-THZ AND Ha ACTIVITY DURING THE PREFLARE AND MAIN PHASES OF A GOES CLASS M2 EVENT

PIERRE KAUFMANN^{1,2}, ROGÉRIO MARCON^{3,4}, C. GUILLERMO GIMÉNEZ DE CASTRO¹, STEPHEN M. WHITE⁵,

JEAN-PIERRE RAULIN¹, EMILIA CORREIA^{1,6}, LUIS OLAVO FERNANDES¹, RODNEY V. DE SOUZA¹,

RODOLFO GODOY⁷, ADOLFO MARUN⁷, AND PABLO PEREYRA

CRAAM, Escola de Engenharia, Universidade Preshiteriana Mackenzie, São Paulo, Brazil

CCS, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil ³IFGW, Universidade Estadual de Campinas, Brazil

⁴ Observatório Solar Bernard Lyot, Campinas, Brazil

³ AFRL, Space Vehicles Directorate, Albuquerque, NM, USA Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brazil

Complejo Astronômico El Leoncito, CONICET, San Juan, Argentina

Received 2011 April 1; accepted 2011 October 12; published 2011 November 14

ABSTRACT

Radio and optical observations of the evolution of flare-associated phenomena have shown an initial and rapid burst at 0.4 THz only followed subsequently by a localized chromospheric heating producing an Ha brightening with later heating of the whole active region. A major instability occurred several minutes later producing one impulsive burst at microwaves only, associated with an M2.0 GOES X-ray flare that exhibited the main Hα brightening at the same site as the first flash. The possible association between long-enduring time profiles at soft X-rays, microwaves, $H\alpha$, and sub-THz wavelengths is discussed. In the decay phase, the $H\alpha$ movie shows a disrupting magnetic arch structure ejecting dark, presumably chromospheric, material upward. The time sequence of events suggests genuine interdependent and possibly non-thermal instabilities triggering phenomena, with concurrent active region plasma heating and material ejection.

Key words: Sun: activity - Sun: flares - Sun: radio radiation - Sun: X-rays, gamma rays

1. INTRODUCTION

The time and space relationship between flares observed in Ha and associated bursts at X-ray and radio wavelengths can bring physical insights on the destabilization of an active region leading to the flaring processes. It is generally accepted that the soft X-ray bursts are due to heated plasma that is usually associated with flares identified as Ha brightening and radio bursts (Zirin 1988, and references therein). Evidence for such associations is dependent on the sensitivity of the measuring devices as well as on the time resolution of observations. On the other hand, the association with sub-THz emissions is still poorly known for phenomena at low levels of activity.

The 2010 February 8, GOES M2.0 class solar burst (13:32-13:47-13:50 UT) provided a rare opportunity to compare an Ha flare image sequence obtained with moderate cadence (one frame every 10 s) to activity at sub-THz, microwaves, and soft X-rays. We analyze flaring activity accompanying the burst in the active region AR11045, located at 0 UT heliographic coordinates N23W01 (NOAA 2010), during the time period within about ±15 minutes of the X-ray burst peak time (13:47 UT). We draw attention to discrepancies between the AR and flare location reported by NOAA for this event, adopted here, and the reports from Solar Monitor (2010) and the SolarSoft list (2010). The latter two sources omitted the 13:32 UT event. The Solar Monitor reported an AR position for February 8 that corresponded to the location attained by 11045 on the following day at 0 UT (i.e., on February 9). However all solar disk images, from all sources, confirm that the AR was near the central meridian at times close to 0 UT of February 8.

Ha observations were obtained at "Bernard Lyot" Solar Observatory, Campinas, SP, Brazil (Marcon 2009). The 0.2 and 0.4 THz observations were obtained by the Solar Submillimeter

Telescope (SST), San Juan, Argentina (Kaufmann et al. 2010). Microwave observations were obtained at several frequencies by USAF RSTN monitoring network (Guidice 1979) and by high-sensitivity 7 GHz polarimeter observations at Itapetinga, Atibaia, Brazil (Kaufmann 1971; Correia et al. 1999).

2. THE 2010 FEBRUARY 8 SOLAR FLARE

We show in Figure 1 the AR1045 sunspot group in a Solar and Heliospheric Observatory/Michelson Doppler Imager (SOHO/MDI) continuum solar image of the disk obtained at 12:10 UT (NASA 2010). The SST beams on the active region are shown with four 0.2 THz 4 arcmin diameter beams (labeled 1-4) and two 0.4 THz 2 arcmin diameter beams (labeled 5 and 6). Beams 2, 3, 4, and 5 are pointing at preselected coordinates of the active region, while beams 1 and 6 are 8 arcmin off source. The position of the sub-THz bursts relative to the SST antenna beams is inferred from the comparison of relative excess antenna temperatures measured at 0.2 THz by beams 2, 3, and 4 (Georges et al. 1989; Giménez de Castro et al. 1999). The positions are determined for every data point throughout the event duration. The position of the burst relative to the cluster of beams does not depend on the antenna pointing and tracking accuracy. This means that the antenna temperatures corrected for the source angular displacements with respect to the beams are independent of the accuracy of the pointing of the cluster of beams on the solar disk. The absolute uncertainty of the location of the cluster of the sub-THz beams on the solar disk is known to be better than 0.5 arcmin (Kaufmann et al. 2010). This uncertainty is represented by the length of the cross arms in Figure 1, indicating a burst position at one time. The rectangular frame corresponds to the first Ha movie frame, obtained at 13:26:42 UT, shown in Figure 2. The angular scale of the field shown in Figure 2 is 126" × 174". Figure 3 shows time profiles at several wavelengths (X-ray,

KAUFMANN, P., ZAKIA, M. B., Bortolucci, E. C., DINIZ, J. A., FERNANDES, L. O. T., GODOY, R., KUDAKA, A. S., Marcon, R., Marun, A., SILVA, A. M. P. A., TIMOFEEVSKY, A. V. "Fotometria e Imageamento na Banda THz do Espectro" In: V Workshop Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Micro e Nanoeletrônicos, 2011, Campinas - SP.



Fotometria e Imageamento na Banda THz do Espectro

CAUFMANN, P. ^{1,2}, BENY ZAKIA, M.², BORTOLUCCI, E. C.², DINIZ, J. A.², FERNANDES, L. O. T. ^{1,2}, GODOY, R. ³, KUDAKA, A. S. ¹, MARCON, R. ⁴, MARUN, A.³, NICOLAEV, V.A.⁴, PEREIRA ALVES DA STLVA, A.M.² TIMOFEEVSKI, A.V.⁶
³ Escola de Engenharia, Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie - CRAM, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil, pierrekau@gmail.com
² Centro de Componentes Semicondutores, Universidade Estaduai de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil ³ Complejo Astronómico El Leoncto - CASLEO, CONICET, San Juan, Argentina ⁴ Instituto de Física 'Giebe Wataghin', Universidade Estaduai de Campinas, SP, Brasil ⁵ Observatório Solar' Bernard Lyd?, Campinas, SP, Brasil ⁶ Tydex J.S. Co, St. Petersburg, Russia

RESUMO

As pesquisas e desenvolvimentos em 2010 objet caracterização protótipos originais de fotômetros THz projetados para a medida de regiões explosivas no disco solar, a partir do solo e em plataformas espaciais transportadas

FILTROS PASSA-BANDA

Um novo conjunto de filtros passa-banda a maiha metálica ressonante foi simul para a frequencia centrol de 2.4 THz (a) fabricado (b), e testado para transmis em montagem sanduiche com TTX (material janela para THz) e Tydexbi (membrana filtro passa-baixo) (c), para vários ângules de polarização (d) e p diferencia fingulas de incidência (e).



PROTÓTIPO DE FOTOMETRO E FONTE PARA TESTES THZ









RESPOSTAS EM TEMPERATURA



eanna 30 THz (10 µm) com dicco de Ge a atenuador de polietileno; (b) para 15 THz, com filtro passa-baixo TydexBlack; (c) em 3 THz, com filtro passa-da a maiña metálica ressonante; (d) em 10 THz, com filtro passa-banda a 1a metálica ressonante. (a) Banda 30 THz (10 µm) com disco de Ge a atens f <15 THz, com filtro passa-baixo TydexBlack; (c)

EXPERIMENTO ESPACIAL SOLAR-T

75 mm Cassegrain telescop Golav cells



Fotômetro duplo para 3 e 7 THz, aberturas com refletores runosos, detectores de Golsy precedidos de membrana Tydexillack, malha ressonante, chopper. Propostos para observações solarise em baldes estratosféricos de longa durações (1) junto com experimento (GRIPS, Universidade da California, Berkeley (USA e Antartica, 2012-2013); (II) com Instituto Lebedev de Física de Moscou (Rússia, 2013-2016)

CONICET

AFOSR 3

FERNANDES, L. O. T. ; KAUFMANN, P. ; Marcon, R. ; KUDAKA, A. S. ; Marun, A. ; GODOY, R. ; Bortolucci, E. C. ; ZAKIA, M. B. ; DINIZ, J. A. . Photometry of THz Radiation using Golay Cell Detector. In: VI Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology SEMINATC, 2011, Campinas.



FERNANDES, L. O. T., KAUFMANN, P., Marcon, R., KUDAKA, A. S., Marun, A., GODOY, R., Bortolucci, E. C., ZAKIA, M. B., DINIZ, J. A. Photometry of THz Radiation using Golay Cell Detector In: Proc. XXX **Union Radio-Scientifique Internationale** - URSI - GA, Paper JP2.10, 2011, Istanbul, Turkey.

Photometry of THz Radiation using Golay Cell Detector

L. O. T. Fernandes^{1,2}, P. Kaufmann^{1,3}, R. Marcon^{3,4}, A. S. Kudaka¹, A. Marun⁵, R. Godoy⁵, E. C. Bortolucci², M. Beny Zakia², J. A. Diniz²

¹Escola de Engenharia, Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie – CRAAM, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brazil (olavo@craam.mackenzie.br)

²Centro de Componentes Semicondutores, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brazil

³Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brazil

"Observatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, SP, Brazil

⁵Complejo Astronómico El Leoncito - CASLEO, CONICET, San Juan, Argentina

Abstract

The measurement of THz radiation in the continuum presents new technical challenges concerning materials, frequency filters and detection devices. We present the first results of a radiometric system using Golay cell as a detector, for the whole < 15 THz range, and at discrete frequencies centered at 2, 10 and 30 THz. The system was designed to measure solar THz radiation. It is capable to detect small solar bursts, with a large dynamic range to be able to detect larger events.

1. Introduction

Photometry and imaging in the terahertz range (frequency interval between 0.1 and 30 THz) require technologies for a new generation of devices, designed to operate in many applications including civil, military, medical, and scientific areas. Remote sensing at terahertz frequencies is able to search for hidden objects, see through materials, determine compositions, and other applications. A new multidisciplinary science is been developed to combine sensors, detectors, and filters, to work in this range of frequency. During the past years, we carried up several tests addressed to THz materials, filters, and detectors.

The Solar Submillimeter-wave Telescope (SST) located at Argentina Andes [1], operating at 0.2 and 0.4 terahertz, has discovered a new solar burst spectral component during flares, exhibiting fluxes increasing for smaller wavelengths, separated from the well known microwave component [2]. Solar activity observations in the terahertz range will lead us to better understand the emission mechanisms by high energy particle acceleration processes. Continuum spectral photometry is essential to diagnose the emission component found at THz frequencies. This component might be the evidence of synchrotron emission from high energy electrons peaking somewhere in the far infrared range. THz photometry can only be done outside the terrestrial atmosphere, which is opaque at that range [3].

We developed a terahertz photometry test assembly to characterize the system response at THz frequency ranges $\lambda > 20 \ \mu m$ (f < 15 THz), 2 THz, 10 THz, and 30 THz, using an opto-acoustic detector (Golay cell). The setup is composed by two distinct parts: that blackbody radiation source and the radiometer prototype system, shown in Fig. 1. The left part of the assembly simulates the solar disk. The first prototype experiments were done at El Leoncito Observatory, San Juan, Argentina as part of a collaboration research conducted by Brazil groups: Mackenzie Presbyterian University, Semiconductors Component Center, Unicamp, and "Bernard Lyot" Solar Observatory.

This was the result of several developments carried out to characterize THz filters, materials, and detectors [4, 5]. They were intended to design a THz photometer to operate outside the terrestrial atmosphere (Solar-T Experiment). The Tydex Golay cell detector has been selected as the most sensitive in comparison to others that were tested (pyroelectric and micorbolometer [4, 5]). This photometry has been also used in the 30 THz mid-IR (i.e., VALIO, A., KAUFMANN, Pierre, Giménez de Castro, C. Guillermo, Raulin, J.-P., Fernandes, L.O.T., Marun, A., "Solar Patrol Polarization Telescopes at 45 and 90 GHz: POEMAS" In: International Astronomical Union - XXVIII G.A., 2012, Beijing. General Assembly of the International Astronomical Union., 2012.

Solar Patrol Polarization Telescopes at 45 and 90 GHz

Adriana Valio¹, Pierre Kaufmann^{1,2}, C. Guillermo Giménez de Castro¹, Jean-Pierre Raulin¹, Luis Olavo T. Fernandes^{1,2}, Adolfo Marun³

¹ CRAAM, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil

²CCS, Universidade Estadual de Campinas, Brasil

³ CASLEO, CONICET, Argentina

The spectra of solar flares provide important information about the physics involved in the flaring process. Presently, however, there is a large frequency gap at radio frequencies between 20 and 200 GHz. Unfortunately, this gap hinders the determination of important flare parameters such as: (i) the frequency of the peak of the spectra, or turnover frequency, which yields the magnetic field intensity in the flaring source and electron density; (ii) the optically thin frequency slope, that is related to the accelerated electrons with a power-law energy distribution, allowing information about the acceleration mechanism; (iii) and other physical parameters such as source size and inhomogeneities that may also be estimated from spectra with complete spectral coverage. Recently a new spectral component at high frequencies was discovered with fluxes increasing above 200 GHz, distinct from the traditional microwave component, with peak frequencies at about 10 GHz. To elucidate the nature of both components and fully characterize the spectra of solar flares, we analyze new observations at the intermediate frequencies obtained by two antennas with receivers at 45 and 90 GHz, capable of measuring circular polarization. The telescope, installed at CASLEO Observatory (Argentina), is described in detail. We also analyze the observations of the flares it has already detected, including their spectra especially when data at 212 and 405 GHz from the Solar Submillimeter Telescope (SST), located at the same site, is available.

Marcon, Rogerio, KAUFMANN, Pierre, Fernandes, Luis Olavo T., Godoy, Rodolfo, Marun, Adolfo, Bortolucci, Emilio C., Zakia, Maria Beny, Diniz, José Alexandre, Kudaka, Amauri S. "Terahertz Photometer to Observe Solar Flares in Continuum." **Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves.**, v.33, p.192 - 205, 201

J Infrared Milli Teraliz Wayes (2012) 33:192-205 DOI 10.1007/s10762-011-9866-6

Terahertz Photometer to Observe Solar Flares in Continuum

Rogerio Marcon • Pierre Kaufmann • Luis Olavo T. Fernandes • Rodołfo Godoy • Adolfo Marun • Emilio C. Bortolucci • Maria Beny Zakia • José Alexandre Diniz • Amauri S. Kudaka

Received: 13 October 2011 / Accepted: 9 December 2011 / Published online: 29 December 2011 © Springer Science+Business Media, LLC 2011

Abstract Solar observations at sub-THz frequencies detected a new flare spectral component peaking in the THz range, simultaneously with the well known microwaves component, bringing challenging constraints for interpretation. Higher THz frequencies observations are needed to understand the nature of the mechanisms occurring in flares. A THz photometer system was developed to observe outside the terrestrial atmosphere on stratospheric balloons or satellites, or at exceptionally transparent ground stations. The telescope was designed to observe the whole solar disk detecting small relative changes in input temperature caused by flares at localized positions. A Golay cell detector is preceded by low-pass filters to suppress visible and near IR radiation, a band-pass filter, and a chopper. A prototype was assembled to demonstrate the new concept and the system performance. It can detect temperature variations smaller than 1 K for data sampled at a rate of 10%, smoothed for intervals larger than 4 s. For a 76 mm aperture, this corresponds to small solar burst intensities at THz

R. Marcon

P. Kaufmann (E3) Center of Radio Astronomy and Astrophysics, Engineering School, Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, Brazil e-mail: pierrekau@gnail.com

P. Kaufmann

Center of Semiconductor Components, State University of Campinas, Campinas, Brazil

E. C. Bortolucci - M. B. Zakia - J. A. Diniz Center of Semiconductor Components, State University of Campinas, Campinas, Brazil

L. O. T. Fernandes⁺ A. S. Kudaka Center of Radio Astronomy and Astrophysics, Engineering School, Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, Brazil

R. Godoy - A. Marun El Leoncito Astronomical Complex, San Juan, Argentina

Springer

R. Marcon

[&]quot;Gleb Wataghin" Physics Institute, State University of Campinas, Campinas, Brazil

[&]quot;Bernard Lyot" Solar Observatory, Campinas, Brazil

KAUFMANN, P., Correia, Emilia, FERNANDES, L. O. T., Giménez de Castro, C. Guillermo, Kudaka, A.S., Raulin, Jean-Pierre, R. Marcon, Bortolucci, Emilio C., Diniz, J.A.,Zakia, Maria Beny, Nikolaev, V.A., Timofeevsky, A.V. "The development of THz Photometers to observe solar flares from a stratospheric platform" In: **15º SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**, 2012, João Pessoa / PB.



Marcon, Rogério, KAUFMANN, Pierre, FERNANDES, L. O. T., Godoy, Rodolfo, A., M., Bortolucci, Emilio C., Zakia, Maria Beny, Diniz, J.A., Kudaka, A.S. "A prototype photometer for terahertz solar flares observation in continuum" In: **VII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology – SEMINATEC.** 2012, São Bernanrdo do Campo / SP. Proceedings of the VII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology – SEMINATEC 2012. , 2012. p.81 - 82



Bortolucci, Emilio C. ; KAUFMANN, P. ; Fernandes, Luis Olavo ; Zakia, Maria Beny ; Diniz, J.A. ; Silva, A.M. Pereira Alves da ; TIMOFEEVSKY, A. V. ; Nikolaev, V.A. . THz band-pass resonant metal mesh filters for space solar photometry experiment. In: **VII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology - Seminatec 2012**, 2012, São Bernardo do Campo. Proceedings of the VII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology - Seminatec 2012, 2012. p. 77-78.

THz band-pass resonant metal mesh filters for a space solar photometry experiment

E. C. Bortolucci^a, P. Kaufmann^{a,b}, L. O. Fernandes^{a,b}, M. B. Zakia^a, J. A. Diniz^a, A. M. P. Alves da Silva^d, A. Flacker^a, A. V. Timofeesky^c, V. A. Nikolaev^c.

^aCenter of Semiconductor Components, State University of Campinas, Campinas, SP, Brazil, ^bCenter of Radio Astronomy and Astrophysics, Engineering School, Mackenzie Presbyterian University, São Paulo, SP, Brazil

^eTydex J. S. Co, St. Petersburg, Russia

^d Department of Electrical and Systems Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA

e-mail: pierrekau@gmail.com.br

1. Abstract

Photometric and imaging applications for solar flare studies in THz range from space required the fabrication of new resonant metal mesh filters tuned at 3 and 7 THz central frequencies, with design band-pass of $\pm 10\%$ of the central frequency. Photo-lithography and electroforming techniques are used. SEM parameters checking and transmission measurements are performed resulting in a well predict results compared with designed and simulated values.

2. Introduction

The interest in electromagnetic radiation in the THz range (0.1 - 30 THz) have applications in many areas like biotechnology, nanotechnology, plasma diagnostics, security, military and space science [1-3].

Photometry and imaging at THz frequencies are used to understand the nature of high frequency emission in solar flares, motivating development of sensors, detectors and filtering techniques and methods in a desired range.

The band-pass filtering can be attained by a number of techniques such as interferometers, multilayer IR materials, coupled planar antennas and bi-dimensional structures such as metal mesh filters (Frequency Selective Surfaces) [4].

Metal mesh filters exhibit excellent transmission properties (could be higher than 80%) compared with filter types using other techniques indicated above, they are easy to fabricate and are compact. Different geometries can be used, and a well studied cross type was adopted [4-6].

3. Design and Fabrication Process

Two techniques can be used to produce metal mesh filters, one using polymer films as a substrate with a metalized deposited layer, the other is produced using micro-machining steps like photolithography and electroplating resulting in a metal film grown with open spaces cross format. The first technique presents higher loss than the second due to presence of the polymer film, unlike free space cross metal mesh of second type, Also the first one has thermal and mechanical limitations for certain applications [6].

We have used the second technique, producing 3 THz and 7 THz central frequency filters, both with 10% bandwidth, adopting as initial parameters those used by Porterfield *et al.*[3] where J, K and G are described in Fig. 1 (see also Table 1). Optimization was done using CST Microwave Studio simulator.



Fig.1. Geometry parameters, J, K, G (not in scale)

The fabrication starts with a silicon wafer, with 2.5 inches, by growing a 1 μ m thick thermal oxide layer. After evaporating the Ti/Au (200/1000 Å) metals, where Ti acts as adhesion promoter over SiO₂ and Au acts as a seed to grow Ni. The SU-8 10 resist is spinned at 2500 rpm for 30 s. Afterwards a hot plate is used to bake it along 3 min at 65 °C and 5 min at 92 °C. The UV exposition was done at the MJB-3 aligner, 190 W, contact mode along 12 s. The Post Exposure Bake was done at 65 °C for 1 min, followed by 90 °C for 2 min. The development takes place durind 3 min using SU-8 10 proper developer. At this time the sample is molded to receive the Ni growth, in a Watts bath, at 4 A/dm². After 15 min of electroplating we get 7 μ m of Ni thickness.

April 12-13, 2012 - São Bernardo do Campo, Brazil

VALIO, ADRIANA ; KAUFMANN, P. ; GIMÉNEZ DE CASTRO, C. G. ; Raulin, J.-P. ; FERNANDES, L. O. T. ; Marun, A. . POlarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS): New Circular Polarization Solar Telescopes at Two Millimeter Wavelength Ranges. **Solar Physics JCR**, v. 101007, p. 1, 2013.

Solar Phys DOI 10.1007/s11207-013-0237-4

POlarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS): New Circular Polarization Solar Telescopes at Two Millimeter Wavelength Ranges

Adriana Valio • P. Kaufmann • C.G. Giménez de Castro • J.-P. Raulin • L.O.T. Fernandes • A. Marun

Received: 14 September 2012 / Accepted: 21 January 2013 © Springer Science+Business Media Dordrecht 2013

Abstract We present a new system of two circular polarization solar radio telescopes, PO-EMAS, for observations of the Sun at 45 and 90 GHz. The novel characteristic of these instruments is the capability to measure circular right- and left-hand polarizations at these high frequencies. The two frequencies were chosen so as to bridge the gap at radio frequencies between 20 and 200 GHz of solar flare spectra. The telescopes, installed at CASLEO Observatory (Argentina), observe the full disk of the Sun with a half power beam width of 1.4°, a time resolution of 10 ms at both frequencies, a sensitivity of 2-4 K that corresponds to 4 and 20 solar flux unit (= 10^4 Jy), considering aperture efficiencies of 50 ± 5 % and 75 ± 8 % at 45 and 90 GHz, respectively. The telescope system saw first light in November 2011 and is satisfactorily operating daily since then. A few flares were observed and are presented here. The millimeter spectra of some flares are seen to rise toward higher frequencies, indicating the presence of a new spectral component distinct from the microwave one.

Keywords Flares · Polarization: radio · Radio bursts: microwaves (mm, cm) · Radio emission

1. Introduction

We report the successful operation of two new radio telescopes for monitoring the Sun at 45 and 90 GHz, with circular polarization: POEMAS, from the Brazilian acronym in Portuguese *POlarização da Emissão Milimétrica da Atividade Solar*, which translates into POlarization Emission of Millimeter Activity at the Sun. The telescope is located in the

P. Kaufmann · L.O.T. Fernandes

Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universtaria Zeferino Vaz, Campinas, Brazil

A. Marun CASLEO, Casilla de Correo 467, Av. Espana 1512 Sur, 5400 San Juan, Argentina

Published online: 09 February 2013

A. Valio (E) - P. Kaufmann - C.G. Giménez de Castro - J.-P. Raulin - L.O.T. Fernandes CRAAM, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolacao 896, Sao Paulo, Brazil e-mail: avalio@craam.mackenzie.br

KAUFMANN, Pierre; Holman, Gordon D.; Su, Yang; Gimenez de Castro, C. Guillermo; Correia, Emilia; Fernandes, Luis O. T.; Souza, Rodney V.; Marun, Adolfo; PEREYRA, Pablo. "Unusual Emissions at Various Energies Prior to the Impulsive Phase of the Large Solar Flare and Coronal Mass Ejection of 4 November 2003". **Solar Physics**, v. 279, p. 465-475, 2012.

Solar Phys (2012) 279:465-475 DOI 10.1007/s11207-012-0040-7

Unusual Emissions at Various Energies Prior to the Impulsive Phase of the Large Solar Flare and Coronal Mass Ejection of 4 November 2003

Pierre Kaufmann - Gordon D, Holman - Yang Su - C, Guillermo Gimenez de Castro -Emilia Correia - Luis O,T, Fernandes - Rodney V, de Souza - Adolfo Marun -Pablo Pereyra

Received: 23 March 2011 / Accepted: 17 May 2012 / Published online: 3 July 2012 @ Springer Science+Business Media B, V. 2012

Abstract The GOES X28 flare of 4 November 2003 was the largest ever recorded in its class. It produced the first evidence for two spectrally separated emission components, one at microwaves and the other in the THz range of frequencies. We analyzed the pre-flare phase of this large flare, twenty minutes before the onset of the major impulsive burst. This period is characterized by unusual activity in X-rays, sub-THz frequencies, H α , and microwaves. The CME onset occurred before the onset of the large burst by about 6 min. It was preceded by pulsations of 3–5 s periods at sub-THz frequencies together with X-ray and microwave enhancements. The sub-THz pulsations fided out as impulsive bursts were detected at 100–300 keV and 7 GHz, close to the time of the first H α brightening and the CME onset. The activities detected prior to and at the CME onset were located nearly 2 arcmin south of the

P. Kaufmann

Centro de Componentes Semicondutores, CCS, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP 13083970, Brazil

G.D. Holman - Y. Su National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Code 671, Greenbelt, MD 20771, USA

Y. Su Department of Physics, The Catholic University of America, Washington, DC 20064, USA

Y. Su Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

E. Correia Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais', São José dos Campos, SP 12201970, Brazil

A. Marun - P. Pereyra Complejo Astronômico El Leoncito, CONICET, San Juan, Argentina

P. Kaufmann (E3) · C.G. Gimenez de Castro - E. Correia - L.O.T. Fernandes - R.V. de Souza Escola de Engenharia, CRAAM, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP 01302970, Brazil

e-mail: kaufmann@craam.mackenzie.br

KAUFMANN, Pierre; Bortolucci, Emilio C.; CORREIA, E.; Diniz, José Alexandre; FERNANDES, L. O. T.; Giménez de Castro, C. Guillermo; Godoy, Rodolfo; Kudaka, Amauri S.; Marcon, Rogério; Marun, Adolfo; Nikolaev, V.A.; PEREYRA, P.; Raulin, Jean-Pierre; Timofeevsky, A.V.; Zakia, Maria Beny. "Solar T : THz photometers to observe solar flares emissions from stratospheric balloon flight" In: **SPIE**, 2012.

SOLAR-T : Terahertz Photometers to Observe Solar flare Emission on Stratospheric Balloon Flights

P. Kaufinann*^{a,b}, A. Abrantes^e, E. Bortolucci^b, E. Correia^{a,d}, J.A. Diniz^b, G. Fernandez^e, L.O.T. Fernandes^{a,b}, C.G. Giménez de Castro^a, R. Godoy^e, G. Hurford^f, A.S. Kudaka^a, M. Lebedev^g, R. P. Lin^f, N. Machado^c, V.S. Makhmutov^h, R. Marcon^{1,j}, A. Marun^e, V.A. Nicolaev^k, P. Pereyra^e, J-P. Raulin^a, C. M. da Silva¹, A. Shih^m, Y. I. Stozkhov^h, J.W. Swartⁿ, A. V. Timofeevsky^k, A. Valio^a, T. Villela^d, M.B. Zakia^b

^aUniversidade Presbiteriana Mackenzie/EE/CRAAM, São Paulo, SP, Brazil; ^bUniversidade Estadual de Campinas/CCS, Campinas, SP, Brazil; ^cPropertech Tecnologia Ltda., Jacarei, SP, Brazil; ^dInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brazil; ^cComplejo

Astronomico El Leoncito/CONICET, San Juan, Argentina; ^fUniversity of California, SSL, Berkeley, CA, USA; ^gSpecial Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg,

Russia; ^hLebedev Physics Institute, Moscow, Russia; ⁱUniversidade Estadual de Campinas/IFGW, Campinas, SP, Brazil; ⁱObservatório Solar "Bernard Lyot", Campinas, SP, Brazil; ^kTydex Co., Saint Petersburg, Russia; ⁱNeuron Eletronica Ltda, São José dos Campos, SP, Brazil; ^mNational]

Aeronautical and Space Administration/GSFC, Greenbelt, MD, USA; "Universidade Estadual de Campinas/FEEC, Campinas, SP, Brazil

ABSTRACT

A new solar flare spectral component has been found with intensities increasing for larger sub-THz frequencies, spectrally separated from the well known microwaves component, bringing challenging constraints for interpretation. Higher THz frequencies observations are needed to understand the nature of the mechanisms occurring in flares. A twofrequency THz photometer system was developed to observe outside the terrestrial atmosphere on stratospheric balloons or satellites, or at exceptionally transparent ground stations. 76 mm diameter telescopes were designed to observe the whole solar disk detecting small relative changes in input temperature caused by flares at localized positions at 3 and 7 THz. Golay cell detectors are preceded by low-pass filters to suppress visible and near IR radiation, band-pass filters, and choppers. It can detect temperature variations smaller than 1 K with time resolution of a fraction of a second, corresponding to small burst intensities. The telescopes are being assembled in a thermal controlled box to which a data conditioning and acquisition unit is coupled. While all observations are stored on board, a telemetry system will forward solar activity compact data to the ground station. The experiment is planned to fly on board of long-duration stratospheric balloon flights some time in 2013-2015. One will be coupled to the GRIPS gamma-ray experiment in cooperation with University of California, Berkeley, USA. One engineering flight will be flown in the USA, and a 2 weeks flight is planned over Antarctica in southern hemisphere summer. Another long duration stratospheric balloon flight over Russia (one week) is planned in cooperation with the Lebedev Physics Institute, Moscow, in northern hemisphere summer.

Keywords: THz photometers; solar flares; stratospheric balloon platform; THz detectors; THz filters

1. THZ PHOTOMETRY IN THE CONTINUUM

To fully understand the nature of the high frequency emission in flares it is necessary to measure the complete continuum spectra at higher THz frequencies. This requires observations with detectors placed outside the terrestrial atmosphere, as it has been done at far IR for non-solar experiments on SOFIA high altitude aircraft¹, PACS experiment on HERSCHEL satellite², a solar scanning experiment on a stratospheric balloon³, or through few atmospheric THz transmission "windows" at exceptionally good high altitude ground based locations⁴.

^{*}pierrekau@gmail.com; phone +55 11 21148331; fax: +55 11 32553123