

ESTUDO DE NÍVEIS PROFUNDOS EM SEMICONDUTORES POR TRANSIENTE DE FOTOCORRENTE (PITS)

MARIA JOSE SANTOS POMPEU BRASIL

ORIENTADOR

PROF. DR. PAULO MOTISUKE

Tese apresentada no Instituto de Física "Gleb
Wataghin", Universidade Estadual de Campinas,
para obtenção do Título de Doutor em Física.

CAMPINAS - SAO PAULO

1989

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

*Este exemplar corresponde a
redação final da tese de
fendida pela aluna e
aprovada pela comissão
Julgadora.*
Paulo Motisuke
15/08/89

CLASSIF.

UTOR.

..... EX.

COMBO BC/ 11341

M

I. FÍSICA - UNICAMP

R.º T.D.

R.º 11341

..... CS.

n.º tomo. ID1760

1911189

CMOCORVILE

58 11341 11341

DEDICO ESTE TRABALHO A TODAS AS
PESSOAS DE QUEM EU GOSTO TANTO E
QUE, ESPERO, TAMBÉM GOSTEM DE MIM.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer sinceramente a todas as pessoas que me ajudaram a completar este trabalho. Agradeço à FAPESP, TELEBRAS, CNPq e FINEP, pelo suporte financeiro. Agradeço ao grupo do LPD - Unicamp pelo apoio técnico e financeiro, e aos integrantes do grupo que, de uma forma ou de outra, participaram deste trabalho. Agradeço ao grupo de Propriedades Ópticas como um todo, e em especial, ao Fernando Iikawa e ao Ayrton Bernussi, que estavam sempre por perto para "dar uma mãozinha", transformando o laboratório num ambiente de trabalho gostoso. Agradeço aos meus dois "professores" de eletrônica, o Paulo Pedreira e o Clóvis Oliveira, pelas conversas, conselhos e dicas. E finalmente, agradeço às duas pessoas fundamentais nesta tese, o meu orientador Paulo Motisuke e o meu marido Marcus Zwanziger, que me ajudaram, incentivaram, participaram, me acalmaram e me alegraram.

Muito obrigado,

Neca.

ÍNDICE

ABSTRACT

RESUMO

I. INTRODUÇÃO.....	i.1
II. ESPECTROSCOPIA DE TRANSIENTE DE FOTOCORRENTE	
II.1. NÍVEIS PROFUNDOS DE IMPUREZAS E DEFEITOS.....	ii.1
II.2. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE NÍVEIS PROFUNDOS.....	ii.4
II.3. PROCESSOS DE EMISSÃO E CAPTURA DE PORTADORES.....	ii.8
II.4. O TRANSIENTE DE FOTOCORRENTE.....	ii.11
II.5. O SINAL "PITS".....	ii.18
II.6. ANÁLISE DOS MÁXIMOS DOS ESPECTROS "PITS".....	ii.19
III. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	
III.1. SISTEMAS DE MEDIDA PITS.....	iii.1
III.2. ARRANJO EXPERIMENTAL.....	iii.2
III.3. CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS.....	iii.4
III.4. SISTEMA DIGITAL DESENVOLVIDO.....	iii.5
III.5. "SOFTWARE" DE CONTROLE.....	iii.10
III.6. DESEMPENHO DO SISTEMA DIGITAL.....	iii.13
IV. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	
IV.1. ESPECTROS "PITS".....	iv.1

IV.3. CRÍTICA DO MÉTODO TRADICIONAL DE TRATAMENTO

DE DADOS.....iv.13

IV.4. IDENTIFICAÇÃO DOS NÍVEIS PROFUNDOS.....iv.22

IV.5. INFLUÊNCIA DA ILUMINAÇÃO DE FUNDO.....iv.27

IV.6. INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA.....iv.31

IV.7. ESTUDO DA FOTOCORRENTE ESTACIONÁRIA.....iv.37

V.8. ANÁLISE DOS PICOS NEGATIVOS.....iv.45

V. CONCLUSÕES.....v.1

VI. REFERÊNCIAS.....vi.1

APÊNDICES

A.1. SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DO TRANSIENTE DE
FOTOCORRENTE.....a.1

A.2. LISTAGEM DOS PROGRAMAS DE CONTROLE
PROGRAMA DE CONTROLE PRINCIPAL EM BASIC PARA MEDIDAS
PITS.....a.6

SUBROTINA DE CONTROLE EM ASSEMBLER PARA MEDIDAS
PITS.....a.12

PROGRAMA DE TRATAMENTO DE DADOS DE TRANSIENTES DE
FOTOCORRENTE PARA OBTER ESPECTROS PITS
NORMALIZADOS.....a.29

ABSTRACT

We present a detailed analysis of photocurrent transients in semi-insulating GaAs and we discuss its usefulness as a method for characterization of deep level impurities and defects in high resistivity semiconductors.

The photocurrent transient measurements were performed in a "home made" automatic digital system. We present the project details including the hardware and software. This system has the capacity to measure transients in real time with high resolution and fidelity.

We summarize the fundamentals of charge carrier emission and capture from deep centers in semiconductors, necessary to analyse the photocurrent transients. We present the differential equations that describes the emission and capture processes with solutions in the first approximation found in the literature. We propose new analytic solutions, in high dark current approximation, that better describe the experimental phenomena. We also present photocurrent transient simulations using numerical solutions of the differential equations with initial conditions very similar to the experimental ones. Both the analytic and numeric solutions presented here, describe equally well the observed photocurrent decay.

The high resolution of the measured transients allowed an original and detailed analysis of the photocurrent decay shape. We made a critical analysis of the conventional method of photocurrent transients treatment, based on the so called Photo Induced Transient Spectroscopy (PITS) spectra. In conclusion, we suggest an alternative method for PITS data reduction based on

direct analysis of the photocurrent transients, that resulted in more reliable values of activation energy and capture cross section for semi-insulating materials.

We present PITS spectra of semi-insulating GaAs in different configurations of polarization, illumination and surface conditions. We characterize the observed traps in the samples, including the activation energies and carrier capture cross sections. We also observed negative peaks in PITS spectra. We present an original interpretation of this phenomenon, based in our analytical and numerical solutions of the differential equation set.

RESUMO

Neste trabalho apresentamos uma análise detalhada dos transientes de fotocorrente em amostras de GaAs semi-isolante, discutindo a sua aplicação e utilidade como um método de caracterização de impurezas e defeitos, com níveis de energia profundos na banda proibida, de semicondutores altamente resistivos.

As medidas do transiente de fotocorrente foram realizadas com um sistema digital inteiramente projetado e construído no próprio laboratório. Apresentamos os detalhes deste projeto, incluindo o "hardware" e "software" envolvidos. O sistema realiza medidas do transiente em tempo real, com alta resolução e fidelidade.

Resumimos as noções básicas de emissão e captura de portadores de carga pelos centros num semicondutor, necessárias para analisar os transientes de fotocorrente. Apresentamos um sistema de equações que descrevem estes processos de emissão e captura com as soluções correntes de primeira aproximação encontradas na literatura. Avançamos nesta análise, propondo soluções analíticas com menos aproximações que descrevem melhor o fenômeno experimental. Apresentamos também simulações do transiente de corrente através das soluções numéricas das equações diferenciais com condições de contorno muito próximas das experimentais. Tanto as soluções analíticas quanto as numéricas apresentam comportamentos semelhantes na descrição dos transientes observados.

A alta resolução dos transientes medidos permitiu uma análise

original e detalhada da forma do decaimento de fotocorrente, comparando-os com as previsões dos modelos teóricas. Em consequência, foi possível fazer também uma análise crítica do método convencional de tratamento de transientes de fotocorrente, baseado no denominado espectro PITS ("Photo Induced Transient Spectroscopy"). Finalmente, sugerimos um método alternativo de análise direta dos transientes, o que possibilitou a determinação de valores muito mais confiáveis dos parâmetros para os níveis de energia profundos em semicondutores resistivos.

Apresentamos espectros PITS de GaAs semi-isolante em diferentes configurações de polarização, iluminação e condições de superfície. Caracterizamos as armadilhas observadas nestas amostras, incluindo as energias de ativação e seções de choque de captura de portadores. Observamos também que, sob condições especiais, ocorre um fenômeno pouco compreendido: o aparecimento de picos negativos no espectro PITS. Apresentamos uma interpretação original para este fenômeno, que está contida nas soluções analíticas e numéricas, apresentadas neste trabalho, para o sistema de equações diferenciais que descrevem o transiente.

I. INTRODUÇÃO

Os semicondutores altamente compensados, apresentando uma alta resistividade ($\rho \cong 10^8 - 10^9 \Omega \text{ cm}$), são designados semi-isolantes (SI). Este caráter semi-isolante no GaAs é geralmente obtido através da dopagem com metais de transição como o Cr e o Fe, ou pelo crescimento em condições especiais que induzem a formação de defeitos nativos como o centro EL2 [Thomas 1984, Kirkpatrick 1984]. Estas impurezas e defeitos nativos criam níveis de energia no meio da banda proibida do GaAs e atuam como compensadores das impurezas rasas residuais. Assim, por exemplo, o EL2 que se apresenta como um doador profundo no GaAs, compensa os aceitadores rasos, como o C, Si e o Zn, normalmente presentes no GaAs [Martin 1986]. Em geral, a densidade destes níveis profundos nas amostras de GaAs (SI) é da ordem de 10^{16} cm^{-3} [Harris 1985].

Substratos de GaAs (SI) tem duas aplicações básicas e igualmente importantes tecnologicamente: a sua utilização como substrato para o crescimento de camadas epitaxiais de alta pureza [Morkoç 1985] e a fabricação de dispositivos monolíticos por implantação direta de dopantes [Thomas 1985, Stolte 1984].

No passado, a falta de controle e não-homogeneidade dos substratos semi-isolantes de GaAs disponíveis comercialmente limitaram bastante a segunda aplicação citada acima. Muitos esforços foram aplicados por diversos laboratórios de pesquisa com o objetivo de solucionar este problema [Kirkpatrick 1984]. Atualmente, a tecnologia para crescer monocristais de GaAs (SI) estáveis, homogêneos, com diâmetros até 10 cm, já está dominada.

Esta disponibilidade de material, associada à vantagem da maior mobilidade e velocidade eletrônica no GaAs em relação ao Si, traz uma real possibilidade de ultrapassar o limite de 1-2 GHz dos dispositivos fabricados com Si. Neste sentido já houve avanços significativos na área de fabricação de circuitos monolíticos de GaAs [Stolte 1984]. Esta fabricação de circuitos monolíticos por implantação iônica diretamente no substrato de GaAs permite inclusive selecionar as áreas do substrato que serão implantadas e ativadas através de processos relativamente simples como o RTA ("Rapid Thermal Annealing") ou por pulsos ópticos de lasers de potência. Isto significa uma grande flexibilidade na integração de diodos, FETs (Field Effect Transistor) e elementos passivos num único substrato com enormes aplicações no campo das telecomunicações e da computação.

Crescimentos de filmes homo e heteroepitaxiais de alta qualidade sobre substratos de GaAs semi-isolante são de fundamental importância no desenvolvimento de diversos dispositivos tais como os δ -FET (delta-Field Effect Transistor) [Schubert 1986] e os HEMT (High Electron Mobility Transistor) [Morkoç 1985]. Estes crescimentos são geralmente feitos por MOCVD ou MBE onde que o substrato é mantido a temperaturas superiores a 500 - 600°C por várias horas. Durante este processo de crescimento a alta temperatura pode acontecer uma difusão das impurezas e defeitos do substrato para a camada epitaxial [Elegems 1985]. Estes defeitos podem atuar como centros de recombinação e de espalhamento de portadores, de modo que as propriedades eletrônicas do semicondutor são fortemente afetadas por sua presença, mesmo em concentrações relativamente baixas.

A caracterização dos defeitos que criam níveis profundos na banda proibida do GaAs e a compreensão de suas propriedades eletro-ópticas constituem, portanto, um campo de pesquisa atual de grande importância.

Neste trabalho desenvolvemos um sistema para medidas de transientes de fotocorrente, para o estudo das impurezas e defeitos presentes num semicondutor semi-isolante. Este sistema foi totalmente projetado e montado em nosso laboratório, incluindo os circuitos eletrônicos, os programas de controle e os programas de tratamento de dados. O sistema é controlado por um microcomputador tipo PC-XT e apresenta inovações que aumentam a resolução do sinal medido. Os detalhes deste projeto estão apresentados no capítulo III.

Para analisar os transientes de fotocorrente precisamos nos familiarizar com os processos de emissão e captura de portadores por um centro de impureza ou defeito. No capítulo II apresentamos um resumo destes processos e introduzimos as equações diferenciais que governam a densidade de ocupação dos níveis de energia durante o transiente de fotocorrente. A dificuldade de encontrar uma solução analítica exata para este sistema de equações leva a maioria dos autores à propor aproximações fortes que muitas vezes não correspondem às condições experimentais. Apresentamos as soluções normalmente utilizadas na literatura para interpretação das medidas PITS e propomos novas soluções com menos aproximações.

No capítulo IV apresentamos os resultados de uma série de medidas de transiente de fotocorrente em substratos semi-isolantes de GaAs. Os dados de alta resolução e confiabilidade, obtidos com o nosso sistema digital de medida, permitiram fazer uma análise

original e detalhada do transiente. Propomos um método de determinação dos parâmetros característicos de uma armadilha (energia de ativação e seção de choque) através da análise direta do transiente, levando a resultados muito mais confiáveis do que aqueles obtidos por métodos tradicionais baseados em espectros PITS ("Photoinduced Transient Spectroscopy").

No capítulo IV apresentamos também um estudo dos efeitos de uma iluminação de fundo e dos tratamentos da superfície da amostra nos resultados de medidas PITS. Observamos que sob condições especiais ocorre o aparecimento de picos negativos no espectro PITS que não são explicados pelas equações básicas de transiente encontradas na literatura. Apresentamos uma solução original para este fenômeno baseado em novas soluções do sistema de equações diferenciais que descrevem o transiente. Esta interpretação é confirmada pela simulação dos transientes com resolução numérica do sistema de equações diferenciais, onde obtivemos resultados que concordam com a nova solução proposta para o transiente de fotocorrente.

II. ESPECTROSCOPIA DE TRANSIENTE DE FOTOCORRENTE

II.1. NÍVEIS PROFUNDOS DE IMPUREZAS E DEFEITOS

Impurezas e defeitos que criam níveis profundos nos materiais semicondutores é um assunto de grande interesse científico e tecnológico que tem sido amplamente discutido e estudado nos últimos anos [Lannoo 1981, Neumark 1983, Blakemore 1984, Pantelides 1986, Bourgoin 1987]. Peculiarmente, não existe uma definição quantitativa do que vem a ser um nível profundo. Na verdade, até mesmo as definições qualitativas são passíveis de crítica. Uma definição usual é que os níveis profundos são aqueles que não podem ser descritos pelo modelo de massa efetiva. Mas nesta definição também se enquadram níveis isoeletrônicos que possuem uma energia de ligação muito pequena. A definição mais simples, baseada apenas na posição do nível de energia criado pela impureza ou defeito na banda proibida do material, não é muito exata, pois é difícil definir um critério energético, ou seja, um valor de referência, em relação ao qual os níveis sejam catalogados como rasos ou profundos.

Podemos, no entanto, relacionar as características mais comuns e marcantes dos níveis rotulados como profundos. O termo de curto alcance do potencial assume uma grande importância na ~~descrição dos defeitos responsáveis por estes níveis de modo que~~

responsáveis por estes níveis são bastante localizados no espaço, e por isso apresentam um forte acoplamento com a rede cristalina. Muitos deles atuam como centros de recombinação não radiativos, com grande probabilidade de emissão de multifonons. Também é comum apresentarem estados excitados, em geral degenerados com as bandas de energia do semicondutor.

Um modelo teórico ideal seria, em nosso entender, aquele que descrevesse corretamente todas as propriedades físicas do centro responsável pelo nível profundo. Infelizmente, este é um objetivo ainda inacessível para qualquer modelo de impurezas com dimensões e complexidade realistas. Apesar da identificação de um nível profundo por comparação dos resultados experimentais com previsões teóricas, ser uma tarefa frequentemente impossível, os modelos teóricos podem fornecer indicações sobre o comportamento destes níveis que auxiliam bastante na compreensão sobre as suas propriedades. Além disso, apesar de alguns resultados teóricos envolverem incertezas muito grandes, como é o caso da predição da posição do nível de energia criado pelo defeito na banda proibida do material, outros são bastante razoáveis, como, por exemplo, a diferença de energia entre o estado fundamental e o estado excitado de um centro.

Os centros localizados que criam níveis profundos nos semicondutores podem ser divididos em duas categorias básicas: os defeitos nativos e as impurezas relacionadas com elementos que não aparecem na composição do semicondutor.

Entre os defeitos nativos, existem aqueles relacionados com defeitos mais extensos, como as dislocações e os defeitos planares, que envolvem modelos muito complexos, e os conhecidos

defeitos pontuais, que já foram bem descritos teóricamente em vários trabalhos publicados [Bourgoin 1983], sendo que todos eles geralmente criam níveis no meio da banda proibida dos semicondutores. Os defeitos pontuais mais simples, que no caso do GaAs, são as vacâncias (V_{As} , V_{Ga}), os anti-sítios (As_{Ga} , Ga_{As}) e os intersticiais (As_i , Ga_i), são bem conhecidos e identificados, mas uma interação entre estes defeitos simples pode levar à formação de defeitos mais complexos, ainda bastante discutidos.

Entre as impurezas que criam níveis profundos no GaAs, destacam-se os elementos de transição, que por apresentarem a camada d incompleta, são muito ativos eletricamente, com uma grande probabilidade de criar níveis profundos. Existe uma vasta literatura relacionada com os níveis que impurezas como o Cr [Allen 1986] e o Fe [Bishop 1986] criam no GaAs. Finalmente, as impurezas também podem interagir com os defeitos nativos do GaAs, formando complexos.

Os defeitos complexos em geral tem sido apontados como a origem de diversos centros observados experimentalmente, mas na maioria dos casos, ainda não existe uma identificação positiva do defeito responsável pelo nível observado. Na verdade, a identificação destes defeitos se resume a cataloga-los segundo os parâmetros observados experimentalmente e conhecidos como a assinatura de um nível, a energia de ativação E_t e sua seção de captura de portadores livres σ , usando uma nomenclatura convencional. Esta nomenclatura consiste das siglas EL ("electron level") e HL ("hole level") seguidas de números, atribuídos segundo a ordem em que foram observados experimentalmente. Uma tabela completa sobre os níveis observados em GaAs, contendo os

dados de diversos autores, será apresentada na seção IV.4, onde fazemos a identificação dos níveis que observamos. O nível conhecido como EL2 aparece como uma exceção. Este nível, observado em quase todas amostras de GaAs, tem uma grande importância tecnológica. Ele é seguramente o defeito mais estudado no GaAs [Martin 1986], e atualmente várias das suas propriedades já são bem compreendidas. A sua origem é atribuída a um complexo envolvendo um anti-sítio As_{Ga} e uma As_i intersticial, mas alguns detalhes de sua identificação, como o estado metaestável por ele apresentado, ainda são discutidos até hoje.

Além das informações sobre E_t e σ , a tabela IV.4.1 também indica o material em que o nível foi observada. Alguns destes níveis parecem ser característicos do tipo de material estudado. Em substratos de GaAs semi-isolantes, os níveis mais comunmente observados, além do EL2, são o EL6 e o EL3.

II.2. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DE NÍVEIS PROFUNDOS

Os defeitos e impurezas presentes num material semiconductor modificam drasticamente as suas propriedades elétricas e ópticas.

Através do estudo destas propriedades podemos obter informações sobre os parametros que caracterizam o defeito, entre eles: a seção de choque de captura de portadores de carga, a seção de choque de fotoionização, as posições dos níveis de energia em relação às bandas de condução ou de valência, a energia do fonon ou da vibração local do defeito. A partir destas informações,

podemos, em princípio, propor modelos microscópicos considerando configurações atômicas e distribuições de carga eletrônicas que reproduzam as propriedades do semicondutor causadas pela presença do defeito.

Uma série de técnicas experimentais [Bourgoin 1980, Martin 1980, Neumark 1983] sensíveis a propriedades elétricas, ópticas e magnéticas, tem sido utilizadas para determinar os parâmetros característicos dos defeitos.

As técnicas de medidas baseadas em propriedades ópticas, como a fotoluminescência e a absorção, são bastante eficientes no estudo de impurezas rasas e defeitos [Dean 1982]. Nos casos em que os níveis profundos se apresentam como centros radiativos, observa-se em geral bandas de fotoluminescência e de absorção bastante largas, devido à forte interação elétron-fonon. A análise destas bandas pode fornecer informações sobre a energia de ativação óptica, o parâmetro de Franck-Condon e a energia do fonon de vibração local do defeito [Keil 1965, Williams 1972]. Infelizmente, as espectroscopias de fotoluminescência ou de absorção nem sempre são aplicáveis no estudo de níveis profundos, já que estes podem se constituir em centros de recombinação não radiativos ou armadilhas ("traps").

As técnicas de medidas relacionadas com propriedades magnéticas, como o EPR [Kennedy 1981], são bastante eficientes na caracterização dos defeitos presentes nas amostras, quanto a sua simetria e distribuição de carga.

Para estudar os processos de emissão e captura dos portadores de carga pelos níveis profundos, são geralmente utilizadas técnicas experimentais baseadas na análise de transientes [Lang

1979, Grimeiss 1980, Neumark 1983, Look 1983]. Nestes métodos, aplica-se um pulso elétrico ou óptico para tirar o semicondutor de seu estado de equilíbrio térmico, alterando a densidade de portadores livres nas bandas de condução e valência, e a ocupação dos diversos níveis presentes dentro da banda proibida. O retorno ao estado de equilíbrio térmico, após o pulso de excitação externo, pode ser observado pela medida de diversos tipos de transiente, tais como: o transiente da capacitância de uma junção, o transiente da corrente que flui através de dois contatos elétricos e o transiente da intensidade de fotoluminescência. A análise destes transientes é feita, geralmente, em função da temperatura da amostra, mas pode-se também utilizar algum parametro alternativo, como a frequência dos pulsos de excitação ou a energia do fóton de excitação.

A idéia de utilizar a análise da forma do transiente de capacitância, para obter informações sobre os processos de emissão e captura de portadores de carga pelos níveis profundos, foi proposta originalmente por Lang em 1974 [Lang 1974]. A partir de então, foram publicados uma série de artigos apresentando aperfeiçoamentos desta técnica e o desenvolvimento de várias técnicas semelhantes [Mitonneau 1977, Bois 1980, Takikawa 1980, Chantre 1981], sendo conhecidas genericamente como DLTS ("Deep Level Transient Spectroscopy").

O DLTS baseia-se na medida do transiente da capacitância da região de depleção criada próxima de uma junção p-n ou de uma barreira Schottky, em uma amostra semicondutora. Esta capacitância $C(t)$ está basicamente relacionada com a densidade de carga na região de depleção, e portanto, com a ocupação dos níveis

profundos relacionados com defeitos e impurezas presentes nesta região. O pulso elétrico ou óptico que altera a ocupação destes níveis, é responsável pela variação da capacitância em relação ao seu valor de equilíbrio C_0 . O campo elétrico da região da depleção remove rapidamente os portadores livres gerados nesta região (em 10^{-10} a 10^{-12} seg). Consequentemente, os processos de recaptura podem ser desprezados e o transiente de capacitância após o pulso de excitação dependerá apenas da re-emissão dos portadores de carga capturados pelas armadilhas durante o pulso. Analisando estes transientes em função da temperatura, podemos obter as taxas de emissão e as energias de ativação das armadilhas presentes na região de depleção da amostra.

Nas amostras semi-isolantes, a largura da região de depleção torna-se muito grande, em geral maior que a própria espessura da amostra. A temperaturas de 300 K, este valor é da ordem de vários milímetros [Kremer 1987]. Isto impossibilita o uso de técnicas baseadas em medidas de capacitância, como o DLTS. A técnica conhecida como PITS ("Photoinduced Transient Spectroscopy") é um método alternativo de caracterização de níveis profundos, aplicável a amostras altamente resistivas. O PITS é bastante semelhante ao DLTS, mas em vez da medida do transiente de capacitância, mede-se o transiente da fotocorrente induzida por um pulso de luz. A primeira sugestão de utilizar o PITS como um método de determinação dos parâmetros das armadilhas presentes numa amostra semi-isolante foi feita em 1978 [Martin 1978]. Desde então, esta técnica tem sido aplicada em diversos materiais [Yoshie 1983, Zielinger 1985, Rhee 1982], mas sobretudo ao GaAs semi-isolante (SI) [Hurtes 1978, Yoshie 1985, Young 1986, Kremer

1987, Abele 1987, Blight 1989, Fang 1989]. Atualmente, a técnica PITS ainda apresenta vários problemas e mantém questões em aberto que discutiremos ao longo deste trabalho.

Para analisar o transiente de fotocorrente, é necessário primeiro compreender alguns conceitos sobre os processos de emissão e captura de um centro, que apresentaremos a seguir.

II.3. PROCESSOS DE EMISSÃO E CAPTURA DE PORTADORES

Figura II.3.1 apresenta os vários processos de emissão e captura que podem ocorrer num centro com uma energia E_T . A probabilidade (seg^{-1}) de um centro capturar um elétron é expressa

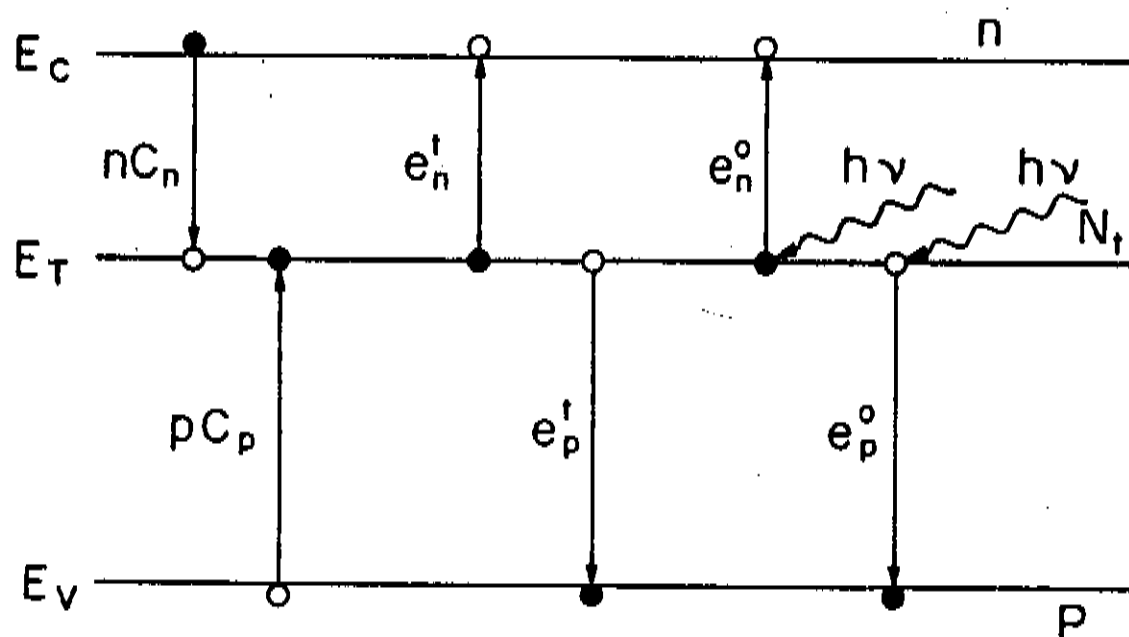


Fig. II.3.1 - Representação esquemática dos processos de emissão e captura de um nível de energia E_t e concentração N_t . "n" é a densidade de elétrons na banda de condução, E_c , e "p" é a densidade de buracos na banda de valência, E_v ; $e_{n,p}^{t,o}$ representa a taxa de emissão e $C_{n,p}$, a constante de captura do nível, sendo que os sub-índices "n" e "p" indicam se a transição envolve, respectivamente, um elétron ou um buraco, e os sobre-índices "t" e "o" indicam se o processo é, respectivamente, térmico ou óptico.

pelo produto da constante de captura C_n pelo número de elétrons na banda de condução. A constante de captura C_n pode ser representada por uma seção de choque de captura σ_n^t do centro, na forma:

$$C_n = \sigma_n^t v_n \quad (\text{II.3.1})$$

onde v_n é a velocidade térmica média dos elétrons. A probabilidade de emissão térmica de um elétron pelo centro é dada pela taxa de emissão e_n^t , que também pode ser relacionada com a seção de choque σ_n^t usando o princípio do balanceamento detalhado:

$$e_n^t = \frac{\sigma_n^t v_n N_c}{g} \exp [-(E_c - E_T)/KT] \quad (\text{II.3.2})$$

onde g é o fator de degenerescência do estado fundamental do nível considerado e N_c é a densidade efetiva de estados na banda de condução:

$$N_c = \frac{2(2\pi m_n KT)^{3/2}}{h^3} \quad (\text{II.3.3})$$

onde m_n é a massa efetiva dos elétrons na banda de condução e T a temperatura absoluta. Finalmente, a probabilidade de emissão de um elétron estimulada ópticamente é dada pela taxa de emissão óptica, e_n^o :

$$e_n^o = \sigma_n^o \phi \quad (\text{II.3.4})$$

onde σ_n^o é a seção de choque de fotoionização do centro e ϕ é a

densidade do fluxo de ftons incidente na amostra. Equações similares valem para os casos de captura e emissão de buracos, com os índices n sendo substituídos por p, isto é: $C_n, \sigma_n, v_n, e_n, m_n, N_c, (E_c - E_T)$ são substituídos por: $C_p, \sigma_p, v_p, e_p, m_p, N_v, (E_T - E_v)$.

Quando um elétron (ou buraco) é capturado por um centro, ele pode em seguida ser reemitido para a banda de condução (valência) de onde foi capturado, ou se recombinar com buracos (elétrons) livres da banda de valência (condução). Este critério é usado para classificar os níveis profundos em armadilhas, quando o processo de reemissão é mais provável do que o de recombinação, e em centros de recombinação, quando o inverso é verdade. Além disso, classificamos as armadilhas em armadilhas de elétrons, quando $e_n \gg e_p$, ou em armadilhas de buracos, quando $e_n \ll e_p$.

A grande utilidade da equação II.3.2 é que ela fornece uma maneira de obter a energia de ativação e a seção de choque de captura de um centro, a partir de uma medida da taxa de emissão térmica em função da temperatura. Usando a equação II.3.3 para N_c e substituindo v_n por:

$$v_n = \left[\frac{8KT}{\pi m_n} \right]^{1/2} \quad (\text{II.3.5})$$

reescrevemos a equação II.3.2 como:

$$(e_n^t)^{-1} = \frac{A'}{T^2} \exp[(E_c - E_T)/KT] \quad (\text{II.3.6})$$

$$\text{onde } A' = \frac{gh^3}{16\pi m_n K^2 \sigma_n^t} \quad (\text{II.3.7})$$

Para obtermos uma expressão para e_n^t com uma dependência explícita da temperatura, devemos considerar que a seção de choque σ_n^t pode ser ativada termicamente. Esta ativação geralmente pode ser expressa pela equação [Look 1983, Bourgoin 1983]:

$$\sigma_n^t = \sigma_{no}^t \exp(-E_\sigma/KT) \quad (II.3.8)$$

Além disso, a energia de ionização de um centro deve apresentar uma variação com a temperatura, que segundo Van Vetchen e Thurmond [Van Vetchen 1976], pode ser descrita usando a definição de uma entropia ΔS :

$$(E_c - E_T) = E_{To} - T \Delta S \quad (II.3.9)$$

e obtemos finalmente:

$$(e_n^t)^{-1} = \frac{A}{T^2} \exp[(E_{To} + E_\sigma)/KT] \quad (II.3.10)$$

$$\text{onde } A = \frac{gh^3}{16\pi m_n K^2 \sigma_{no}^t} \exp(-\Delta S/K) \quad (II.3.11)$$

é independente da temperatura.

II.4. O TRANSIENTE DA FOTOCORRENTE

A técnica PITS consiste, basicamente, na observação do transiente de corrente induzida numa amostra semicondutora por um pulso de luz, e na análise do comportamento deste transiente em função da temperatura da amostra.

Quando aplicamos um campo elétrico constante $\mathcal{E}$ entre dois contatos de uma amostra, a corrente I que flui através dela é proporcional a densidade de portadores livres nas bandas de energia:

$$I = (\mu_n n + \mu_p p) q \mathcal{E} A \quad (\text{II.4.1})$$

onde q é a carga do elétron; A , a área da seção transversal condutora; μ_n e μ_p , as mobilidades dos elétrons e buracos; n , a densidade dos elétrons na banda de condução e p , a densidade dos buracos na banda de valência.

Quando iluminamos a amostra, a luz gera um excesso de portadores livres e a corrente através da amostra aumenta. Durante o tempo iluminado, parte do excesso de portadores livres pode ser capturado pelas armadilhas de elétrons, ou de buracos, presentes na amostra, aumentando assim a ocupação destes centros em relação à condição de equilíbrio sem luz. Quando a luz é desligada, a corrente diminui rapidamente, devido à recombinação dos portadores livres através dos centros de recombinação, seguida de um transiente mais lento, devido à reemissão dos portadores capturados pelas armadilhas.

O fenômeno de interesse no PITS é a dependência temporal da reemissão dos portadores capturados pelas armadilhas. Para analisar este comportamento, vamos utilizar o modelo simplificado representado na figura II.4.1. Consideremos um semicondutor tipo-n com uma única armadilha de elétrons, com energia E_T e densidade N_T , onde todos os outros defeitos e impurezas presentes na amostra ou agem como centros de recombinação, ou são inativos nas

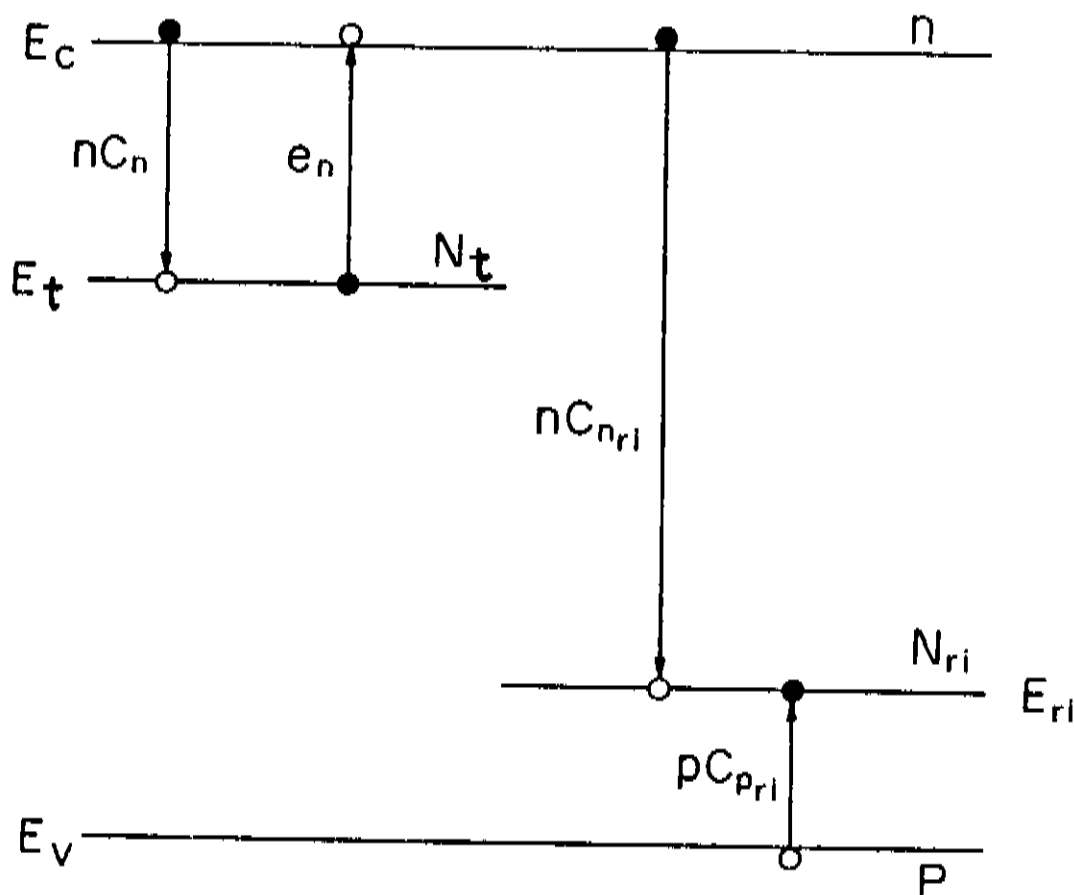


Fig. II.4.1 - Representação esquemática dos processos de emissão e captura envolvendo uma armadilha de elétrons de energia E_t e concentração N_t e um centro de recombinação de energia E_{ri} e concentração N_{ri} .

condições de análise. Na figura II.4.1 representamos esquematicamente apenas um destes níveis com energia E_{ri} e densidade N_{ri} . As equações cinéticas que governam este sistema podem ser escritas usando as definições da seção anterior. Assim a variação do número de elétrons na banda de condução será dado por:

$$\frac{dn}{dt} = e_n n_t - n C_n (N_t - n_t) - n \sum_i C_{nri} (N_{ri} - n_{ri}) + g_l \quad (\text{II.4.2})$$

e a variação na densidade de armadilhas ocupados n_t será:

$$\frac{dn_t}{dt} = - e_n n_t + n C_n (N_t - n_t) + e_p (N_t - n_t) - p C_p n_t \quad (\text{II.4.3})$$

onde n_{ri} é a densidade de ocupação do i -ésimo centro de recombinação, C_{nri} é a taxa de captura de elétrons deste centro e g_i é a taxa de geração de elétrons devido a radiação de excitação. C_n , C_p , e_n e e_p se referem a captura e emissão de portadores pela armadilha.

Quase todos modelos apresentados na literatura, consideram que a amostra é iluminada por uma radiação intrínseca. Apesar de existirem vários trabalhos que utilizam radiação extrínseca para excitação, todos eles utilizam as equações da literatura deduzidas para iluminação intrínseca.

As equações II.4.2 e II.4.3 podem ser aplicadas para as duas formas de iluminação, mas com interpretações diferentes. Quando usamos uma iluminação extrínseca, g_i representa a geração de portadores através da ionização óptica de todos os níveis diferentes da armadilha analisada, sendo que $e_n = e_n^t + e_n^o$ e $e_p = e_p^t + e_p^o$. Quando usamos uma iluminação intrínseca, g_i representa a geração de portadores pela ionização de um elétron diretamente da banda de valência para a banda de condução e podemos considerar que $e_n^o, e_p^o \cong 0$.

Como estamos analisando uma armadilha de elétrons, podemos desprezar as taxas de emissão e captura de buracos, e vamos reunir o efeito de todos os centros de recombinação num único tempo efetivo de recombinação dado por:

$$\tau_n = \left[\sum_i C_{nri} (N_{ri} - n_{ri}) \right]^{-1} \quad (\text{II.4.4})$$

de modo a reescrever as equações do nosso sistema como:

$$\frac{dn}{dt} = e_n n_t - n C_n (N_t - n_t) - \frac{n}{\tau_n} + g_l \quad (\text{II.4.5})$$

$$\frac{dn_t}{dt} = - e_n n_t + n C_n (N_t - n_t) \quad (\text{II.4.6})$$

Quando o sistema se encontra em estado de equilíbrio estacionário com a luz ligada temos: $\frac{dn}{dt} = \frac{dn_t}{dt} = 0$, de onde obtemos a concentração estacionária de armadilhas ocupadas com a luz ligada:

$$n_{tl} = \frac{N_t}{1 + (e_n / g_l \tau_n C_n)} \quad (\text{II.4.7})$$

e a densidade estacionária de elétrons na banda de condução com a luz ligada:

$$n_l = g_l \tau_n \quad (\text{II.4.8})$$

O transiente de corrente quando a luz é desligada ($g_l = 0$ e $e_n = e_n^t$) possui uma solução analítica se considerarmos a aproximação: $\tau_n^{-1} \gg C_n (N_t - n_t)$. Fisicamente, esta aproximação significa desprezar a recaptura dos elétrons pelas armadilhas durante o transiente de corrente, ou seja, considerar que um elétron emitido pela armadilha será rapidamente ($\tau_n \cong 10^{-9}$ seg em GaAs semi-isolante) capturado pelos centros de recombinação antes de ser recapturado pela armadilha. Neste caso obtemos um conjunto de equações diferenciais da forma:

$$\frac{dn}{dt} = e_n^t n_t - \frac{n}{\tau_n} \quad (\text{II.4.9})$$

$$\frac{dn_t}{dt} = - e_n^t n_t \quad (\text{II.4.10})$$

com soluções:

$$n_t(t) = n_{t1} \exp(-e_n^t t) \quad (\text{II.4.11})$$

$$n(t) = \left[n_l - \frac{e_n^t n_{t1}}{(\tau_n^{-1} - e_n^t)} \right] \exp(-t/\tau_n) + \frac{e_n^t n_{t1}}{(\tau_n^{-1} - e_n^t)} \exp(-e_n^t t) \quad (\text{II.4.12})$$

onde a origem do tempo é o instante em que a luz é desligada. Observamos que aqui também foi desprezada a corrente de equilíbrio no escuro pois estamos considerando que $n(t \rightarrow \infty) = 0$. Vamos analisar este efeito mais cuidadosamente no apêndice A.1, mas quando a corrente de escuro é baixa, podemos utilizar uma aproximação introduzindo um termo constante n_e na equação II.4.12. Escrevendo e_n^t como o inverso de uma constante de tempo característica do nível $\tau = (e_n^t)^{-1}$ e considerando que $\tau \gg \tau_n$, teremos:

$$n(t) = n_e + \left[n_l - n_{t1} \frac{\tau_n}{\tau} \right] \exp(-t/\tau_n) + n_{t1} \frac{\tau_n}{\tau} \exp(-t/\tau) \quad (\text{II.4.13})$$

Portanto, se a uma dada temperatura o transiente de fotocorrente for dominado pela emissão de uma única armadilha, no caso uma armadilha de elétrons, a densidade de elétrons livres

diminuirá exponencialmente com o tempo de acordo com a equação II.4.13. Se além disso supormos que a fotocorrente é dominada pelos portadores majoritários, o que geralmente é verdade no caso de materiais semi-isolantes [Look 1983], teremos uma corrente $I(t)$ com a mesma dependência de $n(t)$, ou seja:

$$I(t) = \mu_n q \epsilon A \left\{ n_0 + \left[g_1 \tau_n - n_{t1} \frac{\tau_n}{\tau} \right] \exp(-t/\tau_n) + n_{t1} \frac{\tau_n}{\tau} \exp(-t/\tau) \right\} \quad (\text{II.4.14})$$

Para tempos $t \gg \tau_n$ o primeiro termo da equação (II.4.14) tende a zero, de modo que o transiente observado pode ser descrito aproximadamente por:

$$I(t) = \mu_n q \epsilon A \left\{ n_0 + n_{t1} \frac{\tau_n}{\tau} \exp(-t/\tau) \right\}, \text{ para } t \gg \tau_n \quad (\text{II.4.15})$$

Analisando a equação II.4.7 observamos que as armadilhas serão completamente preenchidas com elétrons no estado estacionário sob iluminação se $g_1 \tau_n C_n \gg n_0$ com ($n_{t1} = N_t$). Em geral esta condição pode ser satisfeita aumentando g_1 , exceto no caso de níveis muito rasos onde esta desigualdade só pode ser alcançada em temperaturas muito baixas. Supondo que esta última condição seja satisfeita teremos:

$$I(t) = \mu_n q \epsilon A \left\{ n_0 + N_t \frac{\tau_n}{\tau} \exp(-t/\tau) \right\}, \text{ para } t \gg \tau_n \quad (\text{II.4.16})$$

Esta é uma primeira aproximação cuja validade discutiremos mais adiante com maiores detalhes, mas que tem sido usada até agora na maioria dos trabalhos publicados sobre medidas PITS.

II.5. O SINAL "PITS"

Existem diferentes definições para o sinal PITS, todas baseadas na derivada do transiente da corrente em função da temperatura [Kremer 1987, Fang 1989, Balland 1986]. O sinal PITS é tradicionalmente definido como:

$$P(T) = I(t_1) - I(t_2) \quad (\text{II.5.1})$$

Considerando que os tempos t_1 e t_2 são muito maiores que τ_n e aplicando a equação II.4.16 obtida no item anterior, temos:

$$P(T) = \mu_n q \epsilon A N_t \frac{\tau_n}{\tau} [\exp(-t_1/\tau) - \exp(-t_2/\tau)] \quad (\text{II.5.2})$$

O sinal PITS normalizado é definido como [Balland 1986]:

$$P_n(T) = \frac{I(t_1) - I(t_2)}{I(0) - I(t \rightarrow \infty)} \quad (\text{II.5.3})$$

onde $I(0)$ é a corrente no instante $t=0$, e usando a equação II.4.16 torna-se:

$$P_n(T) = \frac{N_t}{g_l \tau} [\exp(-t_1/\tau) - \exp(-t_2/\tau)] \quad (\text{II.5.4})$$

e apresenta vantagem analítica, em relação ao sinal PITS tradicional, por eliminar a dependência com a mobilidade μ_n e com o tempo de vida dos elétrons τ_n , que por sua vez dependem da temperatura.

Registrando este sinal em função da temperatura, obtemos um

gráfico conhecido como espectro PITS, que apresenta em geral uma série de picos, que analisaremos a seguir.

II.6. ANÁLISE DOS MÁXIMOS DOS ESPECTROS "PITS"

O sinal PITS normalizado apresenta um máximo numa temperatura T_m quando satisfaz a condição:

$$\left(\frac{dP_n(T)}{dT} \right)_{T=T_m} = \left(\frac{dP_n(T)}{d\tau} \right) \left(\frac{d\tau}{dT} \right)_{T=T_m} = 0 \quad (\text{II.6.1})$$

Considerando válidas as equações II.5.4 e II.3.10 chegamos a seguinte condição:

$$(t_2 - \tau) = (t_1 - \tau) \exp [(t_2 - t_1)/\tau] \quad (\text{II.6.2})$$

Mantendo uma relação constante entre t_1 e t_2 da forma $t_2 = \alpha t_1$, podemos encontrar uma solução gráfica da equação acima na forma: $\tau = \beta t_1$ [Itoh 1981], obtendo por exemplo:

$$\text{se: } t_2 = 2 t_1 ; \quad \text{então: } \tau = 0,6918 t_1 \quad (\text{II.6.3})$$

$$\text{se: } t_2 = 3 t_1 ; \quad \text{então: } \tau = 0,8131 t_1 \quad (\text{II.6.4})$$

$$\text{se: } t_2 = 5 t_1 ; \quad \text{então: } \tau = 0,9419 t_1 \quad (\text{II.6.5})$$

$$\text{se: } t_2 = 10 t_1 ; \quad \text{então: } \tau = 0,9989 t_1 \quad (\text{II.6.6})$$

Resumindo, o espectro $P_n(T)$ normalizado obtido usando duas janelas de tempo t_1 e t_2 , terá um máximo a uma temperatura T_m onde o tempo característico de emissão τ da armadilha ativa satisfaz

uma condição da forma $\tau = \beta t_1$. Isto estabelece um método para determinar τ a partir dos máximos de um espectro PITS normalizado. É claro que variando-se os tempos t_1 e t_2 , a posição dos máximos variam, fornecendo uma tabela do tipo $(T_m, \tau(T_m))$ para cada pico. Lembramos no entanto que a validade da relação encontrada entre T_m e τ depende basicamente da validade da equação II.5.4 como solução do transiente, que como vimos, envolve uma série de aproximações.

Com a medida da taxa de emissão térmica ($e_n^t = \tau^{-1}$) em função da temperatura, podemos determinar os parâmetros $(E_{T_0} + E_\sigma)$ e σ_n da armadilha ativa. Para isto, basta fazer um ajuste aos dados experimentais $(T_m, \tau(T_m))$ com a equação II.3.10, que pode ser reescrita como:

$$T^2 \tau = A \exp[(E_{T_0} + E_\sigma)/KT] \quad (\text{II.6.7})$$

Apresentando estes dados na forma de um gráfico de Arrhenius, na forma $T^2 \tau$ vs $1/T$, obteremos uma reta cujo coeficiente linear estará relacionado com σ_n , e o coeficiente angular será proporcional a $(E_{T_0} + E_\sigma)$. Em geral, o valor da energia obtido neste ajuste é apresentado na literatura com a denominação geral de energia de ativação do centro $E_T = (E_{T_0} + E_\sigma)$, pois apenas em poucos casos se conhece o valor de E_σ .

III. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

III.1. SISTEMAS DE MEDIDAS PITS

Existem dois tipos de sistemas para medidas de PITS, os analógicos e os digitais. Os sistemas analógicos em geral estão baseados na utilização de um integrador tipo "box-car". A diferença de corrente, $I(t_1) - I(t_2)$, entre duas janelas de tempo fixos, t_1 e t_2 , contados a partir do instante em que a luz é desligada, é medida enquanto se faz uma varredura lenta e contínua da temperatura da amostra. Este procedimento é repetido várias vezes mudando-se as posições das janelas, t_1 e t_2 , para cada espectro PITS. Nos sistemas digitais, registra-se todo o transiente da corrente numa dada temperatura fixa. Em seguida, a temperatura é elevada e estabilizada no próximo valor desejado e é feita uma nova leitura do transiente. Este processo é repetido para todos os valores de temperatura desejado.

O sistema de medida digital apresenta uma série de vantagens sobre o analógico. Primeiro, ele elimina o problema bastante comum de deformação do sinal PITS analógico devido ao uso de taxas muito rápidas de aquecimento da amostra. A segunda vantagem é que, no sistema digital, após o registro de um conjunto de transientes de corrente em uma série de temperaturas diferentes, é possível realizar uma análise similar à do método analógico para quaisquer tempos, t_1 e t_2 , utilizando para isto um programa simples de tratamento de dados. Para obtenção dos transientes é suficiente um

único ciclo de resfriamento-aquecimento da amostra. Para obter o mesmo resultado usando um sistema analógico, é necessário realizar uma série de ciclos térmicos, o que pode causar uma degradação dos contatos elétricos. Além disso, o método digital permite uma análise posterior detalhada dos transientes de corrente e comparações com os modelos teóricos de emissão e captura de portadores. Finalmente, um benefício adicional ligado ao fato dos dados digitais serem obtidos numa temperatura fixa, é a possibilidade de realizar uma média sobre vários períodos de iluminação-escuro numa dada temperatura para aumentar a relação sinal-ruído.

III.2. ARRANJO EXPERIMENTAL

A figura III.2.1 apresenta um diagrama de blocos da montagem experimental para as medidas de transiente de corrente, com controle e aquisição de dados em tempo real monitorado por microcomputador. O sistema permite o uso de duas fontes de luz para excitação: um laser de He-Ne, para excitação intrínseca ($h\nu > E_g$) e uma lâmpada de tungstênio com filtro de Si, para excitação extrínseca ($h\nu < E_g$). A intensidade do feixe de luz é modulado por um "chopper" numa frequência de 2.5 Hz, gerando um pulso repetitivo não-simétrico de 100 mseg de iluminação e 300 mseg de escuro. Estes tempos, assim como a intensidade da luz, foram escolhidos de modo a atingir uma condição de equilíbrio estacionário no final de cada ciclo de iluminação e escuro. Um detalhe importante nesta montagem é a focalização do feixe de luz

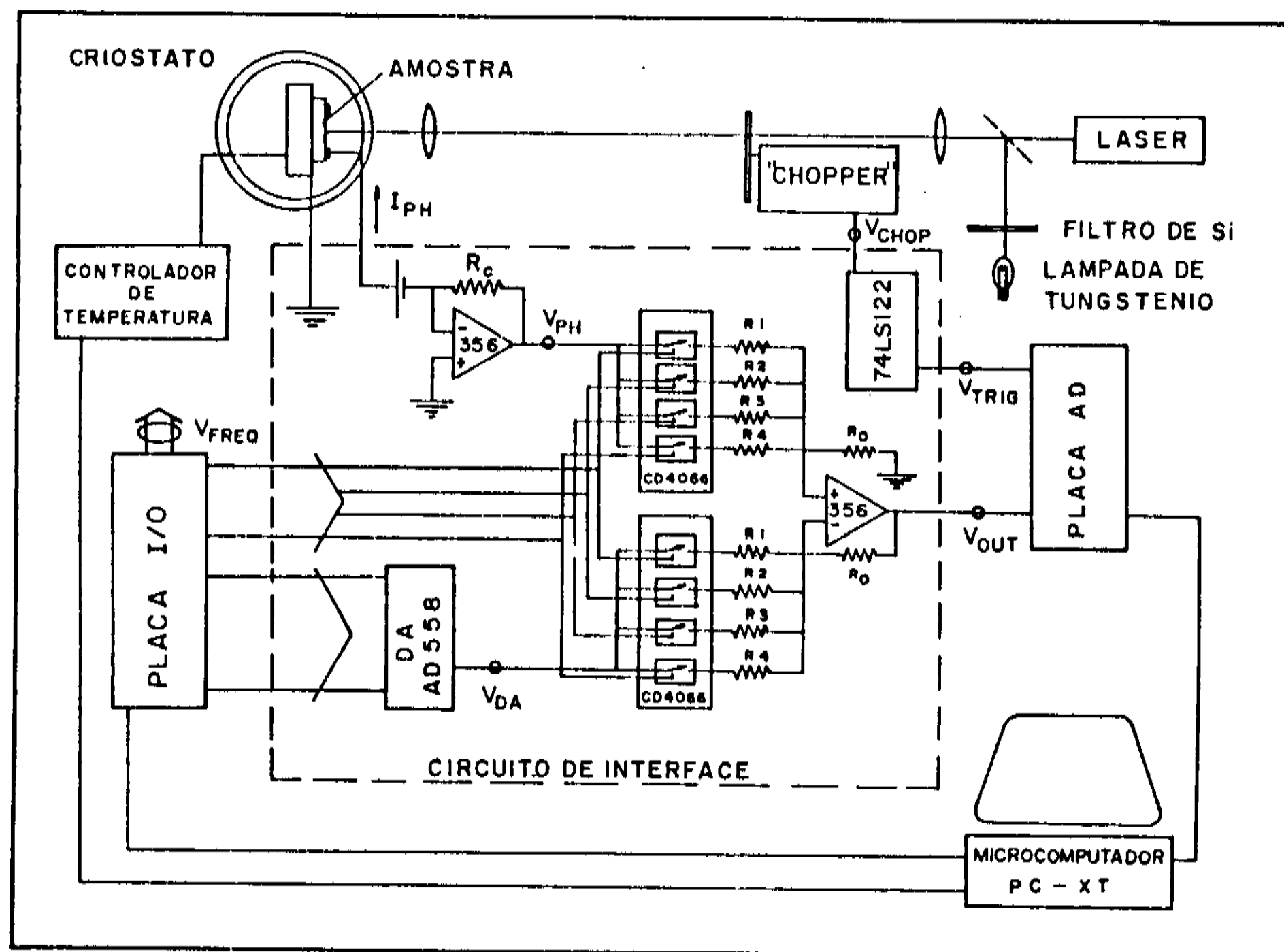


Fig. III.2.1 - Diagrama do sistema digital para medidas PITTS, mostrando a montagem experimental e os circuitos eletrônicos, com os respectivos sinais elétricos representados na figura III.4.1.

na palheta do "chopper", pois a dimensão deste foco irá determinar o tempo não-nulo de extinção da luz. Usando um sistema de lentes e iris conseguimos minimizar este tempo para valores da ordem de 0,5 mseg. A amostra é mantida num criostato do tipo dedo-frio resfriado a nitrogênio líquido, projetado e desenvolvido na Unicamp. A temperatura é controlada pelo microcomputador utilizando um termopar de cobre-constantan para leitura da temperatura e uma resistência de Ni-Cr para aquecimento. Para polarização, uma voltagem DC (bateria) é aplicada entre dois contatos da amostra, numa configuração planar, com dois contatos

na superfície iluminada da amostra, ou do tipo interplanar (sanduiche), com um contato em cada uma das superfícies da amostra. Geralmente utilizamos uma bateria de 1.5 V para uma distância de 500 microns entre os contatos, o que corresponde a um campo de 30 V/cm, o qual é suficientemente fraco para evitar efeitos não-lineares.

O transiente de corrente induzido na amostra quando ela é iluminada pelo pulso de luz, é registrado pelo microcomputador utilizando uma interface que descreveremos na seção III.4.

III.3. CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS

As amostras utilizadas neste trabalho são substratos comerciais de GaAs semi-isolante, não intencionalmente dopados. O caráter semi-isolante é devido à presença intencional do defeito conhecido como EL2. A mobilidade μ e a resistividade ρ das amostras a 300 K, segundo os dados do fabricante, são da ordem de:

$$\mu \cong 7200 \text{ a } 7400 \text{ cm}^2/\text{V seg}$$

$$\rho \cong 2,8 \text{ a } 3,7 \times 10^7 \Omega \text{ cm}$$

Estas amostras são fracamente do tipo-n, e a 300 K apresentam uma densidade de elétrons livres de $\approx 3 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$. O seu nível de Fermi a 300 K se encontra a 0,74 eV acima do topo da banda de valência.

Os contatos elétricos nas amostras foram feitos por deposição de uma liga de Au-Ge-Ni, com posterior tratamento térmico a 450 °C por 2 min, numa atmosfera de N_2 . Medidas I-V, demonstraram o caráter ôhmico do contato para campos elétricos menores que 1500

V/cm. Os contatos foram feitos na forma de faixas paralelas na face superior da amostra, e num contato único, com deposição de toda a face posterior da amostra. As faixas depositadas tem uma largura de 0,5 mm, com uma separação entre faixas também da ordem de 0,5 mm. Em algumas amostras, os contatos foram feitos sobre as superfícies nas condições em que foi recebida do fabricante, em outras, as duas superfícies foram polidas com bromo-metanol antes da deposição de Au-Ge-Ni.

III.4. SISTEMA DIGITAL DESENVOLVIDO

A figura III.2.1 da montagem experimental para medidas PITS também apresenta os detalhes eletrônicos do sistema digital PITS projetado e desenvolvido em nosso laboratório. Para auxiliar a compreensão do seu funcionamento, apresentamos na figura III.4.1 os sinais elétricos em diversos pontos deste diagrama. O sistema é considerado simples e de baixo custo, mas apresenta inovações técnicas como a subtração da corrente de escuro e a mudança de ganho automáticas, que aumentam a relação sinal-ruído, resultando numa excelente sensibilidade [Brasil 1989(a), Brasil 1989(b)].

O sistema eletrônico completo consiste num circuito de interface principal, numa placa Analógica-Digital comercial com um conversor AD rápido (25 μ seg) de 12 bits (AD574A) e numa placa de entradas e saídas (I/O) baseada no circuito 8255A, com 3 portas de 8 bits de nível TTL. Na seleção dos componentes deste sistema foi levado em conta o seu tempo de resposta, de modo a eliminar possíveis distorções do sinal.

Utilizando como fonte de excitação uma luz de intensidade

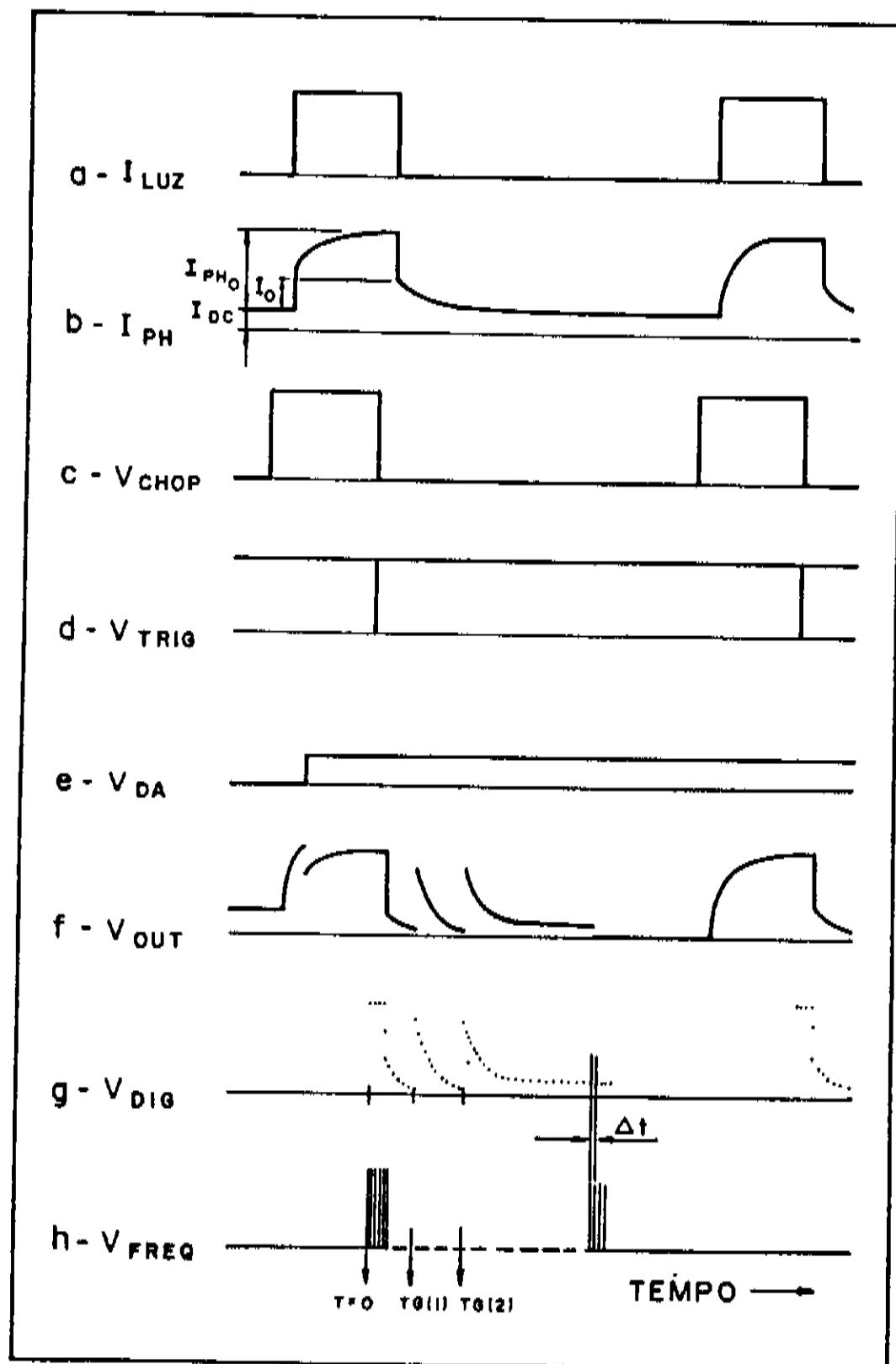


Fig. III.4.1 - Representação dos sinais indicados no diagrama do sistema digital PITS apresentado na figura III.2.1. I_{LUZ} é a intensidade da radiação incidente na amostra. I_{PH} , V_{CHOP} , V_{TRIG} , V_{DA} , V_{OUT} e V_{FREQ} são sinais eletrônicos em diversos pontos do circuito. V_{DIG} é o sinal V_{OUT} lido pelo microcomputador em intervalos de tempo Δt .

I_{LUZ} (Fig. III.4.1.a), obtemos uma corrente típica I_{PH} (Fig. III.4.1.b) através da amostra. O valor da corrente em equilíbrio estacionário sem luz, é I_{DC} . Quando iluminamos a amostra, a corrente começa a aumentar até atingir um valor de equilíbrio estacionário com a luz, I_{PHO} . No instante em que a luz é desligada, a corrente cai rapidamente a um valor I_0 , seguido de um transiente mais lento até atingir o valor de equilíbrio estacionário sem luz, I_{DC} . A medida completa deste transiente envolve dois problemas básicos: a) em algumas temperaturas I_0 pode ser muito pequeno comparado com I_L , de modo que se registrarmos o transiente usando um único ganho, teremos uma resolução muito pobre do transiente lento entre I_0 e I_{DC} ; b) a altas temperaturas o valor da corrente de escuro I_{DC} aumenta rapidamente de modo que I_{PHO} torna-se pequeno comparado com I_{DC} .

Vejamos o funcionamento do circuito da figura III.2.1. A corrente na amostra I_{PH} é convertida em voltagem $V_{PH} = I_{PH} R_C$ usando um amplificador operacional no modo corrente. A resistência R_C é selecionada manualmente de modo que a voltagem convertida V_{PH} seja da ordem, mas sempre menor que, 1 volt, quando a amostra está iluminada. Isto porque estamos trabalhando com um conversor AD com voltagem de entrada entre 0 e 1 volt.

Uma voltagem constante V_{DA} (Fig. III.4.1.e), fornecida pelo conversor DA, é subtraída de V_{PH} . Esta subtração é usada para eliminar a voltagem constante, proporcional a corrente de escuro, que aparece sobreposta ao transiente que queremos analisar. Esta diferença é amplificada por um segundo amplificador operacional com ganho variável, $G = R_O/R_i$ ($R_i = 1, 10, 100, 1000$), onde as

resistências R_i são selecionadas usando uma série de chaves (CD4066A). O controle da seleção da voltagem V_{DA} e do ganho G são feitas por "software", pelo microcomputador, através da placa I/O.

O sinal do "chopper" V_{CH} (Fig. III.4.1.c) é ligeiramente avançado em relação à I_{LUZ} (Fig. III.4.1.a). Para tanto, deslocamos um pouco o feixe luminoso de excitação em relação à posição diametralmente oposta à da luz de referencia interna do "chopper". V_{CH} é convertido pelo CI 74LS122 num sinal V_{TRIG} (Fig. III.4.1.d), compatível com o "trigger" da placa AD. Deste modo, a aquisição de dados é acionada por V_{TRIG} alguns milsegundos antes da luz ser apagada, permitindo a leitura do valor da corrente em equilíbrio estacionário com a luz I_{PHO} . A aquisição de dados propriamente dita consiste na leitura do sinal V_{OUT} (Fig. III.4.1.f) em intervalos de tempo constantes Δt , programados por "software". Para verificar o valor de Δt , um pulso é enviado a uma das portas da placa I/O imediatamente antes de cada leitura. Assim obtemos um sinal V_{FREQ} (Fig. III.4.1.h) com periodo igual a Δt , que nos permite realizar uma medida externa, precisa, de Δt .

No nosso sistema, evitamos o arranjo simplificado, que tem sido usada por diversos autores [Abele 1987, Blight 1989, Fang 1989], onde a corrente I que flui através da amostra é monitorada através da voltagem V_S sobre uma resistencia R_S em série com a amostra. Esta montagem, apresentada na figura V.4.2, apresenta um sério problema. Apesar da voltagem V_S ser proporcional a corrente I na amostra ($V_S = R_S I$), a voltagem V_A aplicada sobre a amostra não é constante. Na verdade, temos que:

$$V_A = \frac{V}{1 + (R_S/R_A)}$$

(III.4.1)

Para que V_A seja constante, igual a V , precisamos garantir que $R_A \gg R_S$. Mas, dado que R_A varia de um fator até 10^5 durante um único transiente, concluímos que é praticamente impossível escolher um valor para R_S na qual a condição $R_A \gg R_S$ seja sempre satisfeita e que possibilite uma medida com boa resolução de todo

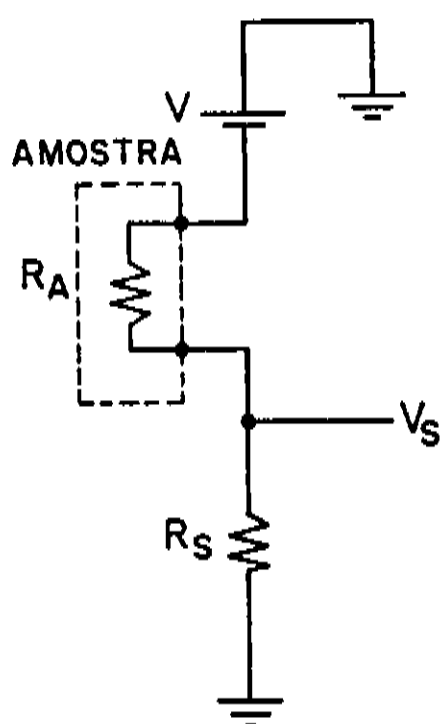


Fig. III.4.2 - Montagem simplificada para medidas PITs. A resistência R_S é usada em série com a resistência da amostra R_A e uma bateria V .

o transiente. Isto significa que um arranjo deste tipo resultará em distorção na medida da forma do transiente de fotocorrente, fato que não foi suficientemente destacado na literatura até o presente.

III.5. "SOFTWARE" DE CONTROLE

O programa de controle para as medidas PITS foi codificado nas linguagens BASIC e ASSEMBLER (Apêndice A.2). O intervalo de tempo entre duas medidas Δt desejado é da ordem de 100 μ seg. Esta escala de tempo só é compatível com programas escritos diretamente em linguagem ASSEMBLER. Por isso, desenvolvemos um programa principal em BASIC e escrevemos a subrotina de aquisição de dados em ASSEMBLER.

O programa principal solicita dados identificadores de uma medida (data, amostra, polarização, radiação de excitação,...) através de um menu, controla o início da aquisição de dados, apresenta o gráfico do transiente medido na tela e armazena as informações em disco rígido ou flexível. O grande número de dados nos obriga a trabalhar com o armazenamento dos resultados na forma de arquivos binários, pois assim um transiente típico de 1000 pontos, somadas as informações sobre temperatura da amostra e tempos em que ocorreram mudanças de ganho, podem ser guardados num arquivo que ocupa 2010 bytes de memória. Como geralmente realizamos medidas numa faixa de temperatura entre 100 a 400 K, com intervalos de 2 K, produzindo 150 transientes, os dados relativos a uma medida PITS completa ocupam cerca de 300 Kbytes de memória, ou seja, podem ser armazenados em um único disquete flexível de 5 1/4".

Quando a temperatura da amostra atinge o valor desejado, o programa principal chama a subrotina CPITS, cujo fluxograma está representado esquematicamente na figura III.5.1. As principais

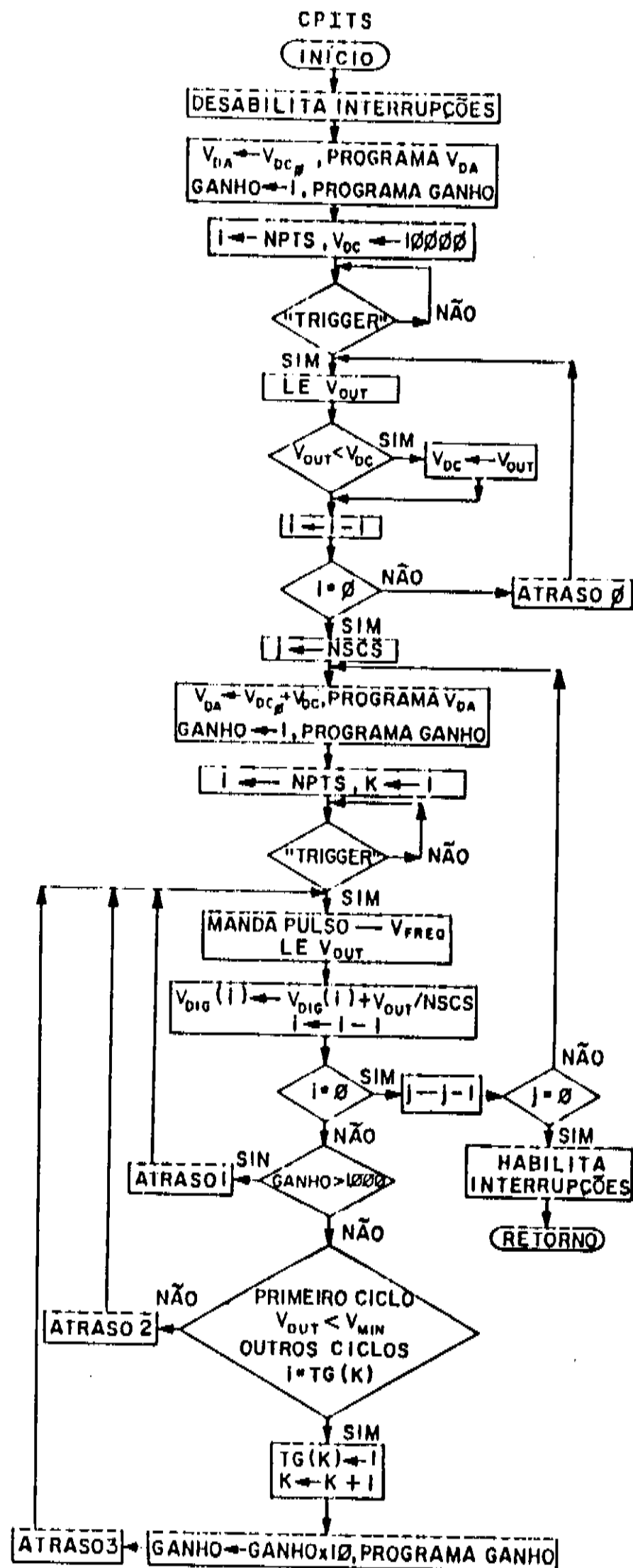


Fig. III.5.1 - Fluxuograma da subrotina CPITS de controle para medidas do transiente da fotocorrente.

variáveis, passadas do programa em BASIC para a subrotina em ASSEMBLER, ou vice-versa, são: NPTS, o número de pontos medidos num transiente; NSCS, o número de periodos usados para fazer a média de um dado transiente; V_{DA} , a voltagem subtraída pelo conversor DA; o endereço (segmento-offset) do conjunto de voltagens medidas ($V_{DIG}(i)$); e o endereço (segmento-offset) do conjunto de ordenadas de mudança de ganho ($TG(k)$). Na primeira sequência de instruções, o programa mede a menor voltagem durante um transiente V_{DC} , e envia este valor para o conversor DA, de modo que esta voltagem seja subtraída do sinal durante os próximos periodos de medida. A altas temperaturas, este valor pode se tornar maior do que a voltagem máxima de entrada do conversor AD, de modo que se torna necessário subtrair parte desta voltagem antes mesmo da leitura descrita acima. Isto é feito introduzindo um valor inicial V_{DC0} antes da chamada de CPITS, de forma que durante o periodo correspondente a leitura de V_{DC} seja subtraída uma voltagem V_{DC0} , e nos periodos subsequentes a voltagem total subtraída seja $V_{DC0} + V_{DC}$.

Durante o primeiro periodo de leitura, o programa compara a voltagem lida $V_{DIG}(i)$ com a voltagem máxima de entrada do conversor AD, V_{DAT} . Se a voltagem lida é menor do que 10% da voltagem máxima ($V_{MIN} = 0,1 * V_{DAT}$), o ganho G_i do amplificador é trocado pelo próximo ganho G_{i+1} , 10 vezes maior. Nos pontos de mudança de ganho, os índices (i) da voltagem $V_{DIG}(i)$ são armazenadas na memória, no vetor de ordenadas de mudança de ganho, $TG(k)$. Nos periodos de medida subsequentes, o programa realiza uma rotina semelhante, mas usando como teste para mudança de ganho, uma comparação entre o índice da voltagem lida (i) e as ordenadas de mudança de ganho $TG(k)$, estabelecidas no primeiro periodo de

medidas de um transiente.

O tempo Δt é controlado pelo número de ciclos de CPU entre duas medidas consecutivas, N_{CC} . O número N_{CC} é mantido constante nos diversos "loops" de CPITS usando subrotinas de atraso (ATRASSO 1, ATRASSO 2, ATRASSO 3). De modo que temos: $\Delta t = N_{CC} / f$, onde f é a frequência de trabalho do microcomputador. Lembramos também que as interrupções são desativadas durante a medida, para eliminar possíveis ciclos extras do CPU e garantir a constancia do intervalo Δt .

III.6. DESEMPENHO DO SISTEMA DIGITAL

A figura III.6.1 apresenta um transiente de fotocorrente típico de uma amostra de GaAs (SI) a 100 K, medida com nosso sistema digital. O intervalo de tempo entre dois pontos é $\Delta t = 137,3 \mu s$. O transiente consiste de 1000 pontos, onde foi feito uma média em 32 periodos de luz-escuro. Observamos as mudanças de escala correspondentes às mudanças de ganho G . Para demonstrar a importância do sistema de mudança automática de ganho, apresentamos na figura III.6.2 uma comparação entre um transiente medido com mudança de ganho automática e um segundo transiente medido nas mesmas condições do primeiro, mas mantendo um ganho constante, $G=1$. Para uma melhor comparação, multiplicamos numericamente este segundo transiente por valores 1, 10 e 100, nos mesmos intervalos em que ocorreram as mudanças de ganho no primeiro transiente. Com esta amplificação fica nítida a vantagem obtida na resolução com o nosso sistema de mudança automática de ganhos. Podemos observar inclusive o limite de resolução do

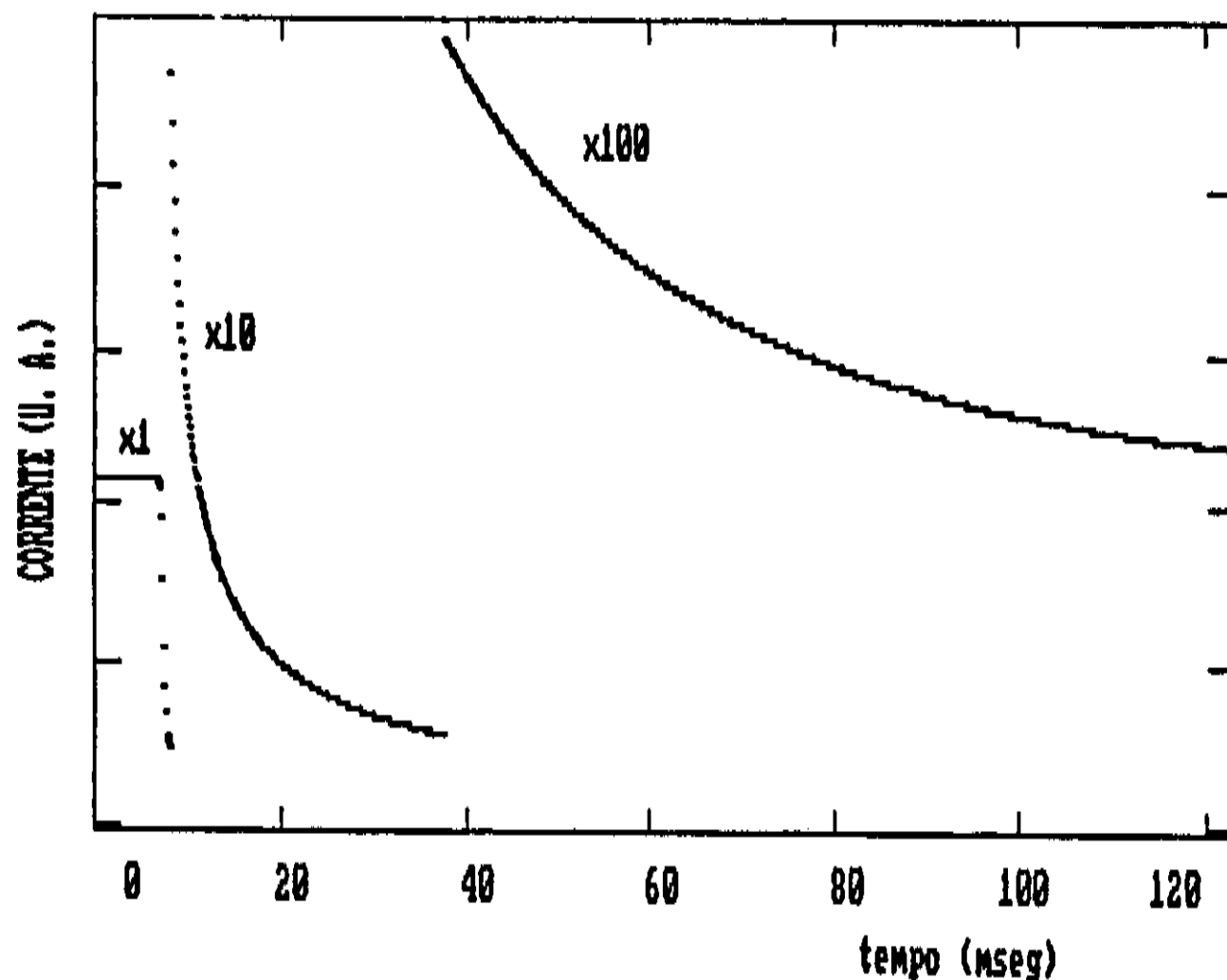


Fig. III.6.1 - Transiente típico de fotocorrente de uma amostra de GaAs (SI) a 100 K medido no nosso sistema digital. As mudanças de ganho $\times 1$, $\times 10$ e $\times 100$, foram realizadas automaticamente pelo sistema.

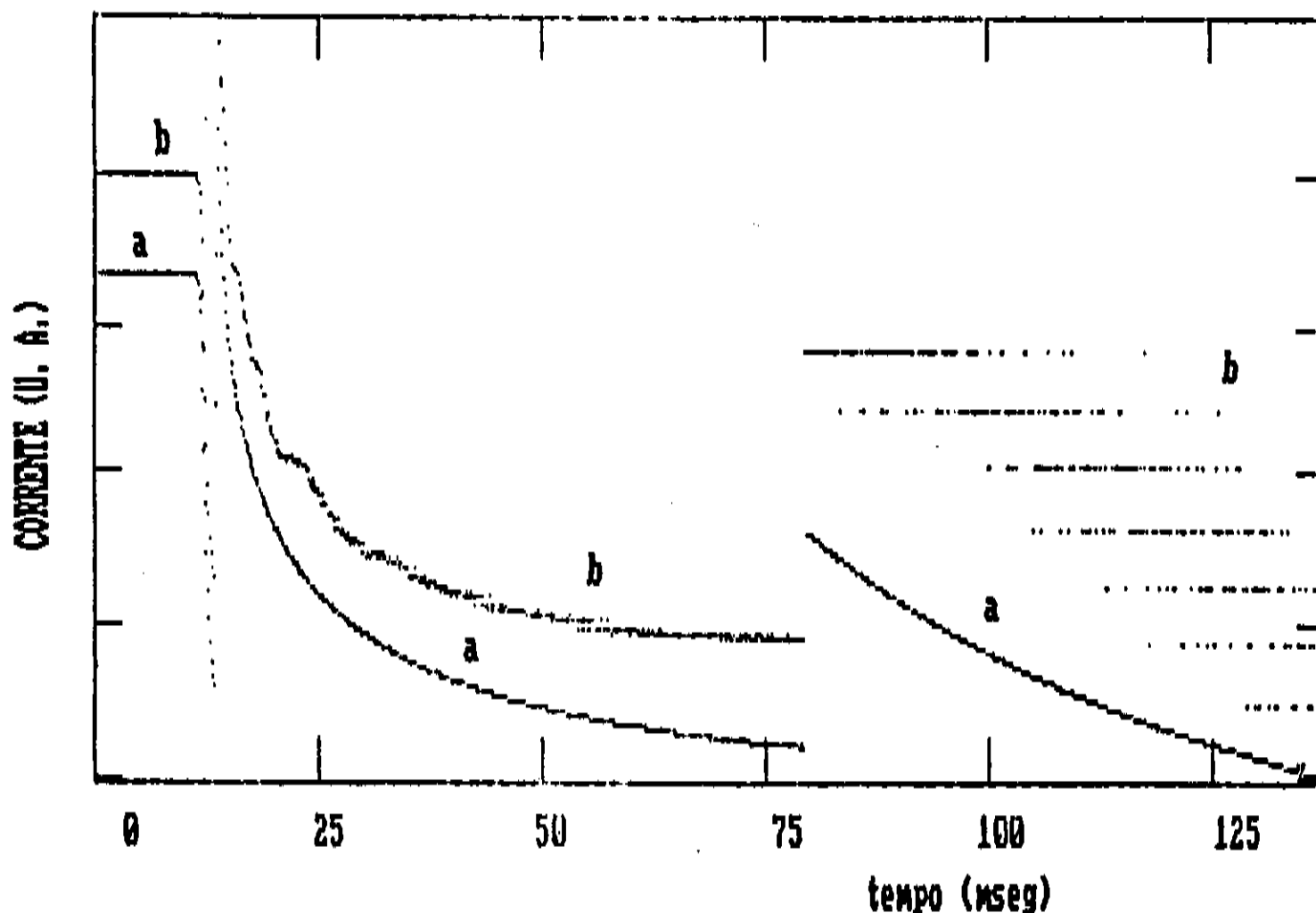


Fig. III.6.2 - Dois transientes de fotocorrente medidos nas mesmas condições: (a) com mudança automática de ganho; (b) com ganho constante $G=1$ e multiplicado por $\times 1$, $\times 10$ e $\times 100$.

transiente obtido com $G=1$ na região em que ele foi multiplicado por 100, quando aparecem degraus que correspondem a um bit no valor digital convertido pela placa AD.

A vantagem de se fazer uma média sobre um grande número de períodos do sinal transiente fica evidente na figura III.6.3. Nesta figura apresentamos um detalhe amplificado de uma série de transientes de fotocorrente obtidos nas mesmas condições, mas resultantes de médias sobre um número variável de períodos. A

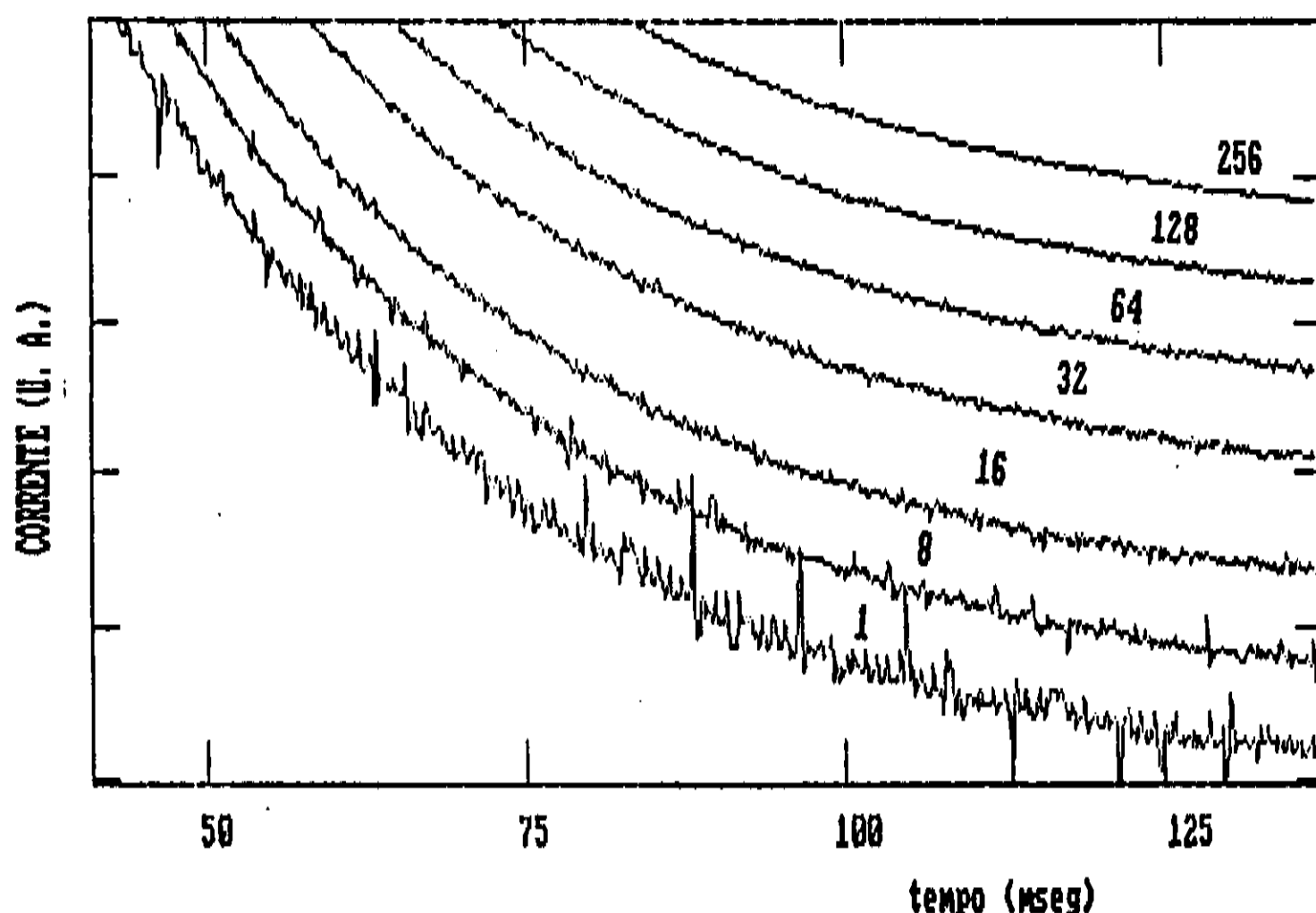


Fig. III.6.3 - Detalhe dos transientes de fotocorrente obtidos com a média sobre diferentes números de períodos conforme indicado.

relação sinal-ruído é bastante pobre quando fazemos a leitura num único período, melhorando sensivelmente quando aumentamos o número de períodos. Escolhemos trabalhar com uma média sobre 32 períodos a cada temperatura. Nesta escolha levamos em conta que a relação sinal ruído apresenta uma melhoria significativa quando a média é feita sobre 32 períodos, e que a temperatura deve permanecer

constante durante o tempo de medida de um transiente. Este tempo de medida é da ordem de 10 seg quando utilizamos 32 períodos para média, durante os quais podemos manter a temperatura constante com um erro menor que $0,1^{\circ}\text{C}$.

A confiabilidade e alta resolução deste sistema digital de medida do transiente de fotocorrente possibilitaram um estudo detalhado da forma do transiente com o qual obtivemos resultados originais e interessantes que apresentaremos nos próximos capítulos.

IV - DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

IV.1. ESPECTROS "PITS"

Na figura IV.1.1 apresentamos uma série de espectros PITS normalizados segundo a definição da equação II.4.3, de uma amostra de GaAs semi-isolante. Os transientes foram induzidos com a radiação de uma lâmpada de W com um filtro de Si. Esta radiação com fótons de energia menor que a banda proibida do GaAs gera uma excitação homogênea ao longo de toda espessura da amostra. A superfície iluminada da amostra foi polarizada negativamente (30 V/cm) numa configuração tipo sanduiche. Nestes espectros a relação $t_2 = 2 t_1$ foi mantida constante para diferentes valores de t_1 . Podemos observar sete picos, sendo que quatro deles são muito bem resolvidos, e 3 são praticamente imperceptíveis mas são melhor evidenciados nas figuras IV.2.5. Estes picos se deslocam para temperaturas menores quando aumentamos o tempo t_1 , o que está de acordo com a condição de máximo discutida na seção II.5. Os valores t_1 e t_2 definem através de relações como as II.5.3 a II.5.6, o que chamamos de constante de tempo do espectro. Nas temperaturas correspondentes aos picos de um espectro PITS, a constante de emissão da armadilha dominante é igual a constante de tempo do espectro.

O conjunto de valores $(T_m, \tau(T_m))$ obtido das posições dos quatro picos mais visíveis nos espectros da figura IV.1.1, estão apresentados na figura IV.1.2 na forma de um gráfico de Arrhenius.

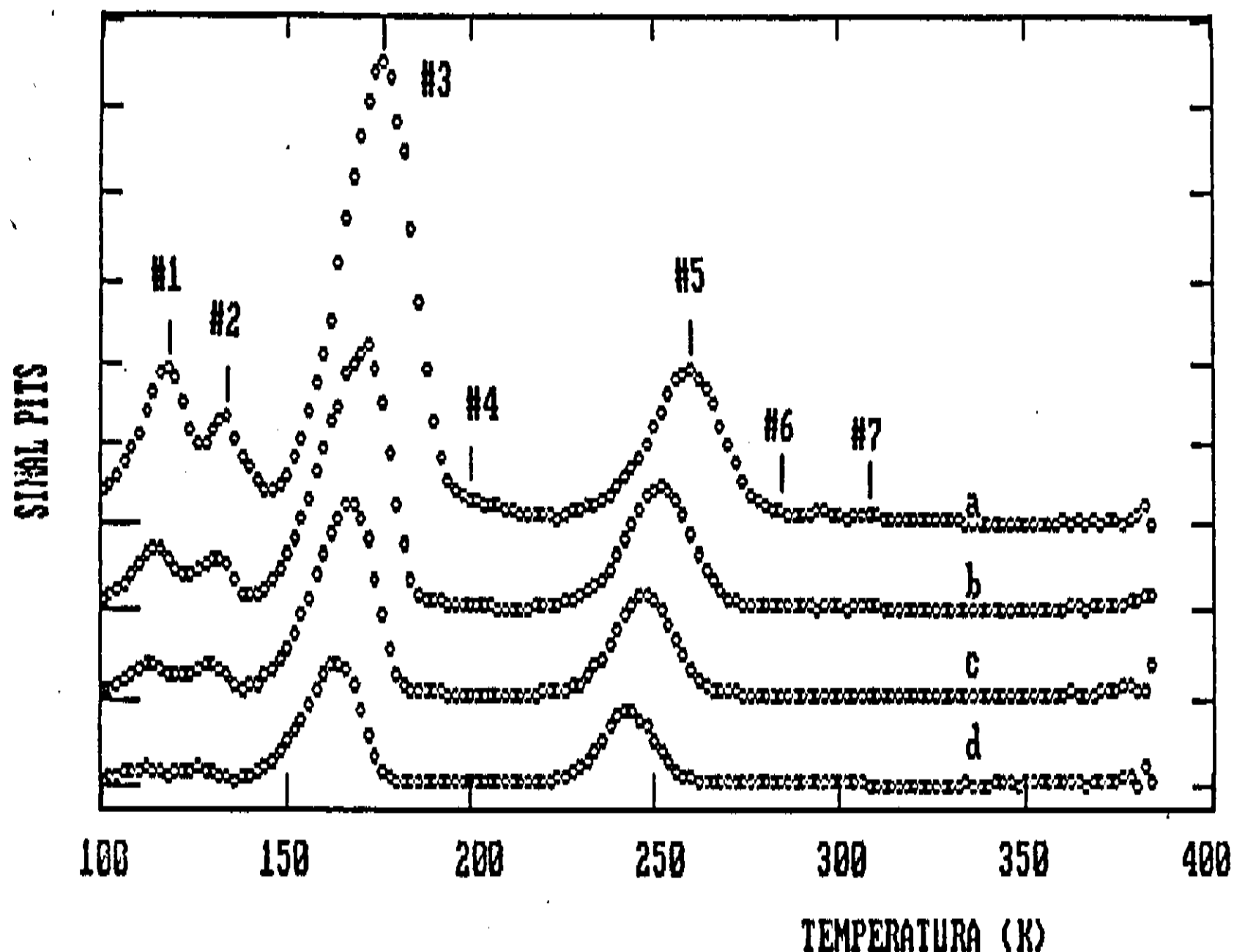


Fig. IV.1.1 - Espectros PITS de uma amostra de GaAs (SI) com $t_2 = 5 t_1$ e (a) $t_1 = 2$ mseg, (b) $t_1 = 5$ mseg, (c) $t_1 = 10$ mseg, (d) $t_1 = 20$ mseg.

As retas representam a equação II.5.7 ajustada por mínimos quadrados aos dados experimentais. As energias de ativação E_t e as seções de choque σ correspondentes a cada pico observado estão apresentadas na tabela IV.1.1. e foram obtidas, respectivamente, dos coeficientes angulares e lineares das retas.

Estas seções de choque da tabela IV.1.1 são muito maiores do que os valores normalmente encontrados na literatura. A causa da obtenção destes valores fisicamente inconsistentes pode estar relacionada com as aproximações utilizadas. Nas próximas seções discutiremos a validade destas aproximações no método de

tratamento de dados e a confiabilidade dos valores encontrados para os parâmetros.

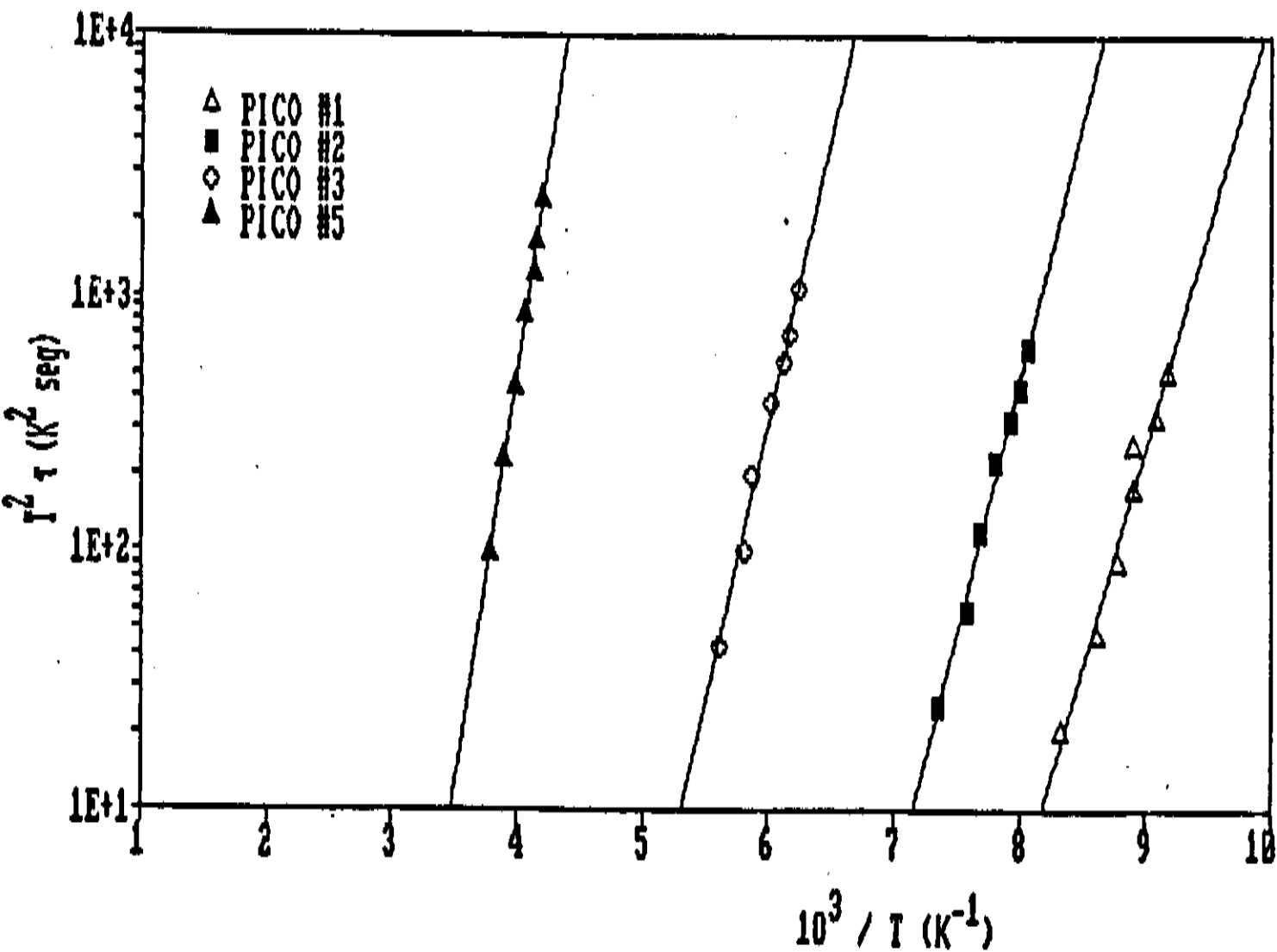


Fig. IV.1.2 - Gráfico de Arrhenius de $T^2\tau$ vs $10^3/T$ para os picos dos espectros da figura IV.1.1 onde τ foi obtido pela relação II.6.2.

# PICO	E_t (eV)	σ_n (cm ²)
#1	0,34	$4,08 \times 10^{-8}$
#2	0,39	$5,47 \times 10^{-8}$
#3	0,43	$1,58 \times 10^{-10}$
#5	0,66	$1,44 \times 10^{-10}$

Tab. IV.1.1 - Energias de ativação e seções de choque dos níveis obtidos dos espectros PITS da figura IV.1.1 e do gráfico de Arrhenius da figura IV.1.2.

IV.2. ANÁLISE DETALHADA DOS TRANSIENTES

Apesar de existirem na literatura vários trabalhos baseados em sistemas PITS digitais [Abele 1987, Yoshie 1983, Deveaud 1980], poucos apresentaram estudos sobre a forma do transiente de corrente. Infelizmente, o único estudo de decaimento da fotocorrente apresentado por Abele et al. [Abele 1987] foi realizado com dados obtidos em sistemas onde a medida da corrente foi feita sobre uma resistencia em série com a amostra. Este arranjo experimental já criticado na seção III.4, fatalmente introduz deformações na forma do transiente. Por outro lado, a maioria dos trabalhos experimentais encontrados na literatura [Hurtes 1978, Yoshie 1985, Kremer 1987, Abele 1987, Fang 1989, Blight 1989] consideram, ao definir o espectro PITS, que o transiente pode ser descrito por uma exponencial simples.

Na figura IV.2.1 apresentamos, em escala logarítmica, um transiente típico medido pelo nosso sistema onde fica evidente que o mesmo não corresponde a uma exponencial simples. Analisando cuidadosamente os transientes de fotocorrente medidos, observamos que a maioria deles corresponde de fato a uma soma de exponenciais. Isto significa que deve existir mais de uma armadilha ativa numa dada temperatura. Aqui definimos uma armadilha ativa como aquela que apresenta constante de tempo de emissão de portadores comparável ao intervalo de tempo mensurável em nosso sistema de medidas. Para analisar estes dados de decaimento, propomos então a seguinte equação para o transiente de corrente:

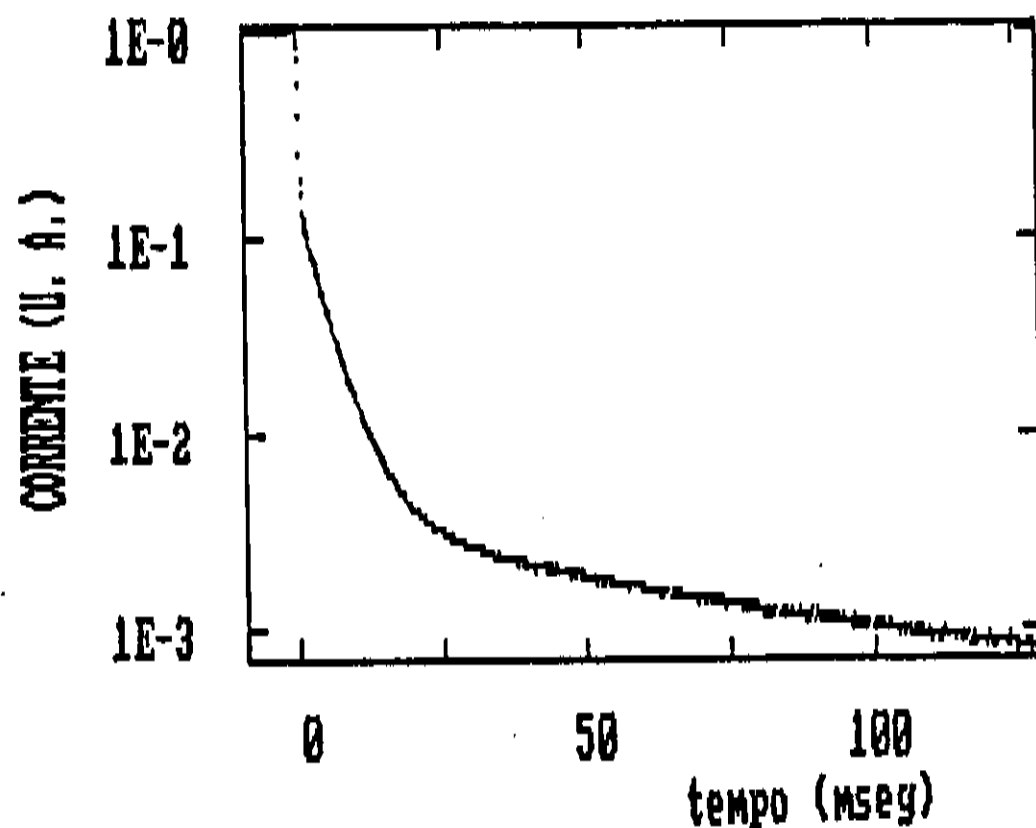


Fig. IV.2.1 - Transiente de fotocorrente típico em escala logarítmica obtido no nosso sistema para GaAs (SI) em $T = 260$ K.

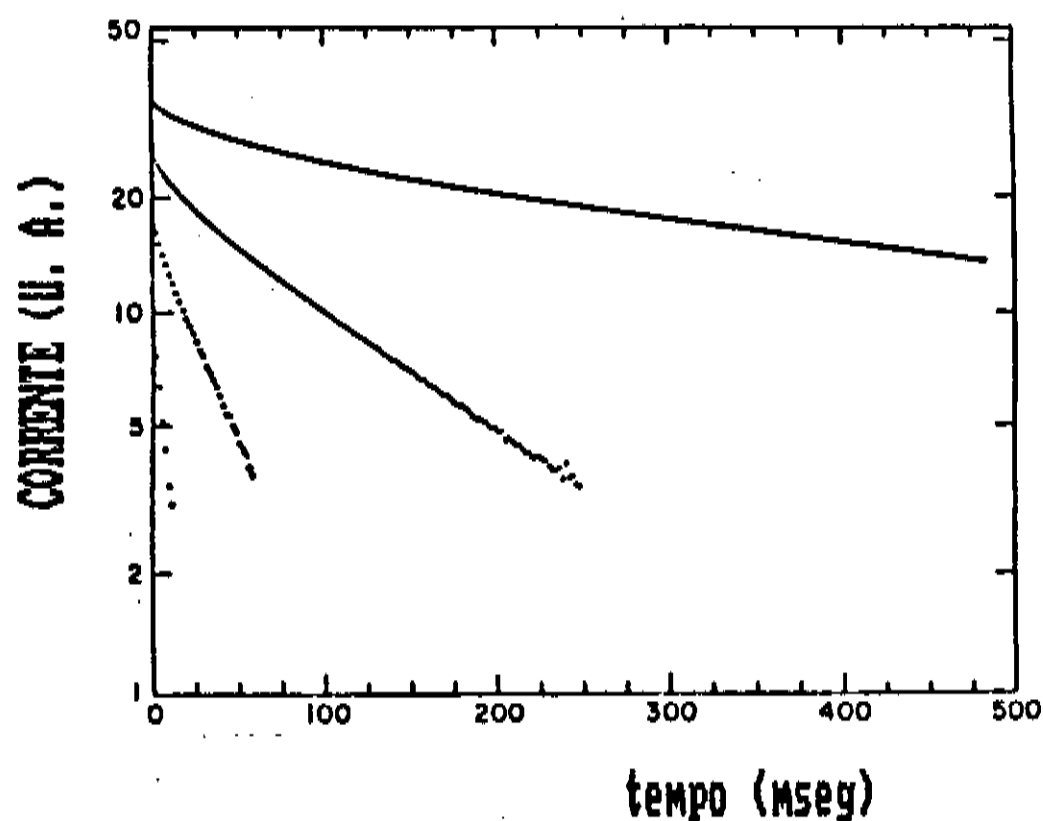


Fig. IV.2.2 - Transiente de fotocorrente em escala logarítmica obtido da referência [Abele 1987].

$$I(t) = I_0 + \sum_i I_{0i} \exp(-t/\tau_i)$$

(IV.2.1)

onde I_0 é a corrente estacionária no escuro, e I_{0i} e τ_i são o pré-fator e a constante de tempo da exponencial correspondente à i -ésima armadilha.

Abele et al. [Abele 1987] também utilizaram este tipo de equação para analisar os transientes medidos experimentalmente, mas chegaram a conclusão de que a solução obtida num ajuste não era unívoca, isto é, que existiam diferentes conjuntos de exponenciais cuja soma descrevia igualmente bem os dados experimentais. Para compreender o insucesso de Abele et al. [Abele 1987] podemos comparar o transiente da figura IV.2.2 medido por eles com o da figura IV.2.1 medido em nosso sistema. Notamos uma grande diferença. O transiente da figura IV.2.2 parece ser uma exponencial simples (reta para $\ln I$ vs t) para tempos longos ($t > 200$ mseg) e não exponencial para tempos menores. Em contraste, o transiente da figura IV.2.1 é composto de duas retas com diferentes coeficientes angulares, correspondendo a duas exponenciais com diferentes constantes de tempo. A passagem do domínio da primeira exponencial ($t < 10$ mseg) para o da segunda exponencial ($t > 10$ mseg) aparece como um ponto de inflexão bem definido. Uma das causas desta diferença e também do insucesso dos autores da referência [Abele 1987], na análise direta dos transientes, pode ser a deformação na forma do decaimento causada pela falha experimental já discutida na seção III.4.

Observando uma série de transientes em função da temperatura, como apresentado na figura IV.2.3, encontramos também um

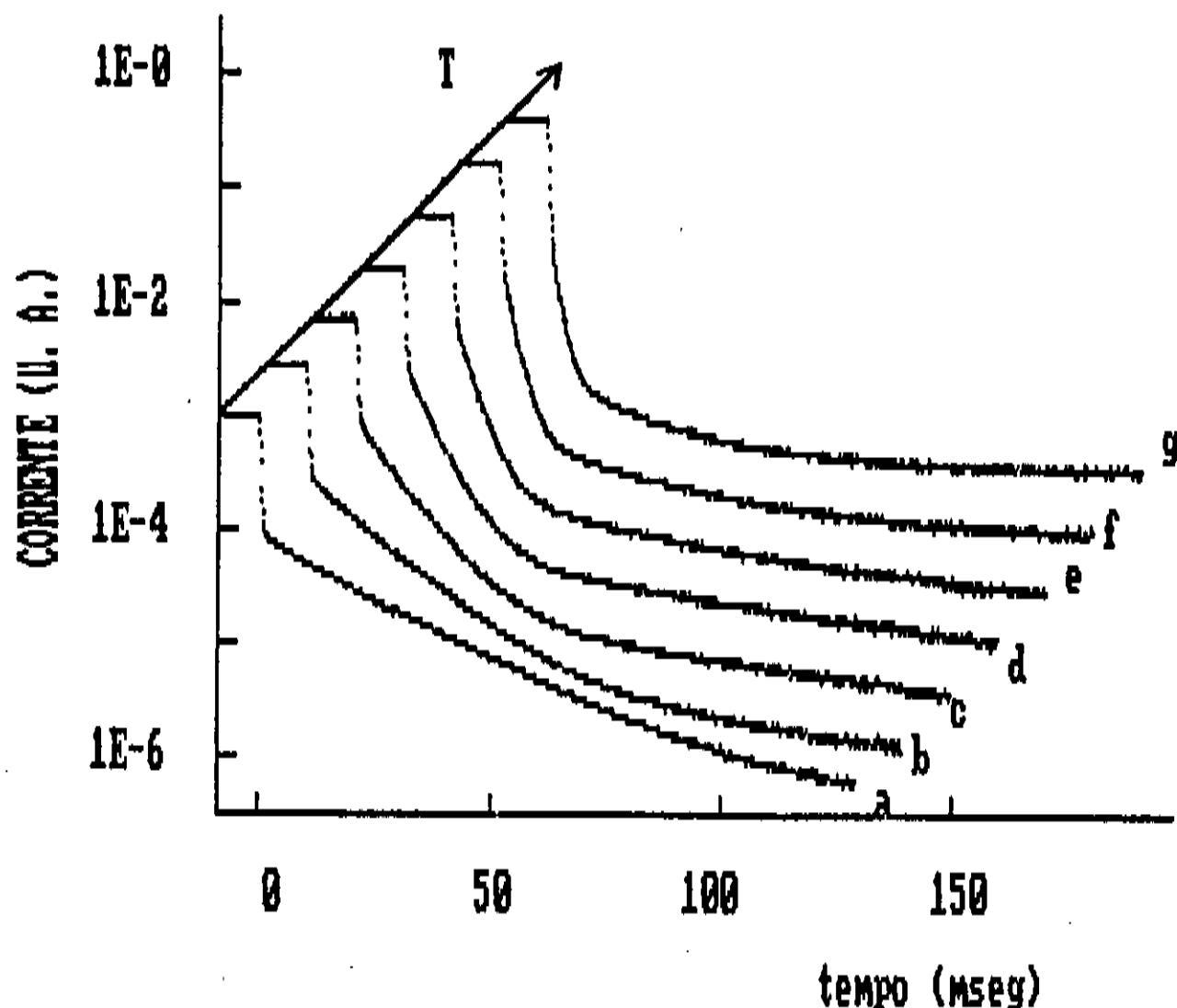


Fig. IV.2.3 - Série de transientes de fotocorrente medidos em (a) 246 K, (b) 250 K, (c) 254 K, (d) 258 K, (e) 262 K, (f) 266 K e (g) 268 K.

comportamento bastante consistente. Notamos que a constante de tempo da exponencial mais visível, dominante em tempos menores, diminui com a temperatura. Estes resultados nos incentivaram a realizar um estudo mais detalhado dos transientes de fotocorrente para obter diretamente as constantes de tempo de decaimento.

Adotamos o seguinte procedimento para ajustar a equação IV.2.1 aos transientes medidos. A escolha inicial dos parâmetros é feita através de vários ajustes parciais em cada uma das regiões de domínio das exponenciais usando a técnica das subtrações sucessivas. Assim, a parte mais lenta do decaimento é ajustada a

uma exponencial. Em seguida, esta exponencial lenta é subtraída dos dados experimentais e o processo é repetido para as exponenciais remanescentes. Os parâmetros obtidos são utilizados como valores iniciais num programa de ajuste baseado no método dos mínimos quadrados, considerando como função de ajuste a soma de exponenciais da equação IV.2.1.

Após realizar uma série de ajustes, verificamos que as exponenciais com constantes de tempo entre 1 e 30 mseg podiam ser determinadas com boa precisão (melhor que 5%). O problema da indeterminação de constantes de tempo menores que 1 mseg está relacionada com o tempo finito de corte da luz, que se sobrepõe aos decaimentos mais rápidos. No caso de constantes de tempo maiores que 30 mseg, o problema está relacionado com a indeterminação da corrente de escuro I_0 . Estes limites também estão relacionados com os tempos característicos do nosso sistema, ou seja, $\Delta t = 0,1373$ mseg e $t_{\text{total de medida}} = 1000 * \Delta t = 137,3$ mseg. Estes limites não implicam em prejuízo, já que o intervalo de 1 a 30 mseg é suficiente para a determinação dos parâmetros da maioria das armadilhas.

Na hipótese de as armadilhas serem independentes e a equação II.3.14 ser válida para cada armadilha, o transiente de corrente pode ser descrito como:

$$I(t) = \mu_n q \epsilon A \left[n_0 + g_l \tau_n \exp(-t/\tau_n) - \sum_i \frac{N_{ti} \tau_n}{\tau_i (1 + \frac{t}{\tau_n} / g_l \tau_n C_n)} \exp(-t/\tau_n) + \sum_i \frac{N_{ti} \tau_n}{\tau_i (1 + \frac{t}{\tau_n} / g_l \tau_n C_n)} \exp(-t/\tau_i) \right] \quad (\text{IV.2.2})$$

O segundo e o terceiro termos desta equação tendem a zero rapidamente para $t \gg 10^{-9}$ seg, e foram desprezados nos ajustes. Para evitar problemas analíticos relacionados com estes termos e com o tempo de corte da luz, os dados coletados durante o primeiro milissegundo dos transientes experimentais também não foram considerados na nossa análise.

Podemos normalizar os transientes em relação à corrente estacionária sob iluminação e no escuro, de maneira análoga a definição de sinal PITS normalizado:

$$I_{norm}(t) = \frac{I_{exp}(t) - I_{exp}(t+\infty)}{I_{exp}(0) - I_{exp}(t+\infty)} \tag{IV.2.3}$$

que junto com a equação IV.2.2 leva a:

$$I_{norm}(t) = \sum_i \frac{N_{ti}}{\tau_i (g_i + e^{t/\tau_n} C_n)} \exp(-t/\tau_i) \tag{IV.2.4}$$

Os parâmetros τ_i obtidos pelos ajustes da equação IV.2.4 aos transientes pelo método dos mínimos quadrados correspondentes aos picos #5, #6 e #7, para $236\text{ K} \leq T \leq 342\text{ K}$, estão apresentados na tabela IV.2.1. Os valores de $\tau_i(T)$ obtidos destes ajustes foram utilizados para traçar os gráficos de Arrhenius apresentados na figura IV.2.4. As energias de ativação e as seções de choque obtidas destes gráficos de Arrhenius, estão apresentadas na tabela IV.2.2, onde foi mantida a notação dos picos da figura IV.1.1.

T (K)	I_{o_5}	τ_5 (mseg)	I_{o_6}	τ_6 (mseg)	I_{o_7}	τ_7 (mseg)
..236.....	4,21E-2	..61,15.....				
..238.....	4,98E-2	..51,47.....				
..240.....	5,90E-2	..41,06.....				

..242.	6,75E-2.	32,03.					
..244.	7,06E-2.	25,87.					
..246.	7,23E-2.	16,33.	2,15E-3.	27,63.			
..248.	9,93E-2.	15,02.	2,27E-3.	144,4.			
..250.	1,09E-1.	11,75.	2,71E-3.	63,61.			
..252.	1,18E-1.	9,53.	2,67E-3.	71,07.			
..254.	1,26E-1.	7,60.	2,88E-3.	68,28.			
..256.	1,33E-1.	6,18.	3,09E-3.	57,09.			
..258.	1,37E-1.	5,06.	3,21E-3.	57,04.			
..260.	1,41E-1.	4,19.	3,41E-3.	49,89.			
..262.	1,45E-1.	3,37.	3,48E-3.	43,34.			
..264.	1,50E-1.	2,76.	3,68E-3.	35,95.			
..266.	1,47E-1.	2,34.	3,68E-3.	31,70.			
..268.	1,34E-1.	2,08.	3,55E-3.	28,61.			
..270.	1,25E-1.	1,76.	3,67E-3.	24,30.			
..272.							
..274.	1,51E-1.	1,07.	4,72E-3.	11,44.	7,63E-4.	45,85.	
..276.							
..278.	1,50E-1.	0,75.	6,14E-3.	7,98.	8,47E-4.	57,14.	
..280.	1,53E-1.	0,65.	6,48E-3.	6,91.	9,32E-4.	58,74.	
..282.	1,81E-1.	0,53.	7,59E-3.	5,57.	1,12E-3.	59,74.	
..284.			1,08E-2.	4,02.	1,32E-3.	49,51.	
..286.			1,13E-2.	3,66.	1,49E-3.	51,27.	
..288.			1,27E-2.	3,02.	1,71E-3.	44,30.	
..290.			1,32E-2.	2,71.	1,91E-3.	39,25.	
..292.							
..294.			1,54E-2.	2,41.	2,19E-3.	33,32.	
..296.			2,58E-2.	1,44.	3,26E-3.	14,35.	
..298.			2,39E-2.	1,45.	3,47E-3.	20,20.	
..300.			1,80E-2.	1,72.	3,07E-3.	19,60.	
..302.							
..304.			2,84E-2.	1,03.	4,03E-3.	12,20.	
..306.			3,18E-2.	0,97.	4,15E-3.	10,45.	
..308.			4,85E-2.	0,71.	4,45E-3.	8,66.	
..310.			7,02E-2.	0,54.	5,39E-3.	7,06.	
..312.			9,90E-2.	0,44.	5,39E-3.	5,81.	
..314.					6,58E-3.	4,91.	
..316.					7,73E-3.	3,61.	
..318.					7,88E-3.	3,16.	
..320.					8,54E-3.	2,75.	
..322.					7,17E-3.	2,77.	
..324.					1,10E-2.	1,72.	
..326.					1,10E-2.	1,50.	
..328.					1,11E-2.	1,36.	
..330.							
..332.					1,87E-2.	0,83.	
..334.					1,75E-2.	0,78.	
..336.					3,16E-2.	0,57.	
..338.					6,29E-2.	0,43.	
..340.							
..342.					2,51E-1.	0,29.	

Tab IV.2.1 - Pré-fator normalizado e constante de tempo das exponenciais obtidas por ajuste da equação IV.2.4 aos transientes de fotocorrente.

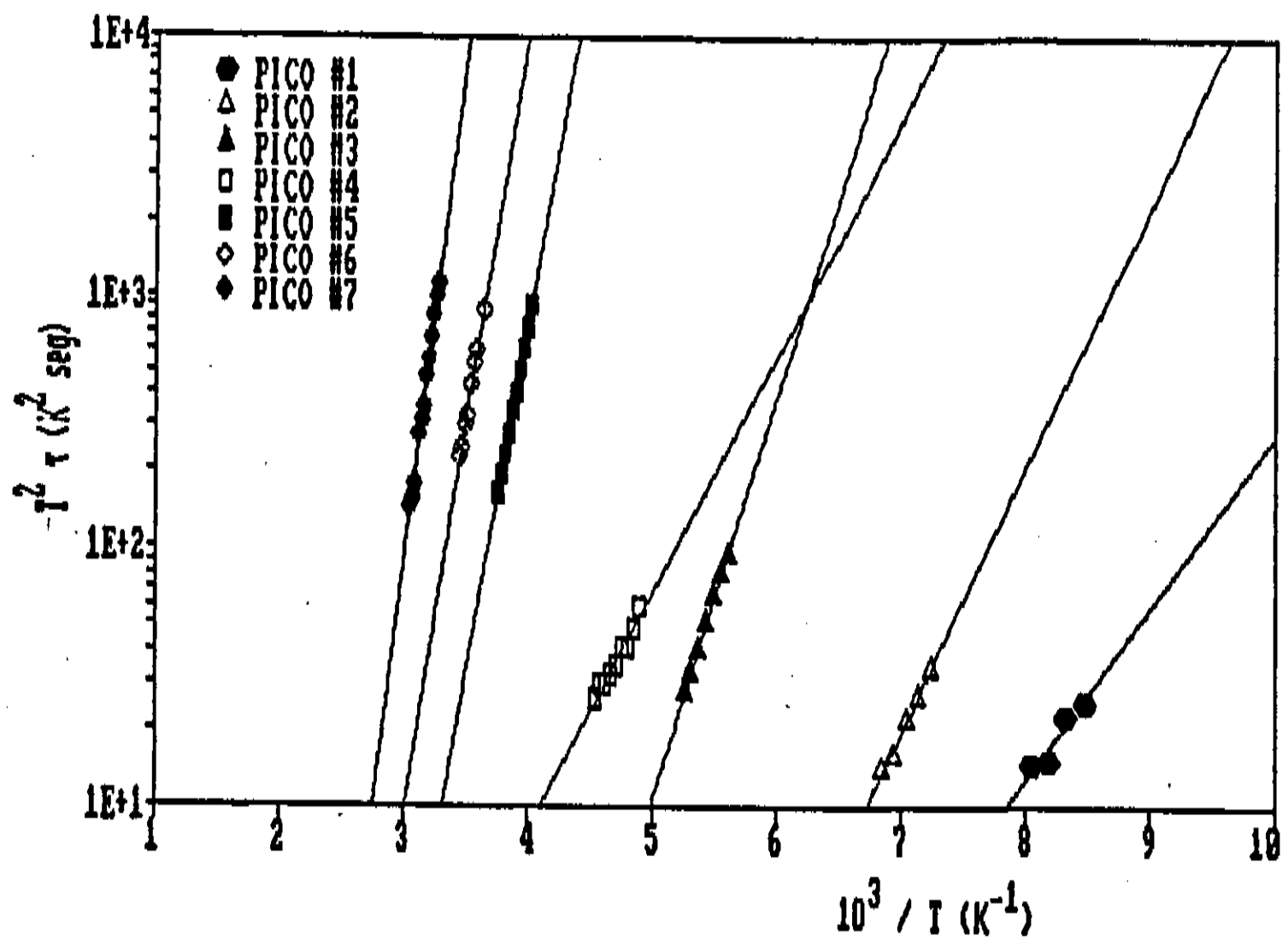


Fig. IV.2.4 - Gráfico de Arrhenius de $T^2\tau$ vs. $10^3/T$ correspondentes aos picos da figura IV.1.1 onde τ foi obtido pelo ajuste direto dos transientes.

# PICO	E_t (eV)	σ_n (cm ²)
#1	0,13	9×10^{-17}
#2	0,20	2×10^{-15}
#3	0,31	3×10^{-14}
#4	0,18	3×10^{-18}
#5	0,54	5×10^{-13}
#6	0,57	3×10^{-13}
#7	0,78	3×10^{-11}

Tab. IV.2.2 - Energias de ativação e seções de choque dos níveis profundos de GaAs (SI) obtidos dos ajustes dos transientes de fotocorrente nas temperaturas próximas aos picos da figura V.1.1.

Os parâmetros correspondentes aos picos #4, #6 e #7, apresentados na tabela IV.2.2, não aparecem na tabela IV.1.1,

obtidos pelo método de análise tradicional baseado no espectro PITS. Estes picos não são resolvidos no espectro PITS, e a determinação das posições de seus máximos são praticamente impossíveis. Na verdade, o fato de os ajustes fornecerem um conjunto de dados bastante consistentes sobre os picos #6 e #7 é realmente surpreendente, já que estes picos são cerca de 50 vezes menos intensos que os demais e, mesmo numa escala bastante ampliada como a da figura IV.2.5, eles não são resolvidos. Esta maior sensibilidade obtida pelo método alternativo de ajuste direto dos transientes é uma das vantagens para a determinação dos parâmetros característicos de uma armadilha a temperaturas elevadas.

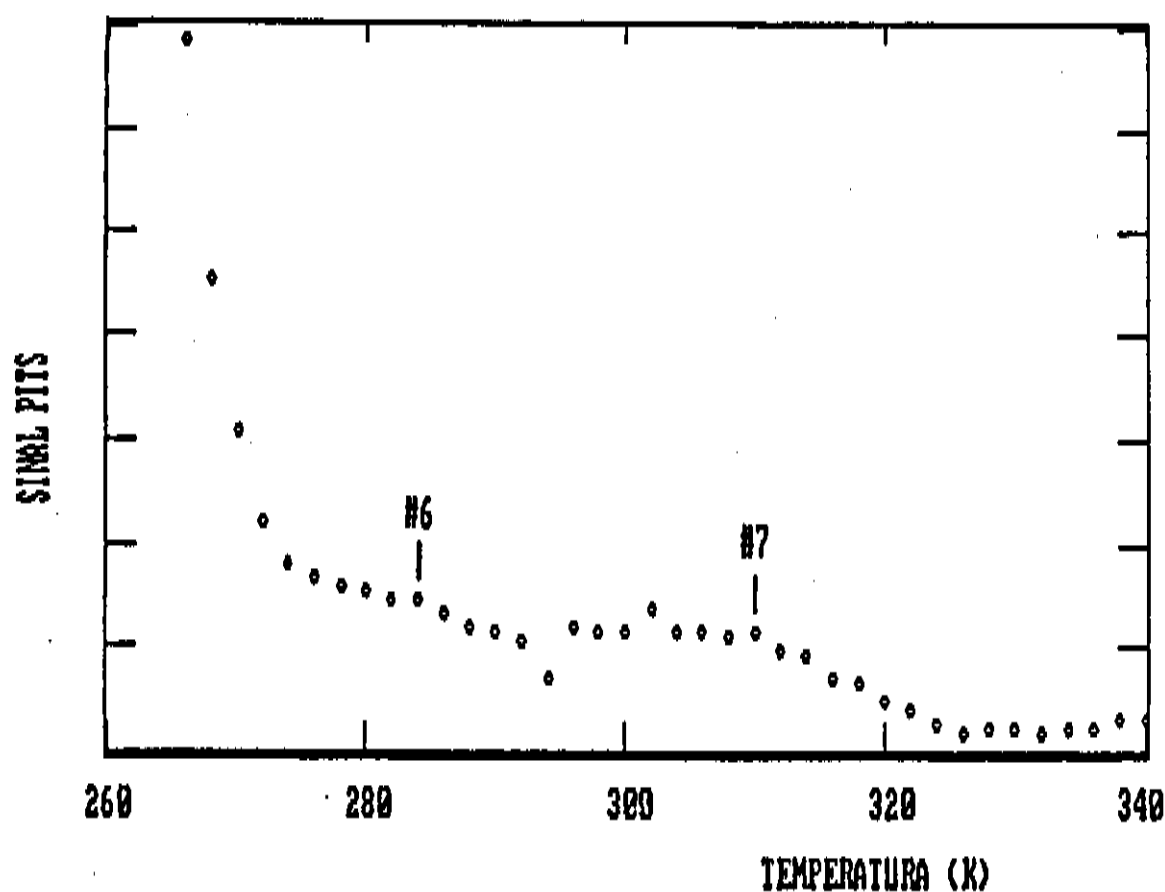


Fig. IV.2.5 - Detalhe do espectro PITS da figura IV.1.1 ampliado x50, mostrando os picos #6 e #7.

Nas próximas seções, utilizaremos os resultados da análise direta dos transientes apresentados na tabela IV.2.2 para estudar

a validade do método tradicional baseado no espectro PITS.

IV.3. CRÍTICA DO MÉTODO TRADICIONAL DE TRATAMENTO DE DADOS

Vimos na capítulo III que a obtenção da energia de ativação e da seção de choque de uma armadilha depende apenas da determinação de sua constante de tempo de emissão de portadores em diferentes temperaturas. No método de tratamento de dados que estamos propondo neste trabalho, estas constantes de tempo são obtidas da análise direta do transiente. No método tradicional, baseado na definição de um espectro PITS, estas constantes de tempo são obtidas de uma maneira indireta que relaciona τ com a temperatura de um máximo de PCTD. Esta relação depende da validade da expressão II.6.2, que envolve uma série de aproximações. Analisaremos primeiro o fato de o transiente consistir na realidade de uma soma de várias exponenciais ao invés de uma única exponencial, como foi considerado para deduzir a equação II.4.16. Em seguida, estudaremos a evolução da forma destas exponenciais com a temperatura, comparando-as com as previsões teóricas.

Na figura IV.3.1 apresentamos uma série de transientes correspondentes ao pico #5 da figura IV.1.1, onde marcamos também as posições das janelas t_1 e t_2 utilizadas para traçar o espectro PITS da figura IV.1.1.a. É evidente que, dependendo da escolha dos tempos t_1 e t_2 e da temperatura, o sinal PCTD envolverá uma mistura das duas exponenciais presentes nestes decaimentos. Este problema será tanto maior, quanto maiores forem os valores dos pré-fatores das exponenciais envolvidas. Além disso, o problema se agrava no caso em que as constantes de tempo das duas exponenciais

forem mais próximas, pois neste caso, a região de superposição das duas exponenciais deve aumentar.

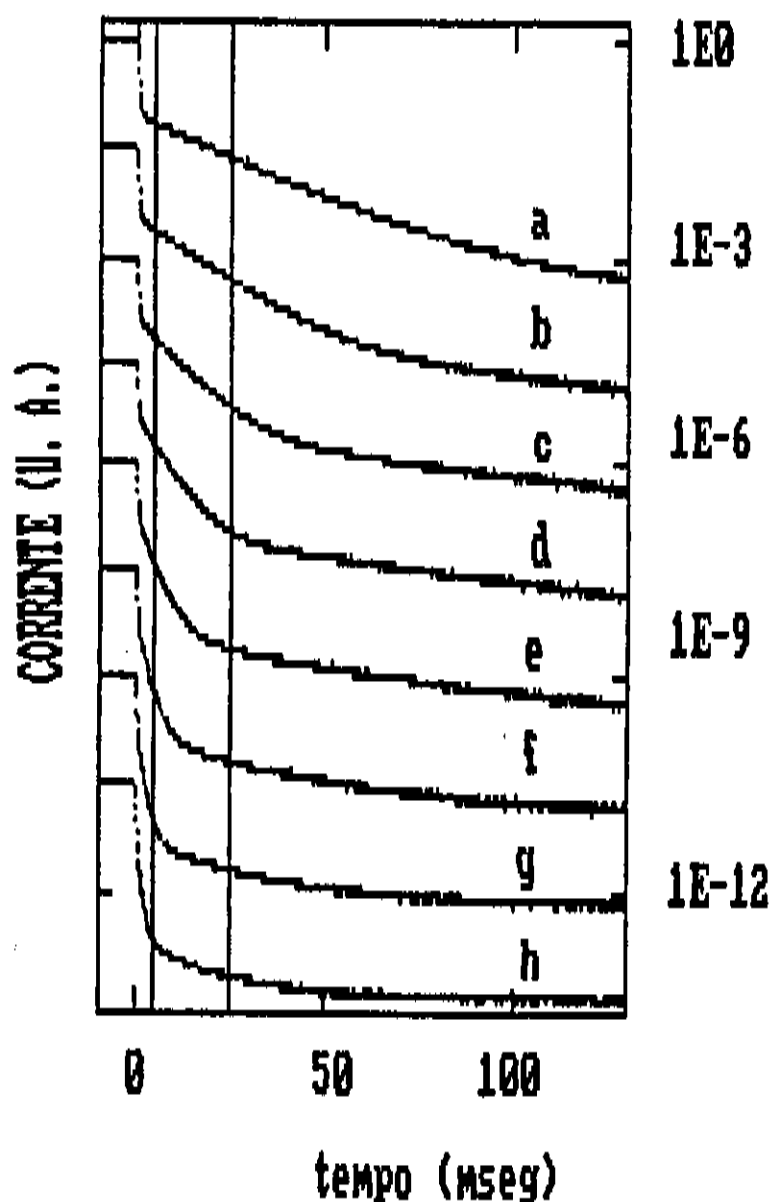


Fig. IV.3.1 - Série de transientes de fotocorrente correspondentes ao pico #5 da figura IV.1.1 medidos em (a) 246 K, (b) 250 K, (c) 254 K, (d) 258 K, (e) 262 K, (f) 266 K, (g) 270 K, (h) 274 K. Os dois traços verticais correspondem às posições das janelas $t_1 = 5$ mseg e $t_2 = 25$ mseg.

Nas figuras IV.3.2 a IV.3.4 apresentamos alguns ajustes típicos da expressão IV.2.1 aos transientes medidos. Na maioria dos casos o transiente pode ser bem descrito por uma soma de duas ou três exponenciais. Na região de temperaturas mais altas ($T > 250$ K) a consistência desta descrição é maior, sendo possível acompanhar a evolução do tempo de emissão de uma armadilha desde valores da ordem de 30 mseg até o limite inferior de 1 mseg. Na

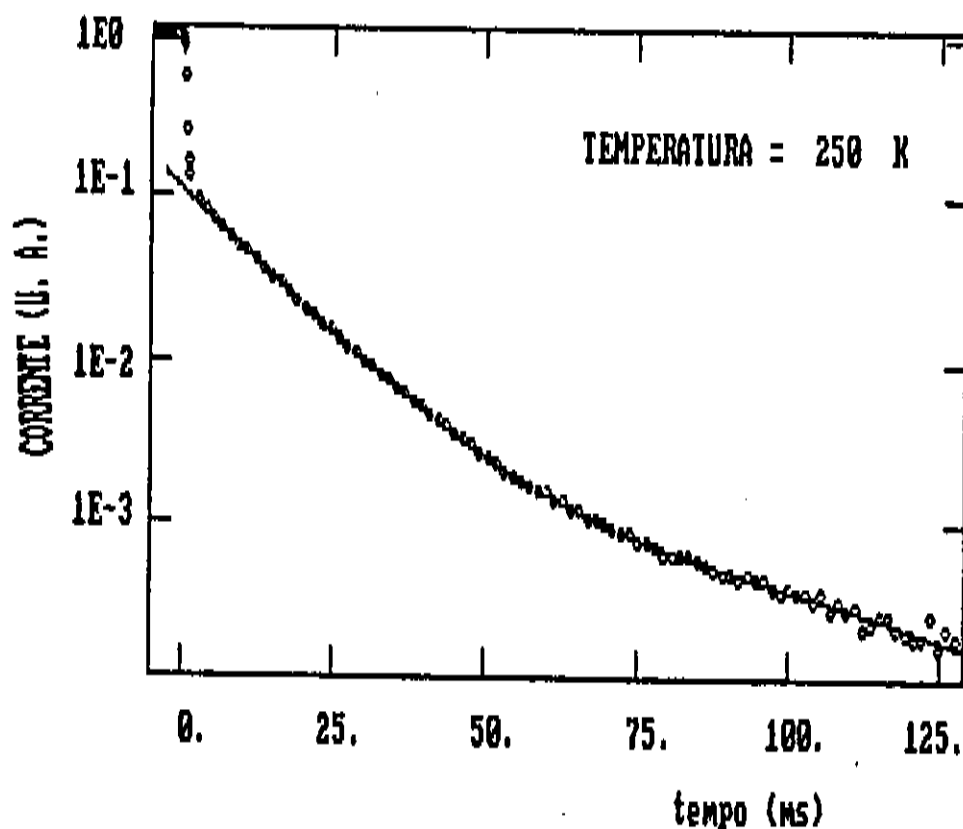


Fig. IV.3.2 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{o1} = 0,109$, $\tau_1 = 11,75$ mseg, $I_{o2} = 0,0027$ e $\tau_2 = 63,61$ mseg.

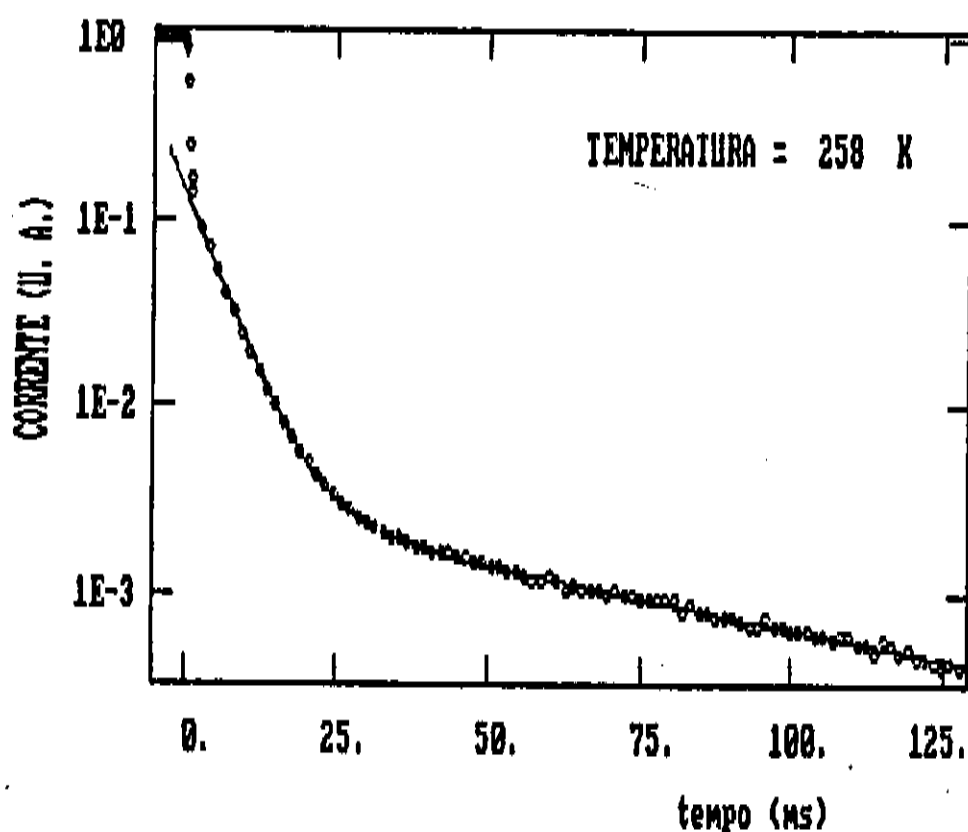


Fig. IV.3.3 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{o1} = 0,137$, $\tau_1 = 5,06$ mseg, $I_{o2} = 0,0032$ e $\tau_2 = 57,04$ mseg.

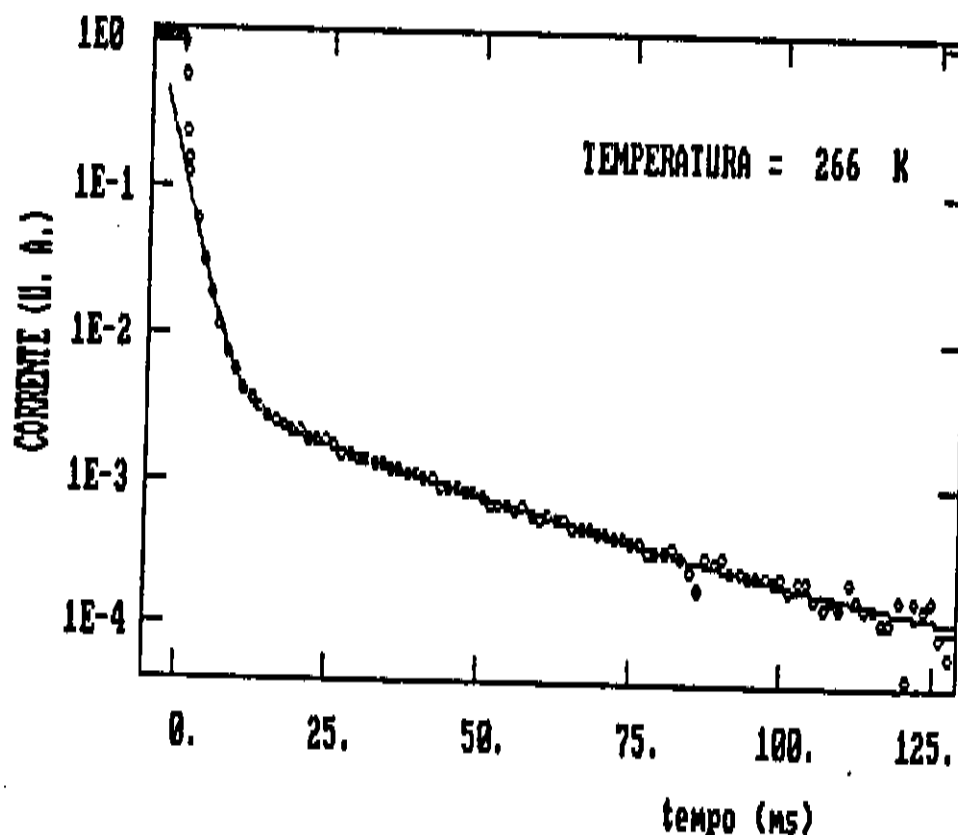


Fig. IV.3.4 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{o1} = 0,147$, $\tau_1 = 2,34$ mseg, $I_{o2} = 0,0037$ e $\tau_2 = 31,7$ mseg.

figura IV.2.3 apresentamos uma série de transientes correspondentes ao pico #3, através dos quais podemos acompanhar visualmente esta evolução.

Este acompanhamento torna-se mais difícil na região de temperaturas menores que 250 K. Nesta região, os valores de τ obtidos pelos ajustes seguem uma evolução com a temperatura segundo a equação II.3.10 somente num intervalo reduzido de 1 a 5 mseg. Nesta região de $T < 250$ K, obtivemos uma segunda exponencial com uma constante de tempo que não evolui com a temperatura, mantendo-se sempre da ordem de 20 mseg. Este comportamento anômalo pode estar relacionado com um caráter não exponencial do transiente para tempos mais longos, como foi discutido por Balland et al. [Balland 1980(b)]. Apesar desta limitação, os valores de E_t

e σ obtidos com os valores de τ entre 1 e 5 mseg para os picos #1, #2 e #3 parecem ser consistentes fisicamente.

As relações entre os picos dos espectros PITS e a constante de tempo (relações II.8.3 - II.8.6) foram obtidas usando a expressão II.8.2, onde foi considerado que as armadilhas foram completamente preenchidas com portadores durante o período de iluminação. Vamos analisar a validade desta suposição usando os dados da tabela IV.2.1. Na expressão mais geral para a ocupação de um nível, o pre-fator das exponenciais que compoem um transiente normalizado (equação IV.2.4) pode ser escrito na forma:

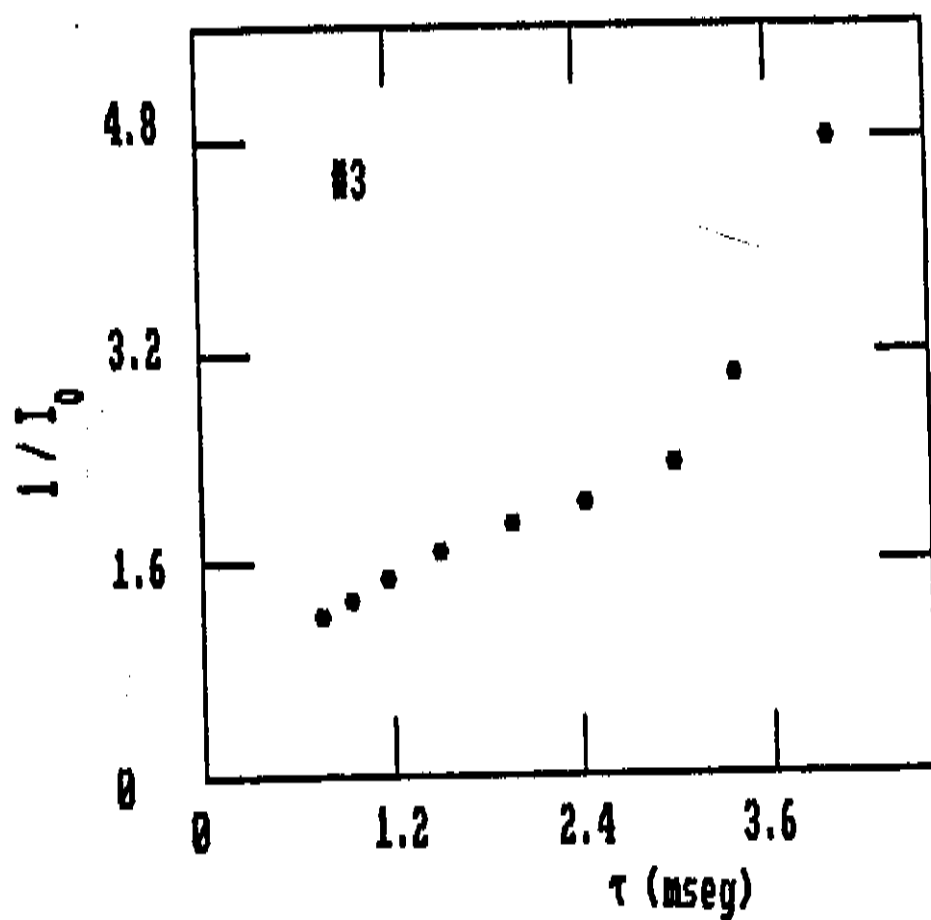
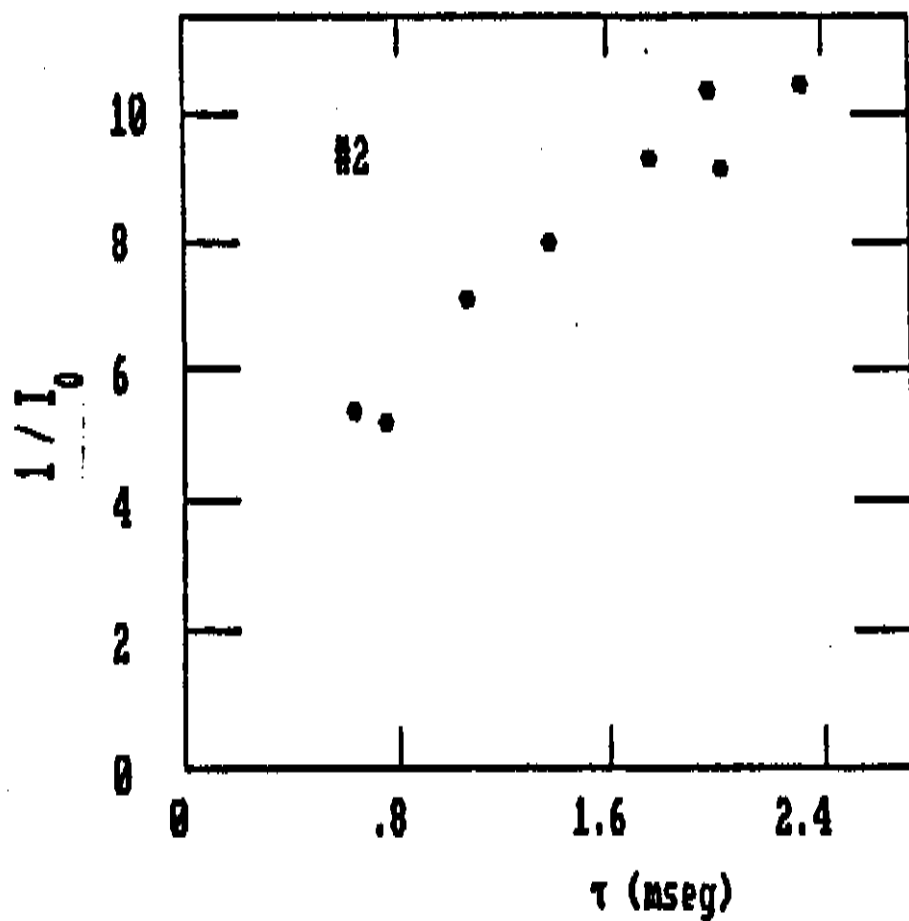
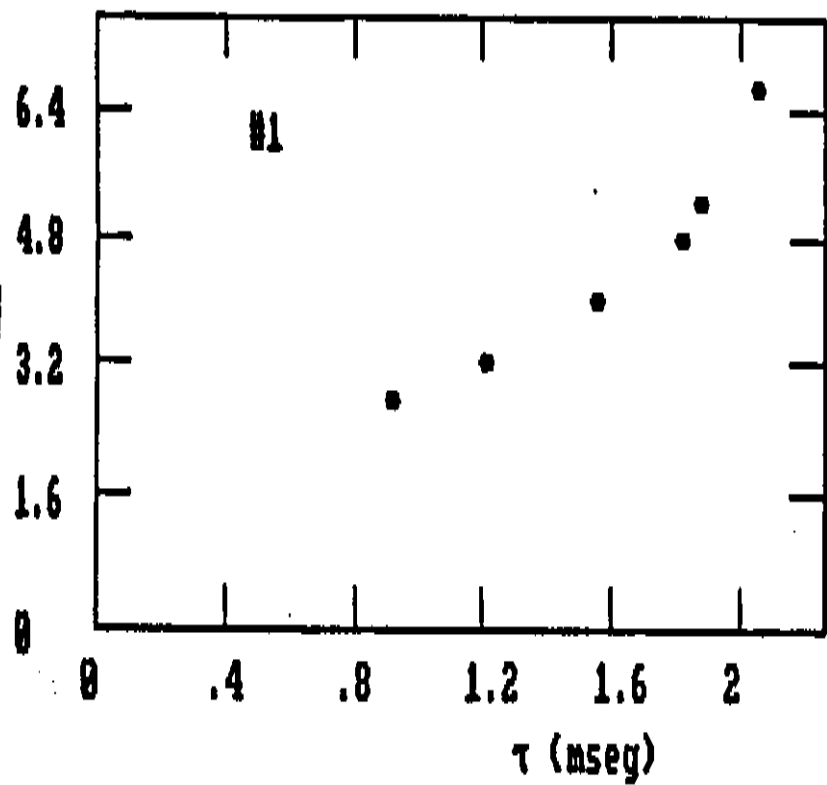
$$(I_{oi})^{-1} = \frac{g_l}{N_{ti}} \tau_i + \frac{1}{C_n \tau_n N_{ti}} \quad (IV.3.1)$$

Se fizermos um gráfico de $(I_{oi})^{-1}$ em função de τ_i deveremos obter uma reta com coeficiente angular g_l/N_{ti} e coeficiente linear $1/C_n \tau_n N_{ti}$, desde que $C_n \tau_n$ não varie muito no intervalo de temperatura considerado. Na condição de que as armadilhas sejam completamente preenchidas ($g_l \tau_n C_n \gg e_n$) o pré-fator das exponenciais torna-se:

$$(I_i)^{-1} = \left[\frac{g_l}{N_{ti}} \right] \tau_i \quad (IV.3.2)$$

Portanto, a condição de enchimento completo das armadilhas com a luz só será válida para os picos cujos gráficos $(I_i)^{-1} \times (\tau_i)$ forem tais que o coeficiente linear da reta obtida seja desprezível.

Os gráficos de $(I_i)^{-1} \times (\tau_i)$ obtidos com os dados da tabela IV.2.1 estão apresentados na figuras IV.3.5. Vemos que a condição



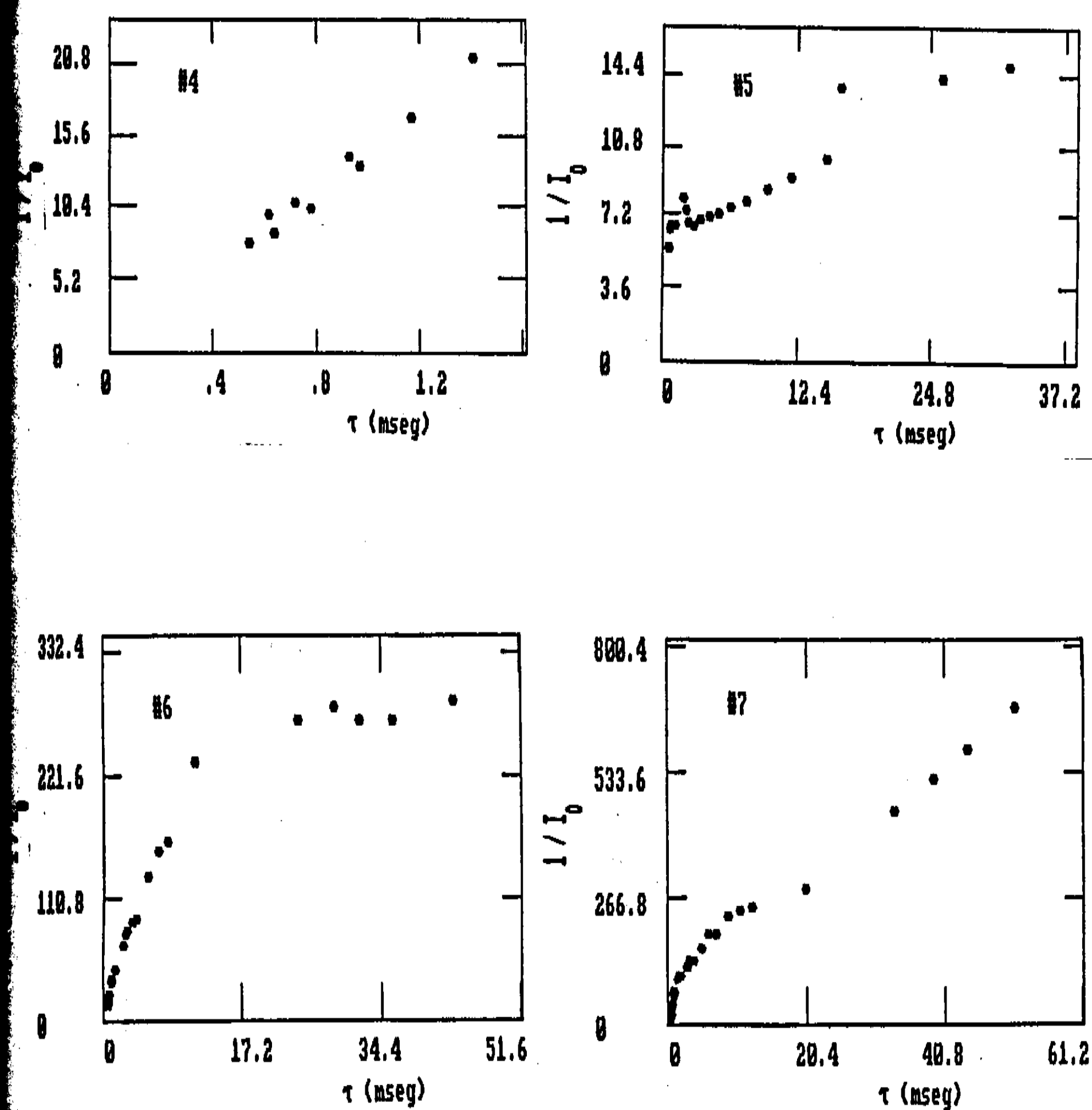


Fig. IV.3.5 - Gráficos de $1/I_0$ vs τ para os picos #1 a #7 correspondentes à figura IV.1.1 onde τ e I_0 foram obtidos por ajuste dos transientes.

de enchimento completo não é satisfeita pela maioria das armadilhas, sendo uma aproximação razoável apenas para as armadilhas correspondentes aos picos #6 e #7, que aparecem a temperaturas mais altas. Isto significa que a intensidade de iluminação extrínseca utilizada não é suficientemente forte para encher completamente os níveis com menor energia de ativação das nossas amostras. Portanto, as aproximações utilizadas na determinação de τ a partir dos máximos de $P_n(T)$ nem sempre são satisfeitas, e as relações II.5.3 a II.5.6 podem levar a resultados bastante errôneos, principalmente no caso das armadilhas correspondentes aos picos #1, #2, #3, #4 e #5.

Vejamos então qual seria a relação correta entre a T , t_1 , t_2 e τ para os níveis que não satisfazem a condição de enchimento durante a iluminação. Repetindo o procedimento descrito na seção II.6, mas considerando que a densidade de armadilhas ocupadas no momento em que a luz é desligada é dada pela equação II.4.12, a condição de derivada nula nos leva a seguinte relação:

$$\exp \left[\frac{t_2 - t_1}{\tau} \right] = \frac{t_2 \left(1 + \frac{1}{\tau_n C_n g_l \tau} \right) - \tau}{t_1 \left(1 + \frac{1}{\tau_n C_n g_l \tau} \right) - \tau} \quad (\text{IV.3.2})$$

que depende das constantes τ_n , C_n e g_l . Podemos analisar também o extremo oposto, que corresponde a situação de limite de uma radiação muito fraca ($g_l \tau_n C_n \ll e_n$). Neste caso aplicando a condição $(dP/dT)=0$ chegamos a uma expressão bem mais simples:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(t_2/t_1)} \quad (\text{IV.3.3})$$

Tomando por exemplo o caso $t_1 = 5$ mseg e $t_2 = 25$ mseg, obtemos os seguintes valores de τ usando as relações, II.6.2 e IV.3.3, que correspondem aos dois casos extremos de preenchimento da armadilha com a luz:

$\tau = 4,7095$ mseg.....usando a relação II.6.2,

$\tau = 12,4267$ mseg.....usando a relação IV.3.3.

Naturalmente, apesar da relação IV.3.2 ser exata, ela apresenta incertezas na determinação do valor de τ devido às incertezas nas determinações dos valores de τ_n , C_n e g_l , de modo que não podemos utilizá-la em nossa análise. Entretanto podemos afirmar que, numa relação correta, τ deve assumir um valor intermediário entre aqueles obtidos através das relações II.6.2 e IV.3.3, apresentados acima. Assim a diferença entre os valores de E_t e σ obtidos através do espectro PCTD e aqueles obtidos pelo ajuste direto dos transientes pode ser devida à indeterminação em τ . A mesma causa também pode ser atribuída às grandes variações dos valores de E_t e σ apresentados na literatura obtidos pelos picos de espectros PITS.

É lógico que os valores de τ obtidos por ajuste direto do transiente são mais confiáveis, entretanto, detalhes da sua validade serão discutidos no decorrer deste trabalho. As observações de que os níveis com energia de ativação menores não são completamente preenchidos pelo pulso de luz, é resultado específico dos dados apresentados aqui, pois dependem da intensidade g_l utilizada. No entanto, podemos estender a dúvida sobre a validade da equação II.6.2 à maioria das medidas que

utilizaram uma lâmpada de W como fonte de excitação, pois a intensidade g_1 é tipicamente da mesma ordem de grandeza do que utilizado no nosso sistema. Por outro lado, a vantagem da excitação extrínseca é que ela permite obter informações do "bulk" com pouca influência da superfície.

No próximo item tentaremos identificar os níveis observados usando os dados obtidos pela análise direta dos transientes.

IV.4. IDENTIFICAÇÃO DOS NÍVEIS

Nas tabelas IV.4.1 (armadilhas de elétrons) e IV.4.2 (armadilhas de buracos) apresentamos os dados de E_t e σ relativos aos diversos níveis observados no GaAs, usando a nomenclatura mais encontrada na literatura.

TABELA IV.4.1

Nome	E_t (eV)	σ (cm ²)	Material	Referencia	Técnica
—	0,14	1×10^{-16}		Fairman 1980	PITS.
—	0,14	5×10^{-18}		Yoshie 1985	PITS.
—	0,15	8×10^{-14}		Fairman 1980	PITS.
EA7	0,14		bulk	Auret 1986	DLTS.
EL10	0,17	7×10^{-15}	MBE, VPE	Mircea 1975, Ashby 1976	DLTS.
EA6	0,18		bulk	Auret 1986	DLTS.
EI3	0,18	2×10^{-14}	VPE	Lefreve 1977	DLTS.
EI2	0,19	1×10^{-14}	VPE	Lefreve 1977	DLTS.
EL14	0,21	5×10^{-16}	bulk	Martin 1977	DLTS.
EL17	0,22	9×10^{-13}	bulk	Auret 1986	DLTS.
EL9	0,22	7×10^{-15}	VPE	Mircea 1975	DLTS.
—	0,22	2×10^{-15}		Fairman 1979	PITS.
E	0,26	6×10^{-12}	LEC	Kitagawara 1986	DLTS.
—	0,26	2×10^{-12}		Fairman 1980	PITS.
EL8	0,27	8×10^{-15}	VPE, MBE	Mircea 1975, Blood 1983	DLTS.
EL8	0,23	6×10^{-16}	bulk	Abele 1987	PITS.
EB7	0,30	2×10^{-14}	MBE	Lang 1976	DLTS.
M4	0,31	1×10^{-14}	MOCVD	Buchwald 1987	DLTS.

—	0,31	4×10^{-16}		Yoshie 1988	PITS.
EL6	0,35	2×10^{-12}	bulk, MBE, LEC	Kitagawara 1986, Martin 1977	DLTS.
EL6	0,28	5×10^{-15}	bulk	Abele 1987	PITS.
EL6	0,34	4×10^{-14}		Fairman 1980	PITS.
EL6	0,38	3×10^{-14}	bulk	Young 1986	PITS.
Cr	0,36	7×10^{-16}	bulk	Abele 1987	PITS.
EL16	0,37	4×10^{-18}	VPE	Martin 1977	DLTS.
EL5	0,38	4×10^{-14}	bulk	Auret 1986	DLTS.
EL5	0,42	2×10^{-13}	VPE, LEC	Ashby 1976, Kitagawara 1986	DLTS.
E	0,42	2×10^{-11}	MOCVD	Watanabe 1983	DLTS.
EI1	0,43	7×10^{-16}	VPE	Lefreuve 1977	DLTS.
EI1	0,48	9×10^{-14}	bulk	Abele 1987	PITS.
—	0,46	2×10^{-13}		Fairman 1979	PITS.
—	0,48	7×10^{-12}		Fairman 1979	PITS.
—	0,48	6×10^{-14}		Fairman 1979	PITS.
EL4	0,51	1×10^{-12}	MBE, MOCVD	Watanabe 1983, Blood 1983, Martin 1977	DLTS.
EL4	0,51	1×10^{-12}		Fairman 1980	PITS.
EL4	0,50	1×10^{-11}	bulk	Young 1986	PITS.
EL4	0,59	1×10^{-13}	bulk	Young 1986	PITS.
EA2	0,52	5×10^{-16}	bulk	Auret 1986	DLTS.
EA3	0,52	5×10^{-14}	bulk	Auret 1986	DLTS.
—	0,55	1×10^{-13}		Fairman 1979	PITS.
—	0,55	7×10^{-15}		Fairman 1979	PITS.
—	0,55	8×10^{-14}		Yoshie 1985	PITS.
M3	0,61	3×10^{-14}	MOCVD	Buchwald 1987	DLTS.
E	0,74	3×10^{-13}	MOCVD	Sakai 1974	DLTS.
EL3	0,57	1×10^{-13}	bulk, LEC, VPE	Ashby 1976, Kitagawara 1986	DLTS.
EL3	0,58	3×10^{-13}	bulk	Abele 1987	PITS.
EL3	0,60	1×10^{-12}		Fairman 1980	PITS.
EL3	0,50	1×10^{-12}	bulk	Young 1986	PITS.
EL3	0,59	1×10^{-14}	bulk	Young 1986	PITS.
—	0,65	1×10^{-13}		Fairman 1980	PITS.
EL12	0,78	5×10^{-12}	bulk, VPE, MBE	Mircea 1975, Day 1981	DLTS.
EL12	0,75	1×10^{-13}	bulk	Abele 1987	PITS.
EL12	0,72	1×10^{-9}	bulk	Young 1986	PITS.
EL12	0,89	1×10^{-12}	bulk	Young 1986	PITS.
EL2	0,82	1×10^{-14}	bulk, VPE, LPE, MOCVD	Ashby 1976, Sheng 1985, Kitagawara 1986, Bhattacharya 1980, Sakai 1974	DLTS.
EL2	0,81	1×10^{-13}	bulk	Auret 1986	DLTS.
EL2	0,75	1×10^{-11}		Fairman 1979	PITS.
EL2	0,75	3×10^{-14}	bulk	Young 1986	PITS.
EL2	0,80	3×10^{-14}	bulk	Young 1986	PITS.
EB1	0,86	4×10^{-14}	VPE	Lang 1975	DLTS.

TABELA IV.4.2

Nome	E_t (eV)	σ_p (cm ²)	Material	Referencia	Técnica
.HA6.....	0,18.....	2×10^{-14}	bulk.....	Auret 1986.....	DLTS.
.HL12.....	0,27.....	1×10^{-14}	LPE.....	Mitonneau 1977...	DLTS.
.HL6.....	0,32.....	6×10^{-14}	VPE.....	Mitonneau 1977...	DLTS.
.HL7.....	0,35.....	7×10^{-15}	MBE.....	Mitonneau 1977...	DLTS.
.HB5.....	0,40.....	2×10^{-13}	LPE, bulk.....	Lang 1975, Mitonneau 1977...	DLTS.
.HT1.....	0,44.....	1×10^{-14}	VPE.....	Sakai 1974.....	DLTS.
.HS3.....	0,44.....	5×10^{-18}	LPE.....	Hasegawa 1975 Kitagawara 198...	DLTS.
.HB4.....	0,44.....	4×10^{-14}	LPE, VPE.....	Lang 1975, Mitonneau 1977...	DLTS.
.HB3.....	0,52.....	4×10^{-16}	LPE, MBE.....	Lang 1975, Mitonneau 1977...	DLTS.
.H.....	0,57.....	3×10^{-15}	MOCVD.....	Watanabe 1983...	DLTS.
.HS1.....	0,58.....	2×10^{-19}	LPE.....	Hasegawa 1975...	DLTS.
.HL3.....	0,59.....	3×10^{-15}	VPE.....	Mitonneau 1977...	DLTS.
.HS2.....	0,64.....	4×10^{-16}	LPE, VPE.....	Hasegawa 1975...	DLTS.
.HB2.....	0,71.....	1×10^{-14}	LPE, VPE.....	Lang 1975, Mitonneau 1977...	DLTS.
.HB1.....	0,78.....	5×10^{-16}	LPE, VPE.....	Lang 1975, Mitonneau 1977, Henini 1986.....	DLTS.

Os dados de DLTS foram obtidos do artigo de revisão de Bourgoïn et al. [Bourgoïn 1988], que apresenta um resumo dos dados obtidos por esta técnica. Apesar dos valores de energia observados constituírem praticamente um contínuo entre 0,1 e 0,9 eV, observamos que as energias de alguns níveis mais conhecidos como o EL2, EL3, EL4, EL6 e o EL12, são bem estabelecidas. Na determinação da seção de choque de captura, a indeterminação parece ser ainda maior.

Os picos #1, #2, #3 e #4 foram observados numa região de temperaturas onde a consistência do método de ajustes não foi completa. Este problema, já abordado na seção anterior, não prejudicou a determinação dos parâmetros correspondentes ao pico

#3 que é muito intenso, mas dificultou a caracterização dos picos #1, #2 e #4.

Usando gráficos de Arrhenius determinamos para o pico #1: $E_t = 0,13$ eV e $\sigma = 9 \times 10^{-17}$ cm², enquanto que para o pico #2 obtivemos: $E_t = 0,20$ eV e $\sigma = 2 \times 10^{-15}$ cm²). Estes valores parecem ser fisicamente consistentes. Valores de E_t e σ semelhantes aos obtidos para o nível correspondente ao pico #1 foram observados em substratos de GaAs, e podemos identificá-lo com o nível denominado EA7 [Auret 1986]. Vários níveis foram observados com energia próxima daquela que obtivemos para o pico #2. Os diferentes autores propuseram uma série de denominações para estes níveis: EL10, EA6, EI3, EI2, EL14, EL9. A seção de choque não é suficientemente precisa para optarmos por uma destas siglas, mas observamos que apenas dois deles correspondem a substratos de GaAs, o EA6 [Auret 1986] e o EL14 [Martin 1977].

Os valores obtidos para o pico #4 ($E_t = 0,18$ eV e $\sigma = 3 \times 10^{-18}$ cm²) que aparece muito fraco no espectro PITS, são mais duvidosos. Apesar dele corresponder a temperaturas mais altas que o pico #3, obtivemos uma energia de ativação menor, o que não parece ser muito consistente fisicamente.

Os parâmetros obtidos por ajuste dos transientes para o pico #3, o mais intenso em nossos espectros PITS ($E_t = 0,31$ eV e $\sigma = 3 \times 10^{-14}$ cm²) são semelhantes àqueles apresentados sob a nome de EL6. Este defeito foi observado na maioria dos substratos de GaAs, em altas concentrações (10^{15} - 10^{18} cm⁻³) [Bourgoin 1988, Fang 1989, Auret 1986].

A energia obtida pelo método de ajuste do transiente para o pico #5 ($E_t = 0,54$ eV e $\sigma = 5 \times 10^{-13}$ cm²) é muito próxima dos

valores apresentados para os níveis EL4 [Young, Martin 1977], EA2 e EA3 [Auret 1986]. Níveis com parâmetros bastante semelhantes foram observados por outros autores através de medidas PITS, mas não foram propostas identificações. Auret [Auret 1986] observou por DLTS um nível com energia semelhante em substratos de GaAs, e verificou que sua concentração é maior na superfície, principalmente em amostras com superfícies danificadas. Levando em consideração os problemas de determinação de τ nos espectros PITS, e a consequente indeterminação nos valores de E_t encontrados na literatura, preferimos fazer a identificação dos níveis baseados nos dados da literatura obtidos por DLTS. Assim, identificamos o pico #5 como sendo o EA3 [Auret 1986].

A energia obtida por ajuste dos transientes relativos ao pico #6 ($E_t = 0,57$ eV e $\sigma = 3 \times 10^{-13}$ cm²) é ligeiramente maior que a encontrada para o pico #5. Sua energia e seção de choque concordam bastante bem com os dados apresentados para o nível EL3, que também é observado na maioria dos substratos de GaAs [Ashby 1976, Kitagawara 1986].

Finalmente, os parâmetros obtidos para o pico #7 ($E_t = 0,78$ eV e $\sigma = 3 \times 10^{-11}$ cm²) parecem se enquadrar melhor na identificação com o nível EL12 observado em substratos, mas valores semelhantes obtidos por PITS já foram associados com o nível EL2 [Auret 1986, Ashby 1976].

A obtenção dos parâmetros característicos através do método tradicional baseado no sinal PITS só pode ser aplicado para os picos #1, #2, #4 e #5, onde o espectro $P_n(T)$ apresenta máximos bem definidos. Entretanto, em todos estes casos as energias obtidas foram maiores do que as correspondentes obtidas no método de

ajuste de transientes. A discrepância é maior para os picos que aparecem a menores temperaturas, o que reforça a hipótese de que estes níveis não são completamente preenchidos durante a iluminação, como discutimos na seção anterior. As seções de choque obtidas pelo método do espectro PITS também são muito grandes ($\sigma \approx 10^{-8} - 10^{-10} \text{ cm}^2$), fora do intervalo de valores característicos para este parâmetro, conforme observamos nas tabelas IV.4.1 e IV.4.2.

IV.5. INFLUÊNCIA DA ILUMINAÇÃO DE FUNDO

Na figura IV.5.1 apresentamos dois espectros PITS de uma mesma amostra de GaAs (SI), obtidos sob as mesmas condições experimentais, exceto que num deles utilizamos, além da lampada de W com filtro de Si modulada a 2,5 Hz, uma segunda lampada de W, também filtrada com Si, como uma iluminação constante de fundo. A polarização foi feita na forma sanduíche (30 V/cm), com polo positivo na superfície iluminada. Utilizamos duas lâmpadas idênticas de modo a obter intensidades semelhantes, com diferença inferior a 10%. Observamos que com a iluminação de fundo, todo o espectro PITS torna-se menos intenso e em algumas regiões de temperatura o sinal torna-se negativo. Os valores negativos significam uma inversão da derivada do transiente, que não pode ser explicada pelas equações discutidas na seção II.4. Quando introduzimos uma radiação de fundo, estamos alterando basicamente as condições de equilíbrio estacionário. Neste caso, a hipótese de que as armadilhas são completamente esvaziadas no período "escuro"

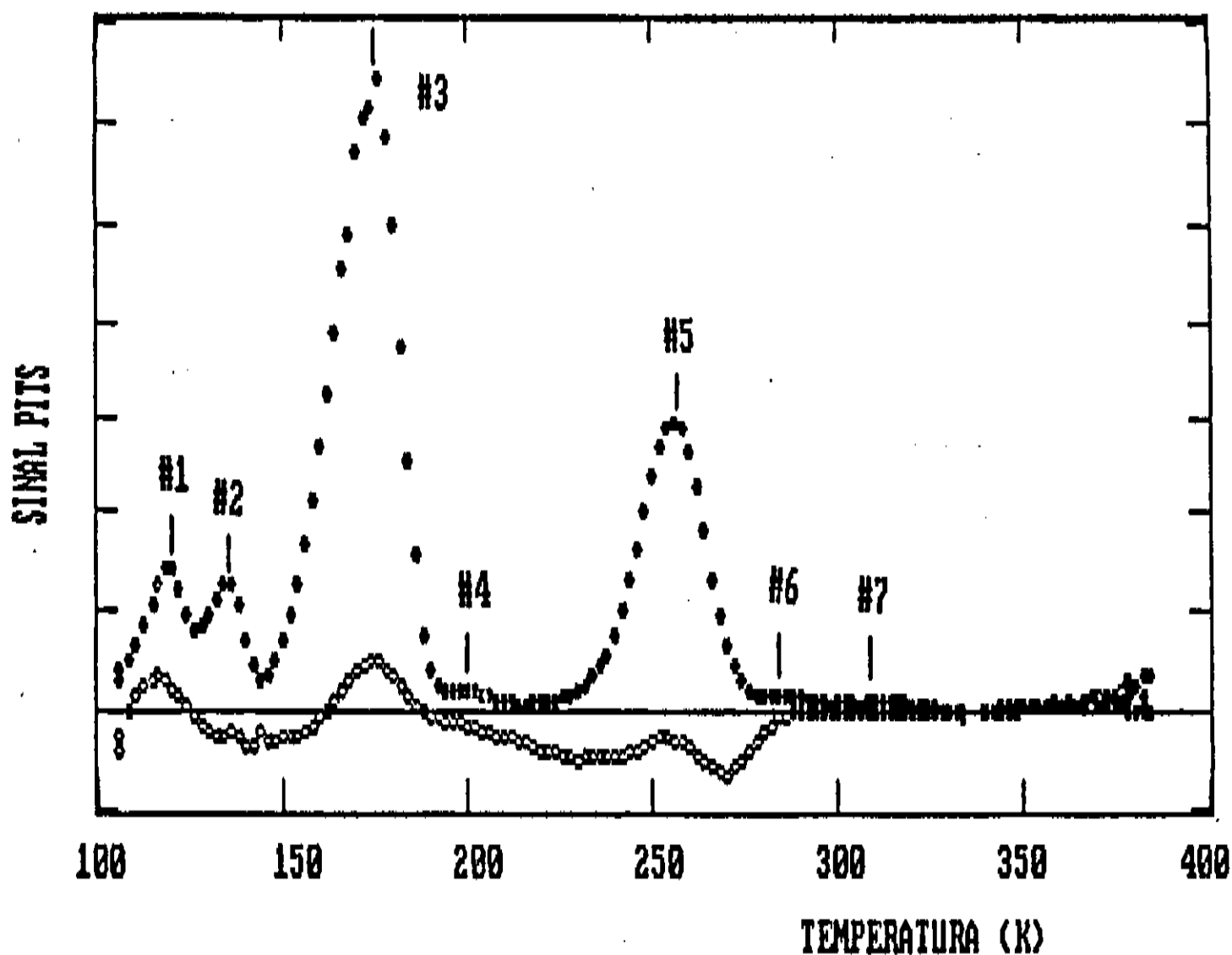


Fig. IV.5.1 - Espectros PITS de uma amostra de GaAs (SI) com superfícies polidas (• • •) sem iluminação de fundo e (o o o) com iluminação de fundo constante.

não é mais razoável, o que invalida toda a análise do capítulo II. Discutiremos as equações para este caso especial na seção IV.8, incluindo o aparecimento do sinal de PITS negativo.

Podemos observar dois máximos positivos no espectro PITS obtido com duas lâmpadas, um em $T \approx 110$ K e outro em $T \approx 175$ K, que provavelmente correspondem, respectivamente, aos picos #1 e #3 do espectro sem a segunda lâmpada. Por outro lado, parece que os picos #2, #4, #6 e #7 desapareceram. No intervalo de temperatura onde normalmente observamos o pico #5, o sinal PITS do espectro com duas lâmpadas é negativo, mas continuamos observando um máximo local na temperatura correspondente a este pico ($T \approx 254$

K). Isto sugere que o pico #3 continua a existir mas sobreposto a um sinal negativo.

Nas figura IV.5.2, IV.5.3 e IV.5.4 apresentamos transientes respectivamente em $T = 252\text{ K}$, $T = 262\text{ K}$ e $T = 272\text{ K}$, medidos com as duas lâmpadas, onde o sinal PITS é negativo. Analisando a forma destes transientes, concluímos que eles podem ser bem descritos como a soma de duas exponenciais, uma exponencial com pre-fator positivo e outra com pre-fator negativo. Nas figuras IV.5.2, IV.5.3 e IV.5.4 também estão apresentados os melhores ajustes de uma soma de duas exponenciais aos dados experimentais. As

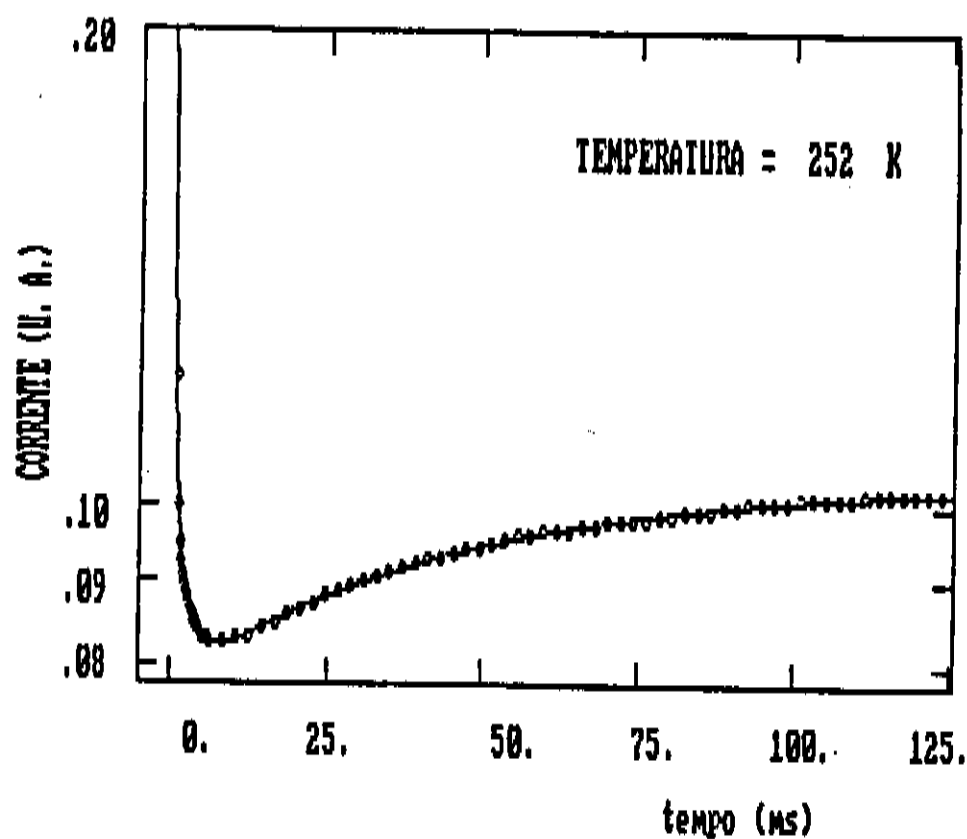


Fig. IV.5.2 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{0+} = 0,024$, $\tau_+ = 2,56\text{ mseg}$, $I_{0-} = -0,028$ e $\tau_- = 40,06\text{ mseg}$.

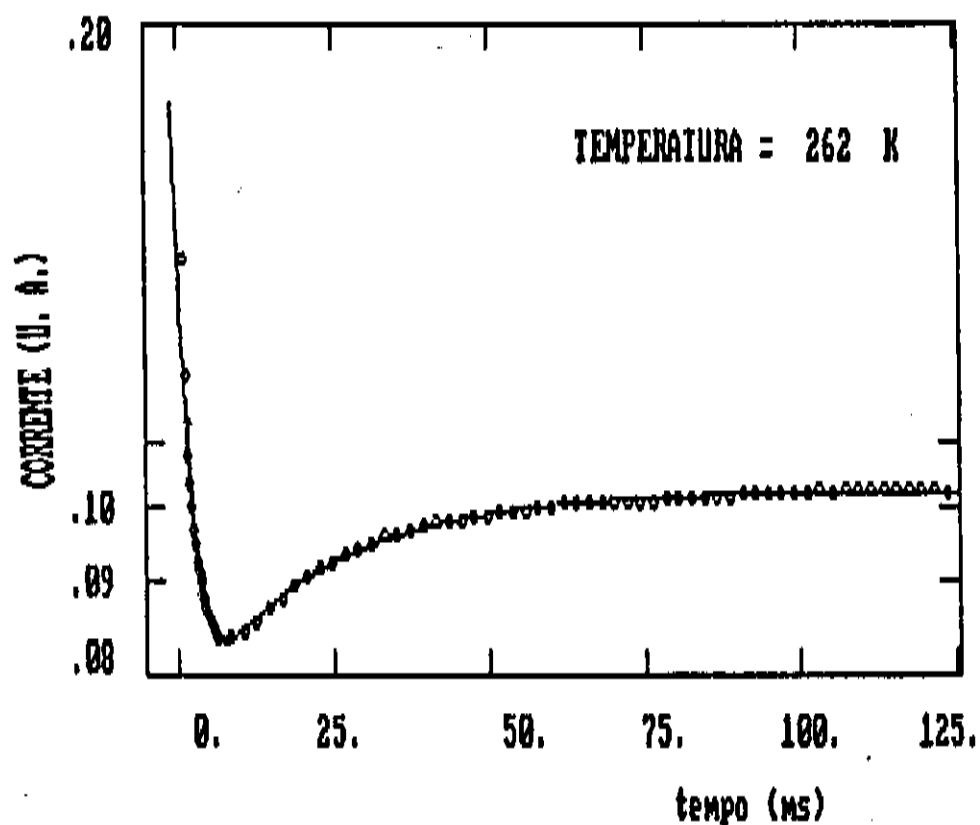


Fig. IV.5.3 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{o+} = 0,081$, $\tau_+ = 2,08$ mseg, $I_{o-} = -0,034$ e $\tau_- = 22,70$ mseg.

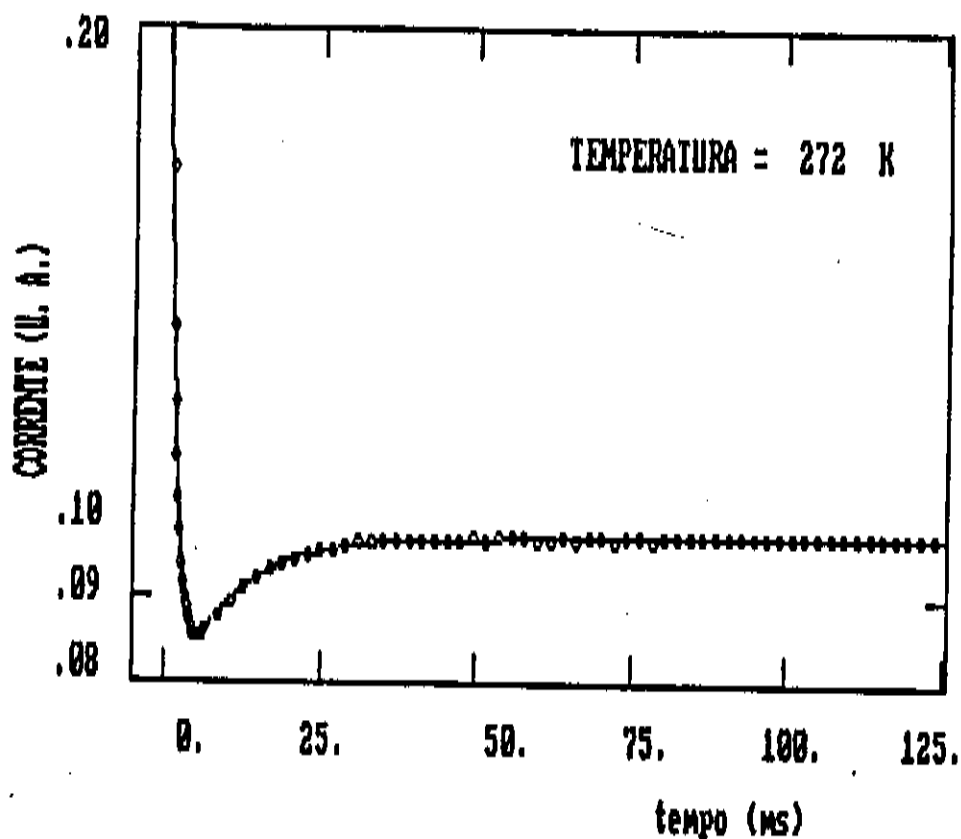


Fig. IV.5.4 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{o+} = 0,144$, $\tau_+ = 1,11$ mseg, $I_{o-} = -0,025$ e $\tau_- = 9,82$ mseg.

constantes de tempo de decaimento das exponenciais também variam com a temperatura, como vemos na tabela IV.5.1 onde apresentamos os dados relativo aos ajustes destes transientes. Na seção IV.8 veremos que estes tempos não representam necessariamente o inverso da taxa de emissão térmica de uma armadilha, de modo que não tem sentido apresentá-los na forma de um gráfico de Arrhenius para obter a energia de ativação e a seção de choque de captura da armadilha.

T (K)	I_{o+}	τ_+ (mseg)	I_{o-}	τ_- (mseg)
252	2,43E-2	2,56	-2,76E-2	49,96
258	5,79E-2	2,39	-3,29E-2	31,63
260	7,02E-2	2,14	-3,32E-2	28,24
262	8,07E-2	2,08	-3,37E-2	22,70
264	9,23E-2	1,87	-3,29E-2	19,27
266	1,05E-1	1,65	-3,12E-2	16,32
268	1,21E-1	1,47	-3,04E-2	13,17
270	1,33E-1	1,32	-2,92E-2	11,20
272	1,44E-1	1,11	-2,45E-2	9,32
274	1,60E-1	0,98	-2,28E-2	8,11
276	1,82E-1	0,81	-1,84E-2	7,17
278	2,07E-1	0,69	-1,54E-2	5,95
280	2,56E-1	0,57	-1,05E-2	5,51
282	3,19E-1	0,47	-7,40E-3	5,34

Tab. IV.5.1 - Pré-fator normalizado e constante de tempo das exponenciais obtidas por ajuste da equação IV.2.4 aos transientes de fotocorrente na região de um pico PITS negativo.

IV.6. INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA

Na figura IV.6.1 apresentamos três espectros PITS de uma amostra de GaAs (SI), sob as mesmas condições experimentais,

exceto pela polarização que correspondem às seguintes situações: (a) configuração tipo planar, (b) configuração do tipo sanduiche com a superfície iluminada polarizada negativamente, e (c) configuração do tipo sanduiche com a superfície iluminada polarizada positivamente. A intensidade de campo nos três casos foi mantida constante em torno de 30 V/cm e usamos uma lâmpada de W com filtro de Si para excitação. A amostra é a mesma utilizada para identificar os parâmetros das armadilhas na seção IV.4 e para estudar o efeito da iluminação de fundo na seção IV.5. As suas duas superfícies foram polidas quimicamente com bromo-metanol antes da deposição da liga de Au-Ge-Ni para os contatos elétricos.

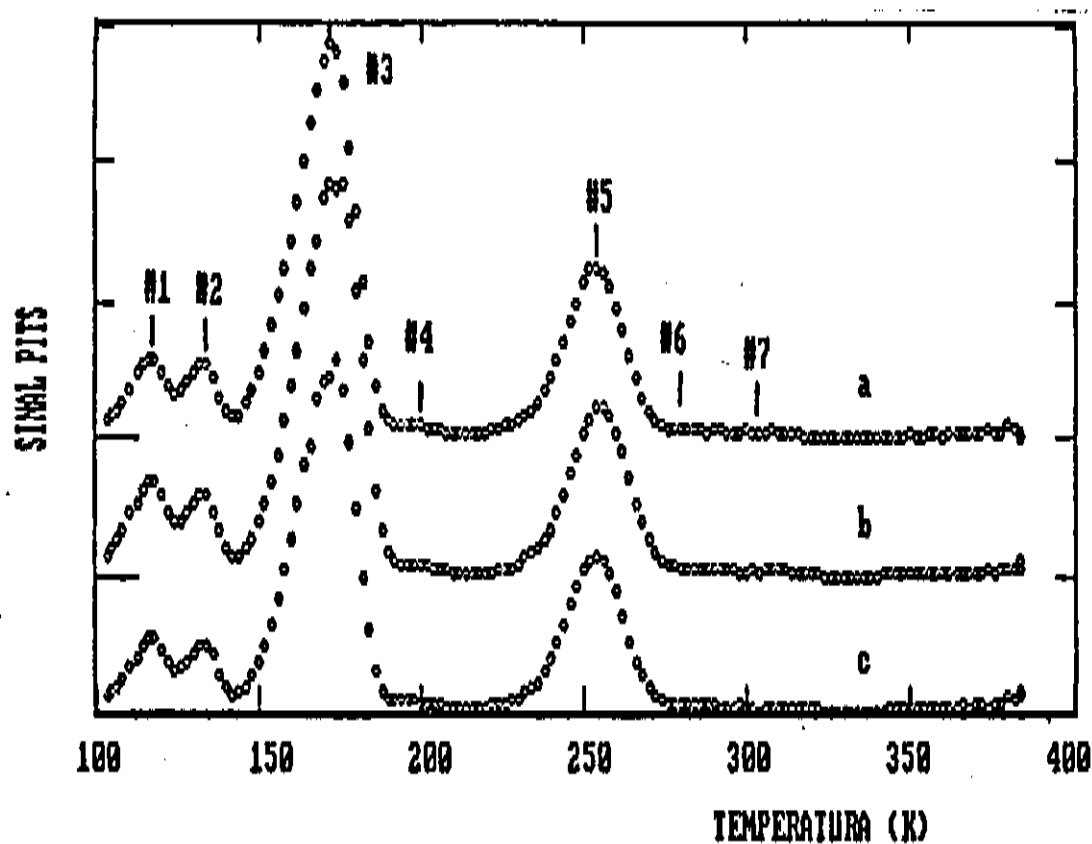


Fig. IV.8.1 - Espectros PITS de uma amostra de GaAs (SI) com as superfícies polidas com configurações (a) tipo planar, (b) tipo sanduiche com a superfície iluminada polarizada negativamente, e (c) tipo sanduiche com a superfície iluminada polarizada positivamente.

Observamos que os três espectros PITS são basicamente idênticos, tanto na posição quanto na intensidade e largura dos picos. A iluminação com fótons de energia menor que a da banda proibida do GaAs, onde o coeficiente de absorção é baixo ($\alpha \approx 1 \text{ cm}^{-1}$), implica que a amostra é igualmente excitada pela radiação incidente ao longo de toda sua espessura. Esta é a condição ideal para estudar as armadilhas presentes no interior do substrato. O fato dos espectros obtidos com as três diferentes configurações serem idênticos, significa que as duas superfícies da amostra e seus contatos são equivalentes.

Na figura IV.6.2 apresentamos o mesmo tipo de estudo descrito acima para uma segunda amostra de GaAs (SI). Esta amostra foi

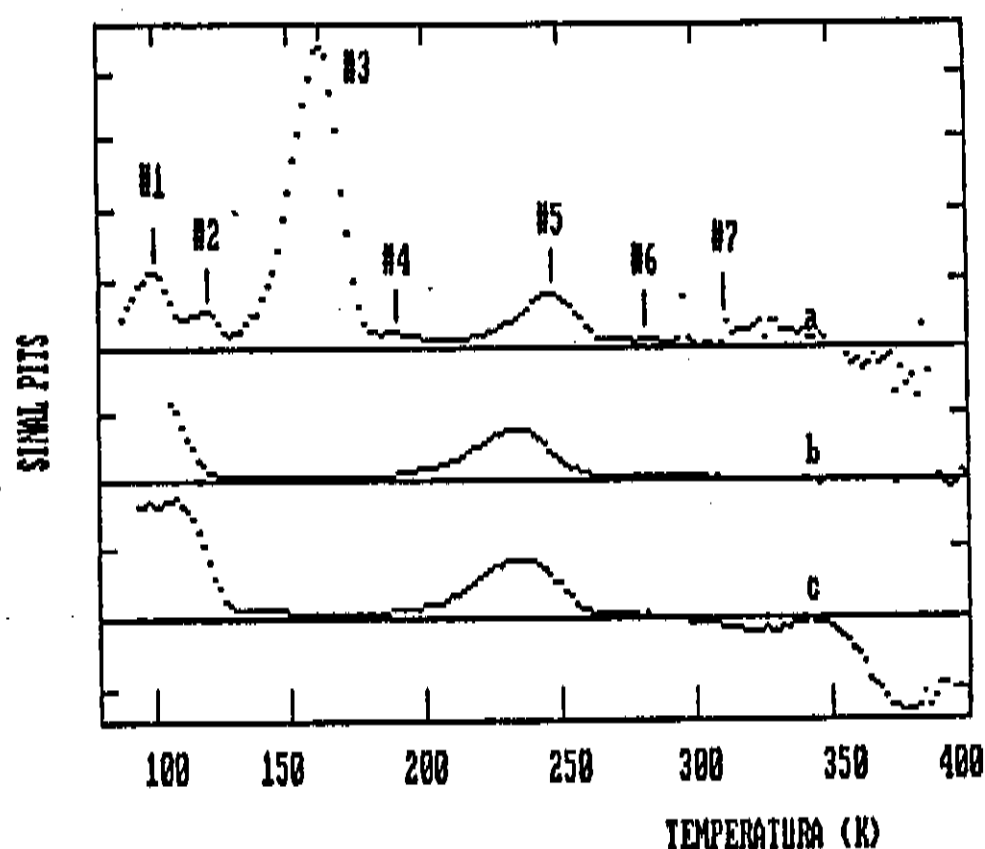


Fig. IV.6.2 - Espectros PITS de uma amostra de GaAs (SI) "direto da fábrica" com configurações (a) tipo planar, (b) tipo sanduiche com a superfície iluminada polarizada negativamente, e (c) tipo sanduiche com a superfície iluminada polarizada positivamente.

obtida do mesmo "wafer" da amostra anterior, mas não foi realizado nenhum tratamento superficial antes da deposição dos contatos elétricos. Isto é, os contatos foram depositados nas condições em que recebemos a amostra da fábrica: superfície frontal brilhante, e superfície posterior fosca, apenas lixada, apresentando uma camada de vários microns de espessura com alta concentração de defeitos. Neste caso, apesar de termos usado uma radiação de excitação extrínseca, os espectros PITS obtidos nas diversas configurações são bastante diferentes. O espectro PITS desta amostra mostrado na figura IV.6.2.a foi obtido usando a configuração planar e é o mais parecido com os espectros da figura IV.6.1. Os cinco picos mais visíveis deste espectro, denominados #1-#5, aparecem em temperaturas semelhantes ao do espectro da figura IV.6.1, exceto que a intensidade do pico #3 é relativamente menor. Além disso, observamos um pico largo e bastante visível na região de altas temperaturas, aonde foram identificados picos muito fracos (#6 e #7) no espectro da figura IV.6.1, com detalhes na figura IV.2.5. Os espectros IV.6.2.(b) e IV.6.2.(c) obtidos com configurações do tipo sanduiche são bastante semelhantes mas apresentam características bem distintas do espectro anterior. O pico #3, que era o mais intenso em todos os outros espectros, praticamente desaparece, restando apenas um pequeno sinal na região de temperaturas onde ele era observado. Os picos #1 e #2 se alargam e aumentam de intensidade e não podem mais ser resolvidos. No espectro da figura IV.6.2(c) aparecem dois picos negativos à altas temperaturas, um em $T \cong 325$ K e outro em $T \cong 370$ K. Picos negativos na amostra com superfícies polidas só foram observados em condições especiais de iluminação.

Nas figuras IV.6.3, IV.6.4 e IV.6.5 apresentamos os transientes medidos nas temperaturas correspondentes aos picos negativos da figura IV.6.2(c) os quais são bem descritos por uma única exponencial com pre-fator negativo. A constante de decaimento destas exponenciais diminui com a temperatura, mas também não devem representar o inverso da emissão térmica de uma armadilha, como veremos na discussão da seção IV.8.

O fato de termos obtido resultados tão diferentes entre a amostra com superfície tratada e a amostra "direto da fábrica", significa que a superfície posterior opaca, ou mais

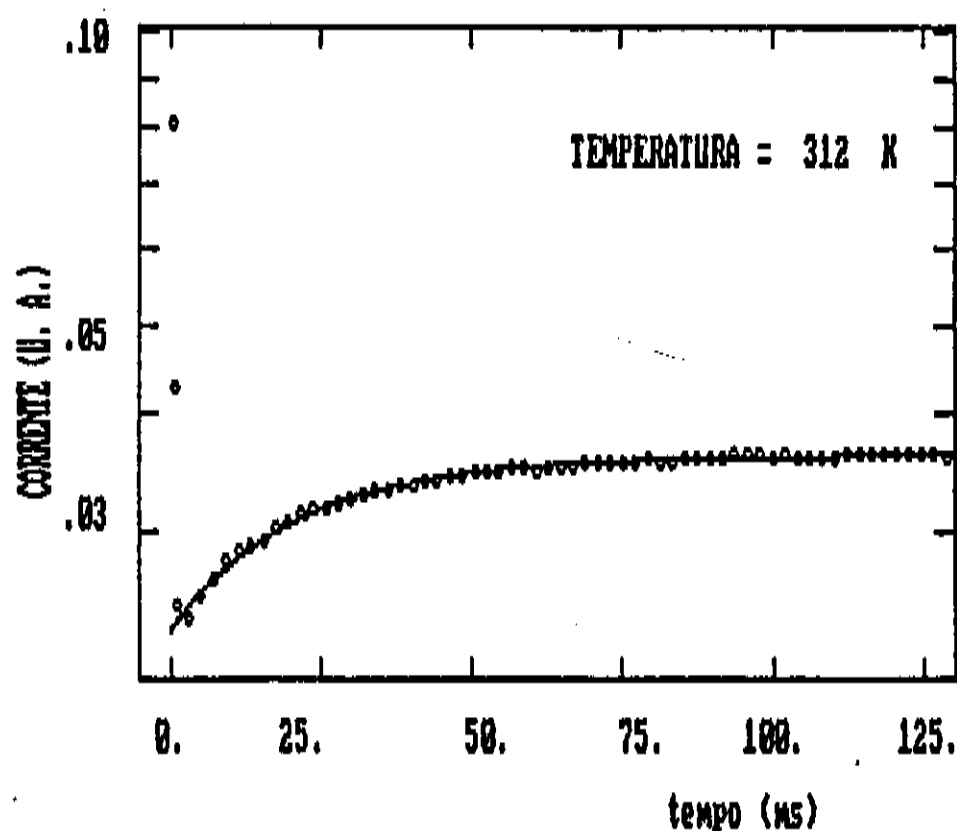


Fig. IV.6.3 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{0-} = -0.013$ e $\tau_- = 24,35$ mseg.

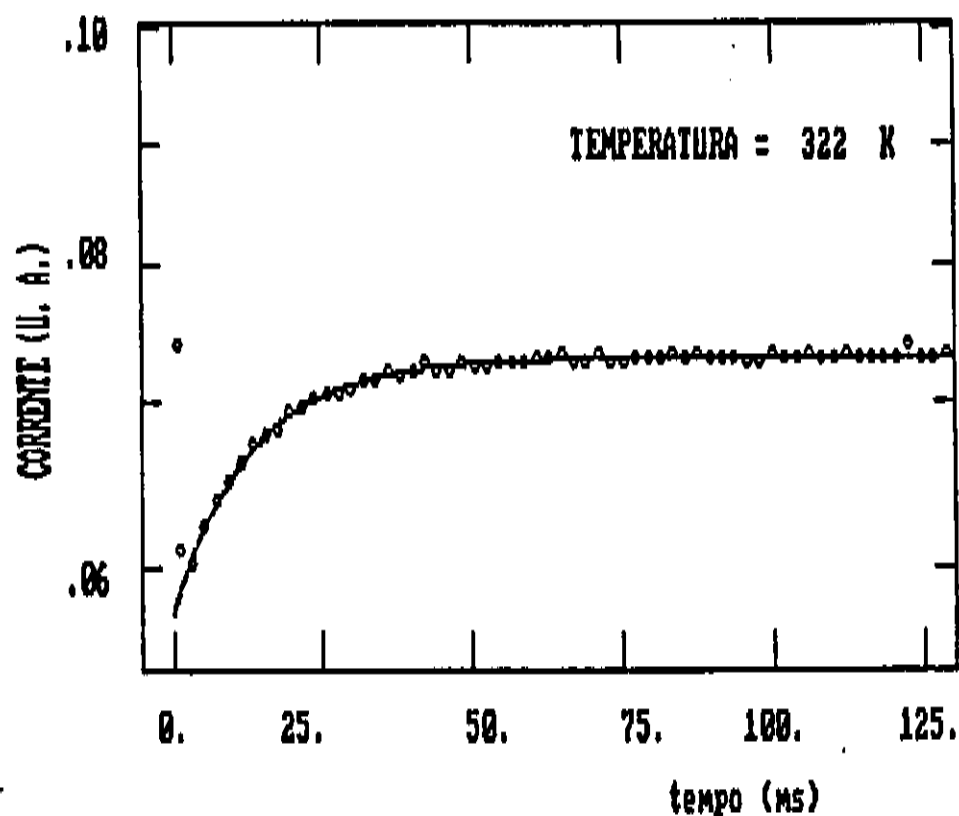


Fig. IV.6.4 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{o-} = -0,017$ e $\tau_- = 14,20$ mseg.

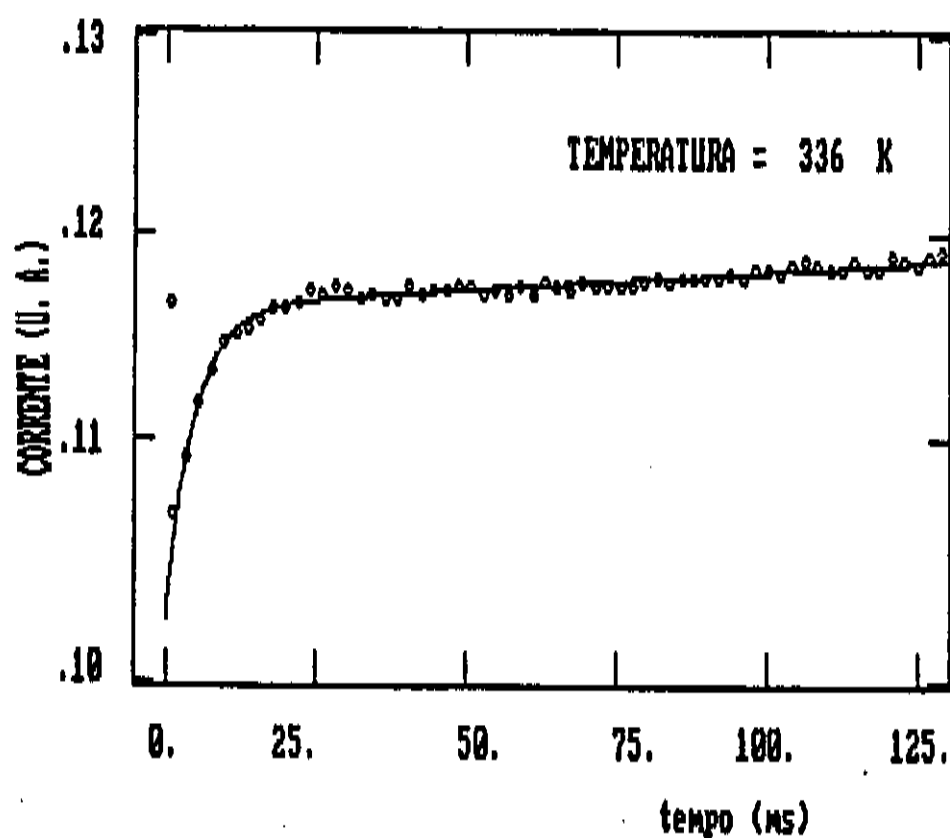


Fig. IV.6.5 - Transiente de fotocorrente (o o o) experimental e (—) equação IV.2.1 com $I_{o-} = -0,020$ e $\tau_- = 4,88$ mseg.

especificamente, a camada com alta densidade de defeitos na face posterior, tem uma grande influência nas medidas PITS. A semelhança dos espectros PITS obtidos usando a configuração planar nas duas amostras, é uma indicação de que a influência da superfície com defeitos é menor nesta configuração onde os portadores de carga livres não precisam necessariamente atravessar a camada defeituosa. Os espectros PITS da amostra "direto da fábrica" sob configuração sanduiche, apresentam uma dependência com a polaridade do campo elétrico, apesar da geração de portadores livres ser uniforme devido à excitação extrínseca. Esta dependência resume-se ao surgimento de picos negativos que será abordada na seção IV.8 dedicada a este assunto.

IV.7. ESTUDO DA FOTOCORRENTE ESTACIONÁRIA

Na figura IV.7.1 apresentamos um gráfico da corrente imediatamente antes do corte da luz (I_l) e da corrente no final do transiente (I_e) em função da temperatura, obtidas dos mesmos dados experimentais utilizados para os espectros PITS apresentados na figura IV.1.1. Observamos que para temperaturas menores que 250 K, I_l e I_e diminuem com a temperatura, e que esse comportamento se inverte para temperaturas maiores que 250 K.

O tempo de subida, isto é, o tempo para a corrente alcançar o estado estacionário com a luz é geralmente muito menor que a constante de tempo do transiente após o corte de luz, que depende fortemente de τ_n^t . Assim, o valor medido de I_l corresponde à corrente estacionária com luz, mas nem sempre o estado

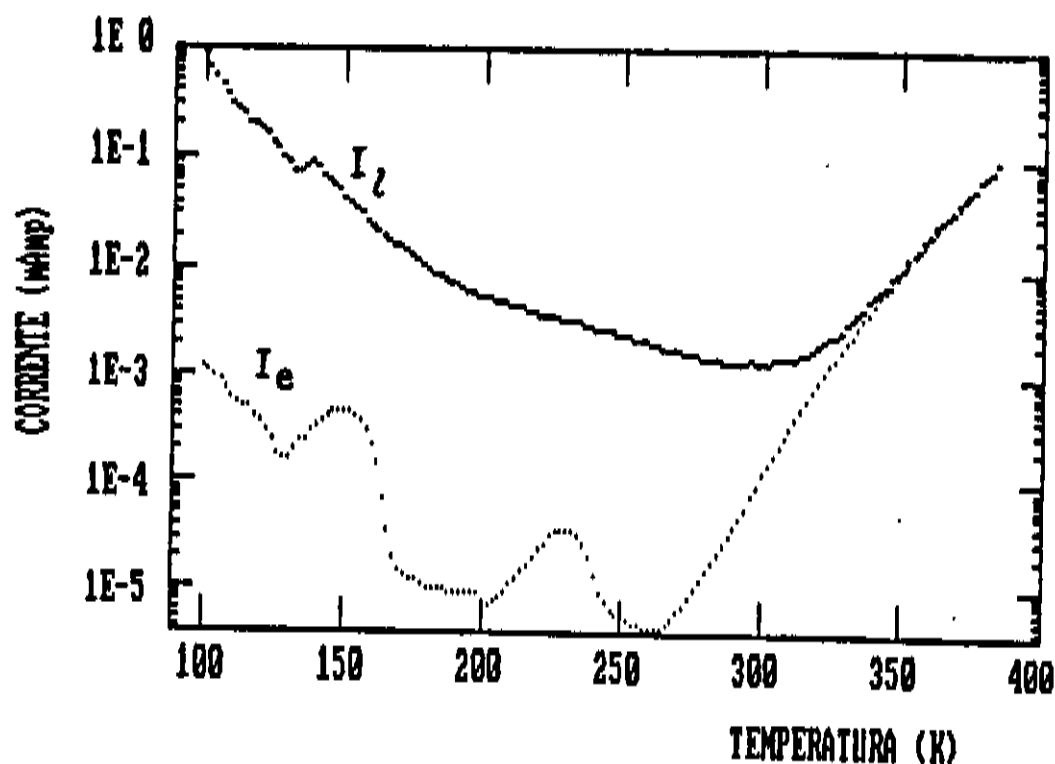


Fig. IV.7.1 - Gráfico da corrente estacionária no escuro I_0 e sob iluminação I_l , em função da temperatura.

estacionário no escuro terá sido alcançado em $t \approx 125$ mseg após o corte da luz, ou seja, nos últimos pontos de um transiente, quando I_0 é medido. Isto ocorrerá principalmente se o transiente contiver termos exponenciais com constante de tempo relativamente longa e pré-fator grande. Em $T \approx 150$ K e $T \approx 225$ K, I_0 apresenta máximos locais. Nestas temperaturas, as armadilhas responsáveis pelos picos #3 e #5, os mais intensos nos espectros PITS, estão ativas com constantes de tempos da ordem de 100 mseg. Estes máximos, indicam que a diferença entre a corrente em $t = 125$ mseg e a corrente estacionária real no escuro não é desprezível.

A dependência da mobilidade com a temperatura é bem explicada em amostras condutivas, mas ainda não existe um tratamento teórico detalhado para os semicondutores semi-isolantes [Look 1983]. As

medidas usuais de Efeito Hall são dificultadas pela alta resistividade destas amostras, principalmente a baixas temperaturas. Apesar da relativa falta de dados sobre a dependência de μ_n com T para o GaAs SI, é de se esperar que dentro do intervalo de temperatura das nossas medidas ($100\text{ K} < T < 370\text{ K}$), μ_n não varie mais do que por um fator 2 ou 3. Portanto, apenas a variação da mobilidade não seria capaz de explicar as variações observadas de até 1000 vezes entre os valores máximos (100 K e 370 K) e mínimos (250 K) de I_e e I_l .

A diminuição da fotocondutividade com o aumento da temperatura para $T < 250\text{ K}$, também foi observada por Lin et al. [Lin 1976], tendo sido explicada usando o modelo de recombinação de Shockley-Read [Blakemore 1962]. Considerando amostras com alta resistividade e supondo que a densidade de centros de recombinação também é alta, a expressão para o número de elétrons na banda de condução é dado por [Lin 1976]:

$$n_l = g_l \tau_n = g_l \tau_{no} \exp [(E_r - E_f)/KT] \quad (\text{IV.7.1})$$

onde $\tau_{no} = (C_{nr} N_r)^{-1}$, E_r é a energia de ionização do centro de recombinação com densidade N_r , E_f é a energia de Fermi no escuro e g_l é a taxa de fotogeração de elétrons. A variação de $I_l(T)$ para $T < 250\text{ K}$ pode ser muito bem explicada pelo valor obtido por Lin et al. em amostras similares, $(E_r - E_f) \cong 0,07\text{ eV}$. Entretanto um ajuste desta equação aos nossos dados de I_l é dificultado pela variação brusca de I_l em $T \cong 140\text{ K}$, que discutiremos no final desta seção.

Acima de 300 K , I_e e I_l aumentam rapidamente com a

temperatura, e as diferenças entre I_l e I_e diminuem a tal ponto que para $T > 350 \text{ K}$ $I_e \cong I_l$. Isto significa que a excitação de elétrons para a banda de condução passa a ser dominada pela geração térmica. Podemos analisar este efeito considerando que um único centro doador profundo domina as características elétricas da amostra. Neste caso, a equação de balanceamento de carga pode ser escrita na forma:

$$n_e + N_{Ar} = p_e + N_{Dr} + (N_D - n_D) \quad (\text{IV.7.2})$$

onde N_{Ar} e N_{Dr} são os números totais de aceitadores e doadores rasos ionizados, N_D é o número total de doadores profundos, dos quais n_D estão ocupados com elétrons. Usando modelos estatísticos [Blakemore62, Look83] podemos descrever as concentrações nas bandas e as ocupações dos níveis de impureza usando a definição de energia de Fermi E_f :

$$n_e = N_c \exp (E_f / KT) \quad (\text{IV.7.3})$$

$$n_D = \frac{N_D}{1 + g \exp [(E_f - E_D)/KT]} \quad (\text{IV.7.4})$$

onde N_c é a densidade efetiva de estados na banda de condução (equação II.2.3), g é a degenerescência do nível e E_D é a energia de ionização do doador profundo. Considerando um semicondutor do tipo-n ($n \gg p$) e substituindo as equações IV.7.3 e IV.7.4 na equação IV.7.2, temos:

$$n_e = \left[\frac{N_D}{N_{Ar} - N_{Dr}} - 1 \right] \frac{N'_c}{g} T^{3/2} e^{\alpha/K} \exp[-E_{Do}/KT] \quad (IV.7.5)$$

onde $N'_c = N_c T^{3/2}$ é uma constante independente da temperatura, com $E_D = E_{Do} - \alpha T$.

Isto significa que a altas temperaturas, devemos observar um aumento da corrente I_e com a temperatura devido à ionização térmica dos doadores profundos. Em princípio, poderíamos chegar a um ponto de saturação de n_e onde todos os doadores estariam ionizados e n_e tenderia a um valor constante. Mas este regime de altas temperaturas observado em amostras condutivas, só seria alcançado para amostras semi-isolantes a temperaturas realmente muito altas ($T > 1500$ K).

Podemos então comparar o modelo descrito pela equação IV.7.5 com os dados da figura IV.7.1 na região de $T > 300$ K. Este ajuste do modelo aos dados experimentais está apresentado na figura IV.7.2 na forma de um gráfico de $(I_e T^{-3/2})$ vs (T^{-1}) , com o qual obtivemos uma energia $E_{Do} = 0,75$ eV. Este valor concorda muito bem com a energia de ativação do nível EL2 apresentada na literatura [Look 1983, Bourgoin 1988].

Um último aspecto interessante da figura IV.7.1 é a variação brusca da corrente I_l em torno de 140 K. Este fenômeno é mais visível na figura IV.7.3 que corresponde à medida PITS usando uma segunda lâmpada de W como iluminação de fundo. Este comportamento da corrente I_l pode ser explicado pelo modelo de um estado meta-estável do centro EL2 proposto por Bois e Vincent [Bois 1977]. O modelo propõe que o centro EL2 possui um estado meta-estável EL2M com uma grande relaxação da rede que o torna

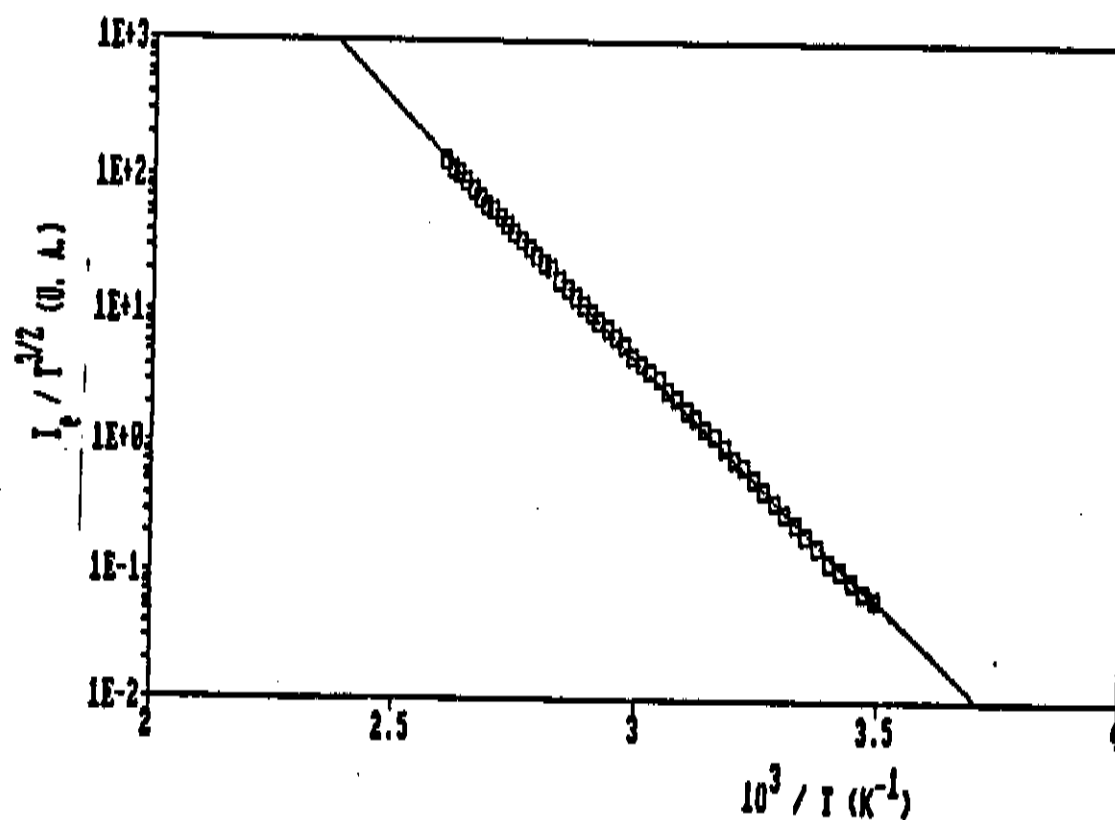


Fig. IV.7.2 - Gráfico de Arrhenius de $I_e / T^{3/2}$ vs $10^3 / T$ onde (□□□□□) são os dados experimentais da figura IV.7.1 e (—) é dada pela equação IV.7.5.

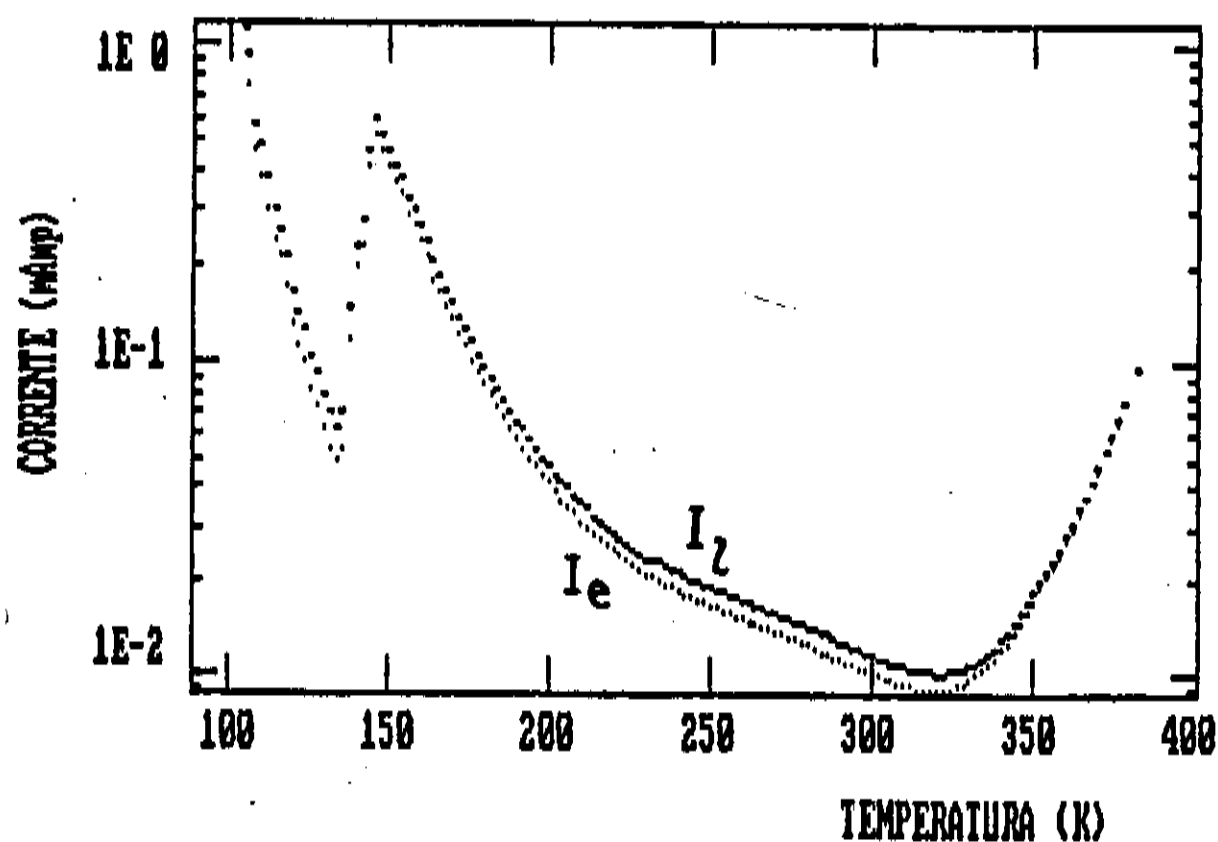


Fig. IV.7.3 - Gráfico da corrente estacionária no "escuro" só com a iluminação de fundo I_e e sob iluminação com as duas lâmpadas I_l , em função da temperatura .

praticamente insensível à excitação óptica. O EL2M apresenta o mesmo estado de carga neutro do estado fundamental EL2F. A diferença entre estes dois estados é que o EL2M além de apresentar uma grande relaxação da rede, possui uma energia total maior que o EL2F. Deste modo o EL2M só é estável a baixas temperaturas. A figura IV.7.4 apresenta o diagrama de coordenadas de configuração correspondente a este modelo [Martin 1986]. A transformação do estado EL2F para o EL2M pode ser ativada ópticamente com uma seção de choque de captura óptica que apresenta um máximo para fótons de energia 1,17 eV [Vincent 1982]. Portanto existe uma grande probabilidade de que, iluminando a amostra com radiação da lâmpada de W filtrada com Si ($h\nu < 1,11$ eV) os centros EL2F sejam transformados em EL2M, que são inativos ópticamente, o que deve ocasionar uma diminuição da fotocorrente. Como, em $T < 140$ K, a vida média do estado EL2M é muito longa, maior que o período do

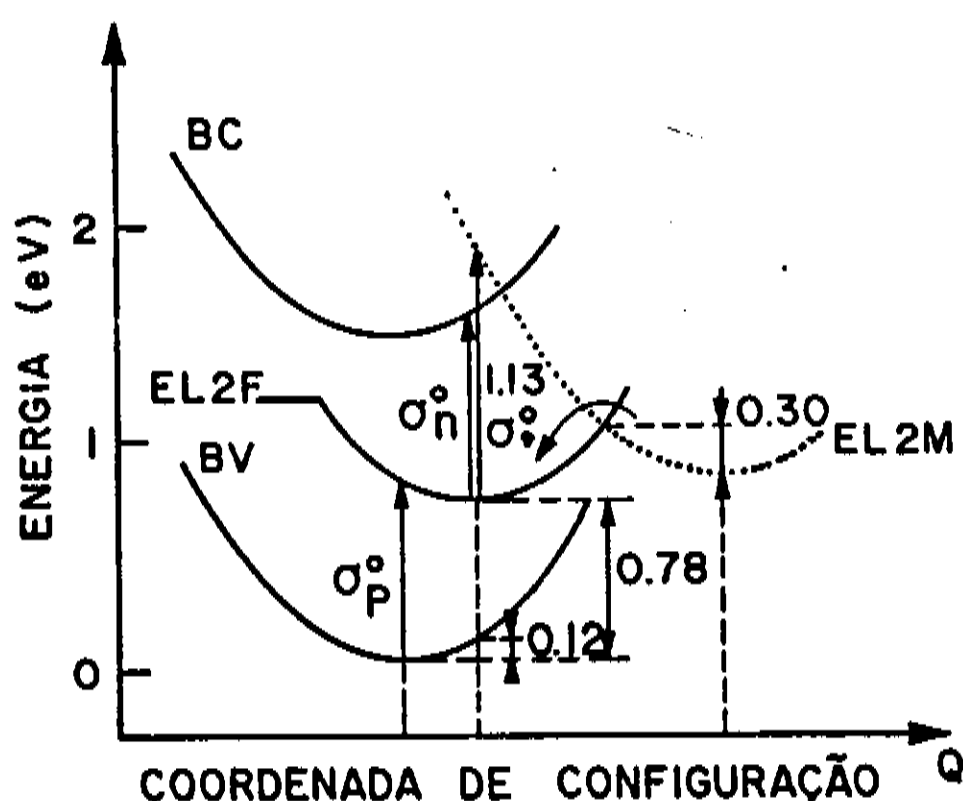


Fig. IV.7.4 - Diagrama de coordenadas de configuração do centro EL2 [Martin 1986].

transiente de uma medida PITS, a concentração de defeitos EL2 no estado EL2M deve crescer muito para uma iluminação com $h\nu < 1,17$ eV. O processo de regeneração ($EL2M \rightarrow EL2F$) pode ser ativado termicamente com uma taxa [Vincent 1982]:

$$r = 2 \times 10^{-11} \exp [-0,30 \text{ eV} / KT] \quad (\text{IV.7.6})$$

vencendo uma barreira de 0,30 eV como apresentada no diagrama esquemático de coordenadas de configuração. Assim, o processo de regeneração com a recuperação da fotocorrente, pode ser obtido aquecendo a amostra, e na prática isto é geralmente observado em $120 < T < 140$ K [Lin 1976]. Nas nossas medidas o aumento brusco de I_e foi observado em $T \approx 140$ K.

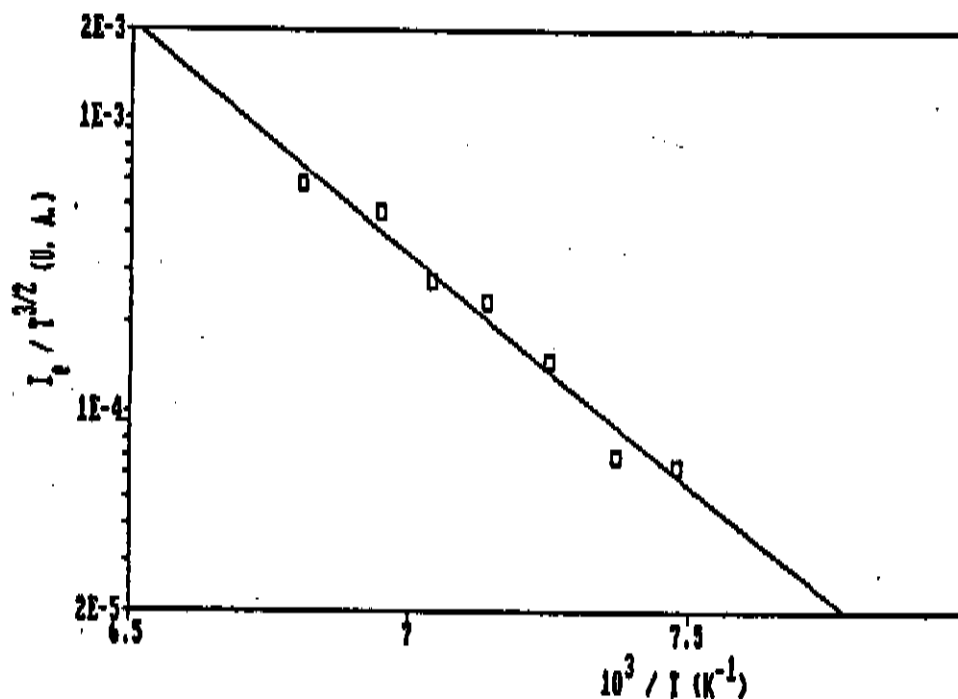


Fig. IV.7.5 - Gráfico de Arrhenius de $I_e / T^{3/2}$ vs $10^3 / T$ da corrente de "escuro" I_e com iluminação de fundo constante na região de $T \approx 140$ K.

Usando uma equação do tipo IV.7.8 para descrever a fotocorrente I_f em torno de $T \approx 140$ K, obtivemos um valor para a energia de ativação $E_a = 0.32$ eV. Este ajuste está mostrado na figura IV.7.5 onde os pontos correspondem aos dados experimentais da figura IV.7.3. Este valor da energia de ativação apresenta uma ótima concordância com os dados da literatura, reforçando a nossa interpretação do fenômeno.

IV.8. ANÁLISE DOS PICOS NEGATIVOS

Vimos nas seções IV.5 e IV.6 que em algumas condições especiais aparecem picos negativos no espectro PITS, ou seja, ocorre uma inversão no sinal da derivada do transiente de fotocorrente. Isto significa que após o corte da luz, a corrente total diminui até um valor menor que a de estado de equilíbrio estacionário no escuro, e em seguida retorna a este valor: $I(t \rightarrow \infty) = I_e$. Este comportamento anômalo está mostrado nas figuras IV.5.2 a IV.5.4 e figuras IV.6.3. a IV.6.8. Esta inversão do sinal da derivada é observada em pelo menos duas condições bem distintas: 1) em altas temperaturas ($T > 300$ K) numa amostra com superfície danificada; 2) em baixas temperaturas ($T < 300$ K) numa amostra com superfícies polidas mas com iluminação de fundo extrínseca dada por uma segunda lampada de W. Em ambos os casos a corrente de "escuro" é bastante alta, de modo que durante o decaimento, a corrente pode assumir um valor menor que a corrente de escuro, sem no entanto tornar-se negativa.

A solução aproximada do sistema de equações do transiente da

fotocorrente apresentada na seção II.3 não explica a observação de um transiente com sinal PITS negativo. No apêndice A.1 apresentamos uma análise mais completa do sistema de equações diferenciais correspondente ao transiente de fotocorrente. Introduzimos os termos de geração térmica g_{tn} e g_{tp} , e consideramos a emissão e captura tanto de elétrons quanto de buracos, usando a aproximação de corrente de escuro intensa para tratar os termos cruzados com produtos $n_t n$ e $n_t p$. Obtivemos uma equação para o transiente da fotocorrente após o corte da luz na forma:

$$\begin{aligned}
 I(t) = qEA \left\{ \mu_n n(t) + \mu_p p(t) \right\} = qEA \left\{ \left[\mu_n n_e + \mu_p p_e \right] + \right. \\
 + \left[\mu_n (n_l - n_e - n_1) \exp(-t/\tau_n) + \mu_p (p_l - p_e - p_1) \exp(-t/\tau_p) \right] + \\
 + \left[\mu_n \tau_n (n_e C_n + e_n^t) - \mu_p \tau_p (p_e C_p + e_p^t) \right] (n_{tl} - n_{te}) \times \\
 \left. \times \exp \left[-(e_n^t + e_p^t + n_e C_n + p_e C_p) t \right] \right\} \quad (IV.8.1)
 \end{aligned}$$

com:

$$n_e = \tau_n g_{tn} + e_n^t n_{te} \tau_n \quad (IV.8.2)$$

$$p_e = \tau_p g_{tp} + e_p^t (N_t - n_{te}) \tau_p \quad (IV.8.3)$$

$$n_1 = \tau_n (n_e C_n + e_n^t) (n_{tl} - n_{te}) \quad (IV.8.4)$$

$$p_1 = \tau_p (p_e C_p + e_p^t) (n_{tl} - n_{te}) \quad (IV.8.5)$$

$$n_{tl} = \frac{N_t}{1 + \frac{\tau_n^t + \tau_p^o + p_l C_p}{\tau_p^t + \tau_p^o + n_l C_n}}$$

(IV.8.6)

$$n_{te} = \frac{N_t}{1 + \frac{\tau_n^t + p_e C_p}{\tau_p^t + n_e C_n}}$$

(IV.8.7)

Esta solução mantém a mesma forma básica da solução proposta no capítulo III, ou seja: um termo constante, um termo proporcional a uma exponencial com constante de decaimento rápida e um termo proporcional a uma exponencial com constante de tempo longa. Neste caso o termo constante correspondente à corrente estacionária no escuro sai naturalmente da solução do sistema de equações.

Vamos analisar mais cuidadosamente o termo correspondente a exponencial lenta desta equação. Observamos duas diferenças básicas em relação à solução do capítulo II dada pela equação II.4.15: 1) a constante de tempo da exponencial não é mais dada apenas pelo inverso da emissão térmica da armadilha; 2) existem dois casos em que o pré-fator da exponencial pode ser negativo:

$$1) \mu_n(n_e C_n + \tau_n^t) > \mu_p(p_e C_p + \tau_p^t) \quad \bullet \quad n_{tl} < n_{te} \quad (\text{IV.8.8}),$$

$$11) \mu_n(n_e C_n + \tau_n^t) < \mu_p(p_e C_p + \tau_p^t) \quad \bullet \quad n_{tl} > n_{te} \quad (\text{IV.8.9}).$$

Vamos analisar o caso de uma armadilha de elétrons no GaAs tipo-n. Podemos considerar que $\mu_n/\mu_p \geq 10$, $\tau_n \approx \tau_p$ [Look 1983] e que, mesmo para centros com níveis muito próximos do meio da banda proibida como o EL2, $\tau_n^t/\tau_p^t \approx C_n/C_p \geq 1000$ [Martin 1986, Abele

1987]. De modo que neste caso, normalmente teremos: $\mu_n(n_e C_n + e_n^t) > \mu_p(p_e C_p + e_p^t)$, e a condição IV.8.9 não poderá ser cumprida. Assim, o transiente terá um pre-fator negativo somente se $n_{t1} < n_{te}$, isto é, se a ocupação da armadilha de elétrons no estado estacionário com luz for menor do que a sua ocupação no estado estacionário no escuro. Um raciocínio inverso vale para o caso de uma armadilha de buracos. Usando as equações IV.8.6 e IV.8.7 esta condição torna-se:

$$\frac{e_n^t + e_n^o + p_l C_p}{e_p^t + e_p^o + n_l C_n} > \frac{e_n^t + p_e C_p}{e_p^t + n_e C_n} \quad (\text{IV.8.10})$$

Podemos estimar os valores dos parâmetros relativos a uma armadilha e avaliar se esta condição é realmente satisfeita. Vamos analisar o caso do centro EL2, que é um dos centros mais estudados do GaAs e com maior número de dados disponíveis na literatura. Com base nestes dados e em nossas medidas, temos:

$$\begin{aligned} \sigma_n^o &= 1,5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2, \sigma_p^o = 0,9 \times 10^{-16} \text{ cm}^2 \text{ para } h\nu = 1,17 \text{ eV} \quad [\text{Vincent 1982}] \\ \sigma_n^t &= 1 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2}, \sigma_p^t = 1 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-2}, \text{ para } T \geq 300 \text{ K} \quad [\text{Bourgoin 1983}] \\ \phi &\cong 3,5 \times 10^{15} \text{ fotons/cm}^2 \text{ seg} \quad \text{nossas medidas} \\ e_n^o &= \sigma_n^o \phi = 0,53 \text{ seg}^{-1}, e_p^o = \sigma_p^o \phi = 0,35 \text{ seg}^{-1} \quad (h\nu = 1,17 \text{ eV}). \\ &\quad (\text{IV.8.11}) \end{aligned}$$

O número de portadores livres pode ser estimado pelas correntes estacionárias no escuro I_e e sob iluminação I_l obtidas durante uma medida de PITS (figura IV.7.1). Vamos considerar que durante o período com luz $n_l \cong p_l$. Mas no período escuro, sabendo que a

amostra é tipo-n e que a corrente térmica é dada principalmente pela ionização dos doadores EL2, vamos considerar que toda corrente é basicamente de elétrons e que $p_e \ll n_e$. Assim, para $T \cong 350$ K:

$$\begin{aligned} n_l \cong n_e \cong p_l \cong 8,3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}, \quad p_e \cong 0 & \qquad \qquad \qquad \text{(figura IV.7.1)} \\ C_n = \sigma_n^t v_n = 4,5 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{seg}^{-1}, \quad C_p = \sigma_p^t v_p = 1,7 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{seg}^{-1} \\ e_n^t = 5,67 \text{ seg}^{-1}, \quad e_p^t = 1,6 \times 10^{-3} \text{ seg}^{-1} & \qquad \qquad \qquad \text{[Martín 1986]} \end{aligned}$$

(IV.8.12)

• para $T \cong 400$ K:

$$\begin{aligned} n_l \cong n_e \cong p_l \cong 2,3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}, \quad p_e \cong 0 & \qquad \qquad \qquad \text{nossas medidas} \\ C_n = \sigma_n^t v_n = 4,8 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{seg}^{-1}, \quad C_p = \sigma_p^t v_p = 1,9 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{seg}^{-1} \\ e_n^t = 225,3 \text{ seg}^{-1}, \quad e_p^t = 6,7 \times 10^{-2} \text{ seg}^{-1} & \qquad \qquad \qquad \text{[Martín 1986]} \end{aligned}$$

(IV.8.13)

Assim temos os seguintes valores para os termos da desigualdade IV.8.10:

	350 K	400 K
$\frac{e_n^t + e_n^o + p_l C_p}{e_p^t + e_p^o + n_l C_n}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$
$\frac{e_n^t + p_e C_p}{e_p^t + n_e C_n}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$

(IV.8.14)

Nestas estimativas o transiente apresentaria um pré-fator negativo para $T \cong 350$ K, e um pre-fator praticamente nulo para $T \cong 400$ K. Isto significa que o transiente para níveis próximos do meio da banda proibida (EL2) com corrente de escuro alta podem apresentar um transiente com derivada positiva ou negativa, dependendo da temperatura, das condições de excitação óptica (ϕ) e dos parametros específicos da armadilha. Por outro lado, as intensidades normalizadas dos transientes são geralmente muito pequenas pois $n_{tl} \cong n_{te}$. Isto explica o fato de não termos observado o centro EL2 como um pico intenso no espectro PITS apesar de sabermos que este é o nível profundo com maior concentração na nossa amostra, tendo sido detetado inclusive pela análise da fotocorrente estacionária na seção anterior.

A única análise matemática na literatura sobre a possibilidade de uma exponencial lenta com pre-fator negativo foi apresentada por Hurtes et al. [Hurtes 1978] e analisada mais detalhadamente por Look [Look 1983]. Estes autores propõe uma armadilha com $e_n^t \cong e_p^t$ na condição de corrente de escuro zero ($n_0=p_0=0$) e despreza os termos de recaptura dos portadores livres pela armadilha. Além disso, eles se limitam ao caso de radiação de excitação intrínseca ($e_n^0=e_p^0=0$). Na verdade o resultado obtido por [Look 1983] corresponde a um caso especial da equação IV.8.1, onde a condição de um pre-fator negativo para uma armadilha de elétrons torna-se:

$$\frac{p_1 C_p}{n_1 C_n} > \frac{e_n^t}{e_p^t} \quad (\text{IV.8.18})$$

Mas esta condição significa que a armadilha de elétrons deve apresentar características muito anômalas com uma probabilidade de captura de buracos maior do que a captura de elétrons. Utilizando os valores dos parâmetros estimados para o EL2 nas relações IV.8.11, IV.8.12 e IV.8.13, vemos que esta condição não é fisicamente consistente, pois temos:

	350 K	400 K
$\frac{p_l C_p}{n_l C_n}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
$\frac{e_n^t}{e_p^t}$	3544,8	3362,7

(IV.8.16)

Nenhum dos outros autores que observaram picos negativos de PITS [Abele 1987, Young 1987, Blight 1989] propuseram explicações razoáveis para o fenômeno. Na verdade, a condição expressa na equação IV.8.10 pode ser satisfeita mesmo que a emissão e captura térmica de buracos por uma armadilha de elétrons seja desprezada.

Para testar a validade das aproximações utilizadas no apêndice A.1 e da solução obtida (equações IV.8.1 a IV.8.7), fizemos a simulação do decaimento da fotocorrente através da resolução numérica do sistema de equações diferenciais usando o método Runge-Kutta com termos até 5º ordem [Hull 1976]. Utilizamos os valores estimados para o centro EL2 e chegamos exatamente no mesmo resultado da análise feita através da solução IV.8.1. Este resultado está apresentado na figura IV.8.1, mostrando que o transiente a 400 K pode ser positivo, nulo, ou negativo,

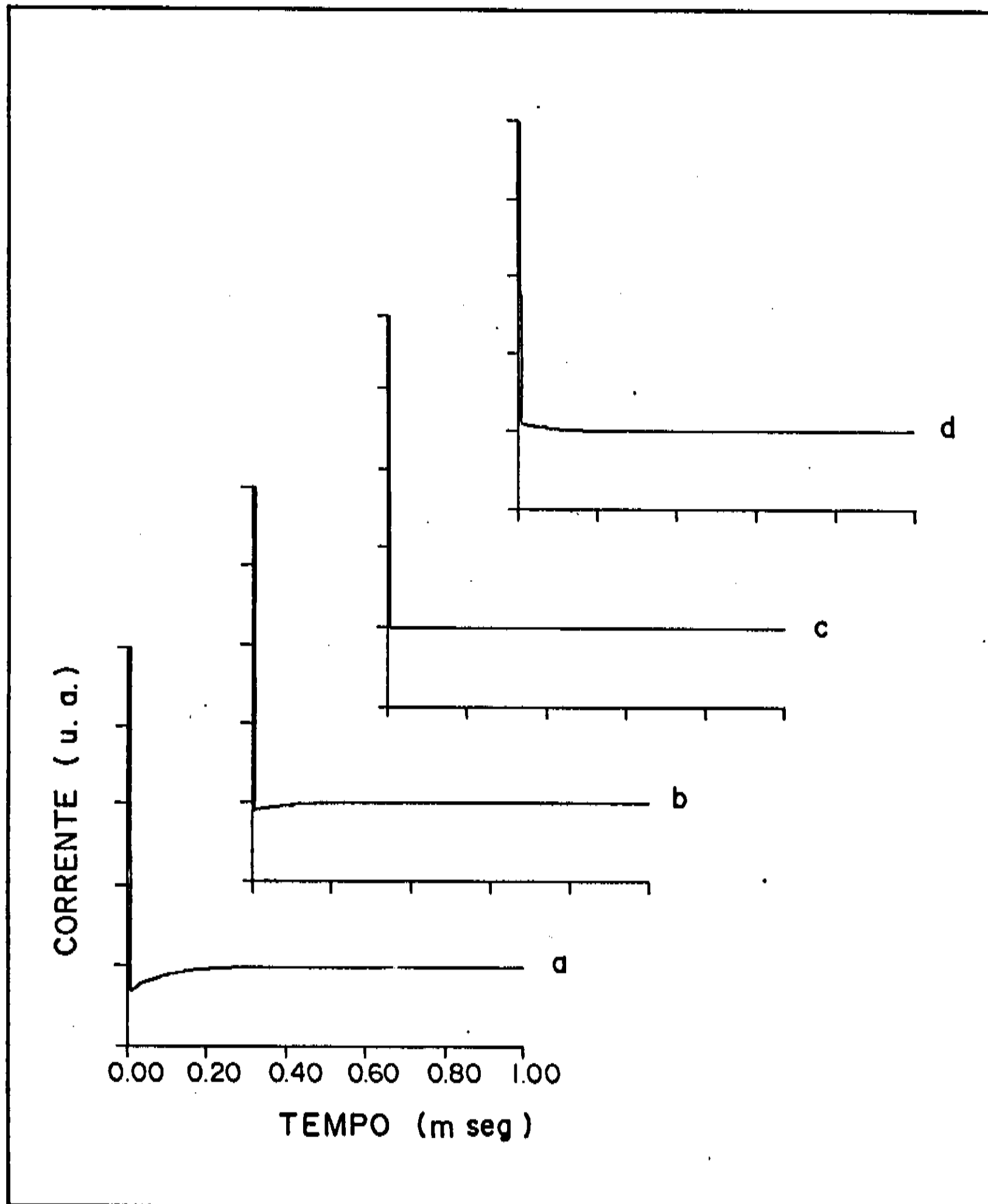


Fig. IV.8.1 - Gráficos dos transientes de fotocorrente obtidos com a solução numérica das equações diferenciais A.1.1 e A.1.2, com as seguintes condições iniciais: $e_n^t = 225,3 \text{ seg}^{-1}$, $C_n = 4,8 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ seg}^{-1}$, $N_t = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau_n = 1 \times 10^{-9} \text{ seg}$, $g_t = 2,3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ seg}^{-1}$, $n_1 = 2,4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ e (a) $n_{t1}/N_t = 0,95$, (b) $n_{t1}/N_t = 0,97$, (c) $n_{t1}/N_t = 0,98$ e (d) $n_{t1}/N_t = 0,99$.

dependendo das condições iniciais de ocupação da armadilha.

Vamos analisar agora o efeito da constante de tempo da exponencial lenta ser dada por $\tau = (e_n^t + e_p^t + n_e C_n + p_e C_p)^{-1}$ ao invés de simplesmente $\tau = (e_n^t)^{-1}$. Como já discutimos, e_p^t e $p_e C_p$ podem ser desprezados, mas $n_e C_n$ pode assumir valores muito grandes mesmo comparando com o termo e_n^t . Assim por exemplo, como os valores estimados para os parametros do centro EL2 (relações IV.8.11, IV.8.12 e IV.8.13) teríamos:

T(K)	$(e_n^t)^{-1}$ (mseg)	$(e_n^t + n_e C_n)^{-1}$ (mseg)
350	178,4	2,8
400	4,4	0,09

(IV.8.7)

Isto significa que existe uma grande diminuição no tempo de decaimento efetivo quando a corrente de escuro é muito alta, ou seja, quando I_{escuro} é alta uma armadilha se tornará ativa em temperaturas mais baixas do que o esperado. Este fato fica evidente na figura IV.8.2 onde apresentamos um gráfico de e_n^t e $n_e C_n$ em função da temperatura, sendo que e_n^t é dado pela equação II.3.6 com σ_n^t e E_t referentes ao nível EL2 [Martín 1986], n_e corresponde aos dados da figura IV.7.1 e C_n é dado pela equação II.3.1. Este comportamento também foi confirmado pela resolução numérica do sistema de equações A.1.1 e A.1.2. A figura IV.8.1 corresponde ao transiente do centro EL2 a 400 K e apresenta transientes positivos, ou negativos, com constantes de tempo da

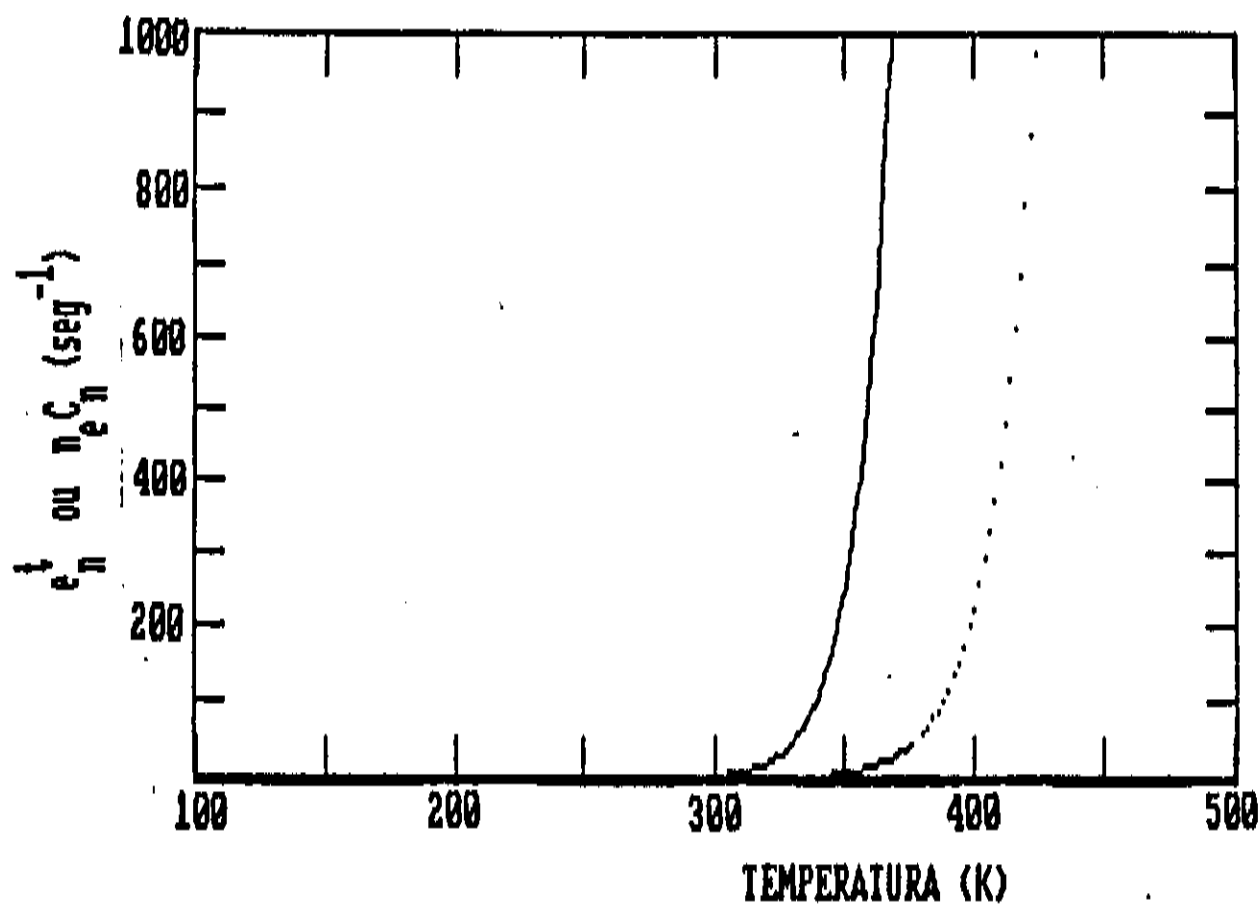


Fig. IV.8.2 - Gráfico de (—) $n_e C_n$ e (.....) e_n^t do centro EL2, em função da temperatura.

ordem de 0,1 mseg ao invés de $\tau = (e_n^t)^{-1} = 4,4$ mseg, conforme previsto na relação IV.8.17. Este efeito devido à corrente de escuro alta implica numa incerteza na determinação dos parâmetros característicos de armadilhas ativas a altas temperaturas, mesmo se esta armadilha apresenta um pico positivo no espectro PITS. Podemos analisar mais detalhadamente o caso do centro EL2. Utilizando os resultados da seção IV.7 para descrever o número de elétrons na banda de condução (equação IV.7.5):

$$n_e = 7,3 \times 10^{16} \exp(-0,75 \text{ eV}/KT) T^{3/2} \quad (\text{IV.8.18})$$

e considerando a assinatura do EL2 segundo os dados de DLTS [Martin 1986]:

$$e_n^t = 3,4 \times 10^7 \exp(-0,825 \text{ eV/KT}) T^2 \quad (\text{IV.8.19})$$

podemos escrever o tempo de decaimento esperado para o centro EL2 em nossas medidas levando em conta a corrente no escuro:

$$\begin{aligned} \tau &= \left[e_n^t + n_e \sigma_n v_n \right]^{-1} \\ &= \left[3,4 \times 10^{-7} \exp(-0,825 \text{ eV/KT}) T^2 + \right. \\ &\quad \left. + 7,3 \times 10^{16} \exp(-0,75 \text{ eV/KT}) T^{3/2} \times 2,4 \times 10^{-9} T^{1/2} \right]^{-1} \\ &\cong \left[1,8 \times 10^{-8} \exp(-0,75 \text{ eV/KT}) T^2 \right]^{-1} \quad (\text{IV.8.20}) \end{aligned}$$

Este resultado significa que em medidas PITS deveremos observar o centro EL2 com uma energia de ativação efetiva da ordem de 0,75 eV ao invés do valor convencional de 0,825 eV observado por DLTS. Portanto, o pico #7 observado em nossas medidas PITS para o qual determinamos $E_t = 0,78 \text{ eV}$ corresponde ao centro EL2.

Vamos analisar agora o caso da medida de transiente realizada com uma segunda lampada de W como iluminação de fundo. A solução é semelhante a equação IV.8.1, mas devemos lembrar que durante o transiente teremos: $e_n^o = \sigma_n^o \phi$, e quando as duas luzes estão acesas: $e_{nl}^o = \sigma_n^o 2 \phi = 2 e_n^o$, o mesmo valendo para a emissão óptica de buracos. Considerando uma armadilha de elétrons e desprezando e_p^t e C_p , teremos um tempo de decaimento efetivo:

$$\tau = (e_n^t + e_n^o + n_e C_n)^{-1} \quad (\text{IV.8.21})$$

e a condição de pico negativo no espectro PITS fica sendo

$$\frac{e_n^t + 2e_n^o + p_1 C_p}{2e_p^o + n_1 C_n} > \frac{e_n^t + e_n^o}{e_p^o + n_e C_n} \quad (\text{IV.8.22})$$

Novamente poderemos obter transientes relativamente pouco intensos, com derivadas positivas ou negativas, dependendo da temperatura, das condições de medida e dos parâmetros específicos da armadilha. Mas neste caso, este efeito também pode ocorrer a baixas temperaturas pois " n_e " é relativamente grande ($n_e \approx n_1$) durante todo o intervalo de temperaturas das nossas medidas como mostrado na figura IV.7.3.

Na figura IV.8.3 apresentamos um gráfico de e_n^t e $n_e C_n$ em função da temperatura para as condições de medida com duas

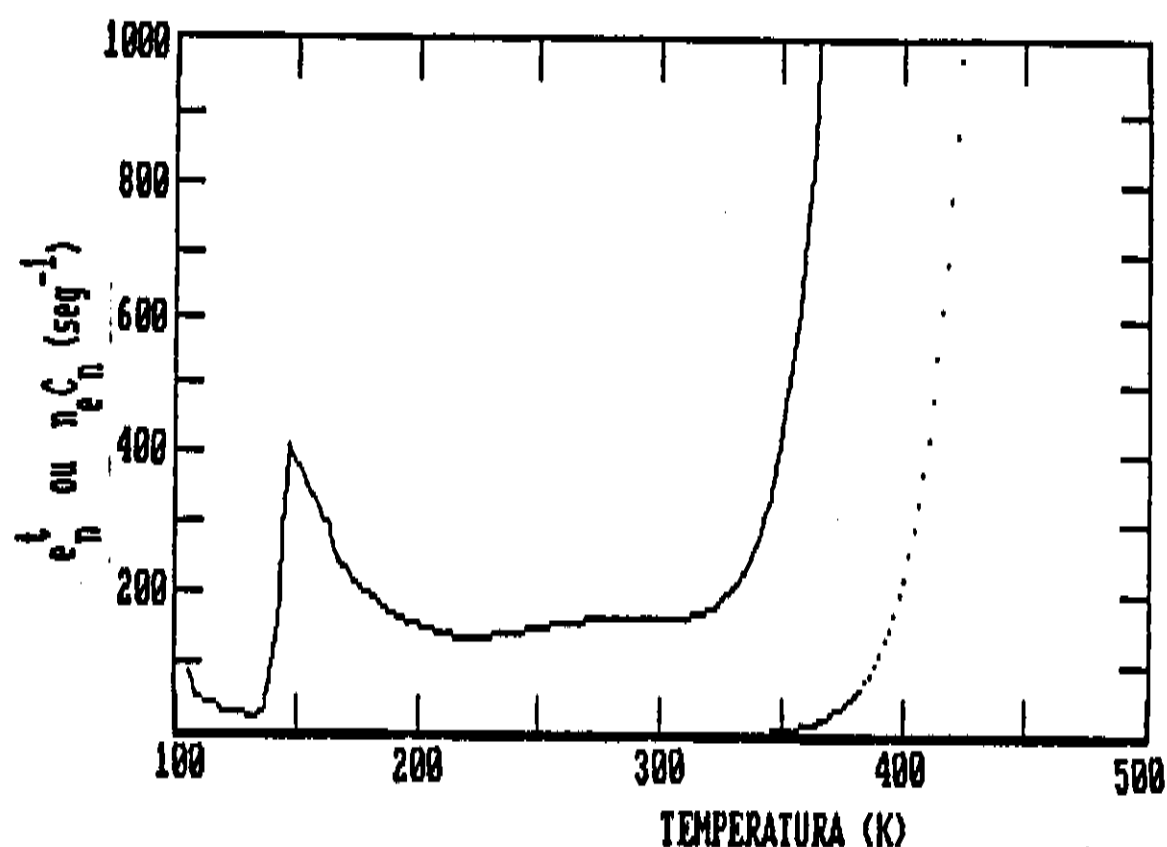


Fig. IV.8.3 - Gráfico de (—) $n_e C_n$ e (.....) e_n^t do centro EL2 com iluminação de fundo constante, em função da temperatura.

lâmpadas. Aqui também os dados são relativos ao centro EL2. Observando esta figura concluímos que a constante de tempo efetiva deste centro definida pela equação IV.8.21 será dominada pelo termo $n_e C_n$. Supondo que $\tau \approx (n_e C_n)^{-1}$ e usando os valores da figura IV.8.3 vemos que τ apresentará valores relativamente pequenos $\tau \approx 5$ mseg mesmo a baixas temperaturas ($150 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$), ou seja, a armadilha ficará ativa durante praticamente todo o intervalo de temperatura da nossa medida PITS. Isto significa que vários centros podem estar ativos numa mesma temperatura independente de sua energia de ativação. Este efeito pode explicar a observação de picos positivos e negativos sobrepostos onde uma análise mais detalhada dos dados torna-se muito complexa e praticamente impossível.

V - CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos detalhes de construção de um sistema PITS ("Photo Induced Transient Spectroscopy") automático e digital para medidas de transientes de fotocorrente em materiais semi-isolantes. Introduzimos várias inovações tais como a mudança automática de ganho e a subtração da corrente de escuro que melhoraram bastante a relação sinal-ruído e a sensibilidade do sistema. Estas inovações permitiram obter dados experimentais com alta resolução e fazer uma análise detalhada destes dados e da técnica em si.

O método tradicional de tratamento de dados de transientes de fotocorrente baseia-se na análise de um sinal PCT conhecido como espectro PITS. Os parâmetros característicos (energia de ativação e seção de choque de captura) de uma armadilha são obtidos pela análise dos máximos dos espectros PITS através de relações entre a constante de tempo do espectro e a taxa de emissão do centro. A obtenção destas relações envolve uma série de aproximações, que analisamos cuidadosamente e chegamos a conclusão de que elas nem sempre são cumpridas. Isto implica numa indeterminação muito grande dos parâmetros da armadilha por este método. Na definição do sinal PITS, também supomos que a emissão de uma única armadilha domina o decaimento da corrente em cada temperatura, de modo que ele possa ser descrito por uma única exponencial. Na verdade, analisando os transientes experimentais observamos que eles são compostos por uma soma de duas ou três exponenciais. Portanto, o sinal PCT pode "misturar" estas exponenciais e deformar o

espectro PITS. Isto pode levar a obtenção de parâmetros físicos irreais além de impossibilitar a resolução de armadilhas com energias de ativação relativamente próximas, como no caso dos picos #6 e #7.

Contrariamente a Abele et al [Abele 1987] conseguimos descrever os decaimentos como uma soma univocamente determinada de exponenciais. A partir de ajustes por mínimos quadrados, desta soma de exponenciais aos decaimentos da fotocorrente, obtivemos as constantes de tempo dos transientes, com muito mais confiabilidade do que aqueles obtidos através dos máximos do espectro PITS. Os valores das energias de ativação e das seções de choque dos níveis profundos em GaAs (SI) determinados a partir das constantes de tempo dos transientes, para temperaturas menores que 300 K, concordam muito bem com os dados da literatura obtidos por DLTS.

Fizemos um estudo da forma do decaimento da fotocorrente em função da iluminação constante de fundo e da qualidade de polimento das superfícies das amostras. Em algumas destas condições especiais quando a corrente de escuro não é desprezível, os transientes invertem o sinal de suas derivadas produzindo espectros PITS com sinal negativo que não podem ser explicados pelas equações encontradas na literatura. Isto nos levou a estudar o sistema de equações diferenciais que descrevem a densidade de portadores nas bandas de condução e de valência considerando a corrente de escuro alta. Encontramos uma solução original para este sistema que contém a possibilidade da inversão do sinal da derivada do transiente de fotocorrente. Para verificar a confiabilidade desta solução apresentamos uma simulação do transiente da fotocorrente através da solução numérica do sistema

de equações diferenciais, com as condições de contorno semelhantes ao das condições experimentais em que foram observados os picos negativos nos espectros PITS. Tanto a solução analítica (aproximada) como a solução numérica, levaram aos mesmos resultados; ou seja, dependendo das condições iniciais o transiente pode inverter o sinal de sua derivada ou tornar-se praticamente nulo. Provamos também que quando a corrente de escuro é alta, a intensidade de um pico do espectro PITS não é mais proporcional a densidade da armadilha correspondente. Isto explica o fato do centro EL2 não apresentar um pico muito intenso nos espectros PITS apesar deste ser o centro presente em maior concentração nas nossas amostras.

A solução das equações diferenciais mostrou também que quando a corrente de escuro é muito alta, a constante de tempo do transiente de corrente não corresponde mais ao inverso da taxa de emissão da armadilha. Isto invalida a determinação da energia de ativação e da seção de choque através da constante de decaimento do transiente para temperaturas acima de 300 K, onde a corrente de escuro começa a aumentar significativamente e o processo de recaptura dos portadores pelas armadilhas não é mais desprezível.

A caracterização de armadilhas presentes em amostras semi-isolantes é uma tarefa relativamente difícil, sendo o PITS uma das únicas técnicas aplicáveis. Mostramos que o método tradicional de tratamento de dados pela definição do espectro PITS pode apresentar uma grande indeterminação nos valores dos parâmetros obtidos. Propomos um método de ajuste direto dos transientes com resultados mais confiáveis. No entanto, não descartamos a utilidade do espectro PITS tradicional como um

método qualitativo para observação das armadilhas presentes numa amostra, que pode ser aplicado inclusive como um método de avaliação da qualidade da superfície da amostra. Para armadilhas com níveis de energia próximos ao meio do "gap", observáveis a temperaturas mais altas, a determinação da energia de ativação e da seção de choque apresenta dificuldades extras. A corrente de escuro torna-se muito alta e a constante de decaimento do transiente apresenta uma dependência mais complexa, envolvendo outros parâmetros além da taxa de emissão da armadilha. Para determinação mais precisa dos parâmetros relativos a estas armadilhas, precisamos propor medidas complementares ou escolher condições especiais de medidas que eliminem os problemas relacionados com a corrente de escuro alta. Este é um problema que pretendemos estudar no futuro próximo, como uma continuação deste trabalho de análise da técnica PITS.

VI. REFERENCIAS

- Abele 1987 - J. C. Abele, R. E. Kremer e J. S. Blakemore, J. Appl. Phys. 62, 2432 (1986).
- Allen 1986 - J. W. Allen, "Deep Centers in Semiconductors", editado por S. T. Pantelides, Gordon & Breach, New York (1986), pg. 627.
- Ashby 1976 - A. Ashby, G. G. Roberts, D. J. Ashen e J. B. Mullin, Solid State Comm. 20, 61 (1976).
- Auret 1986(a) - F. D. Auret, A. W. R. Leitch e J. S. Vermaak, J. Appl. Phys. 59, 158 (1986).
- Auret 1986(b) - F. D. Auret e M. Nel, Appl. Phys. Lett. 48, 130 (1986).
- Balland 1986 - J. C. Balland, J. P. Zieler, M. Tapiero, J. G. Gross e A. C. Noguet, J. Phys. D 19, 71 (1986).
- Bhattacharya 1980 - P. K. Bhattacharya, J. W. Ku, S. J. T. Diven, V. Aeli, C. B. Cooper e R. L. Woon, Appl. Phys. Lett. 36, 304 (1980).
- Bishop 1986 - S. G. Bishop, "Deep Centers in Semiconductors", editado por S. T. Pantelides, Gordon & Breach, New York (1986), pg. 541.
- Blakemore 1962 - J. S. Blakemore, "Semiconductor Statistics", Pergamon Press, New York (1962).
- Blight 1989 - S. R. Blight e H. Thomas, J. Appl. Phys. 65, 215 (1989).
- Blood 1983 - P. Blood e A. D. C. Ghassie, Phys. Rev. B 27, 2548 (1983).
- Bois 1977 - D. Bois e G. Vincent, J. Phys. Lett. 38, 351 (1977).
- Bois 1980 - D. Bois e A. Chantre, Rev. Phys. Appl. 15, 631 (1981).
- Bourgoin 1983 - J. C. Bourgoin e M. Lannoo, "Point Defects in Semiconductors II - Experimental Aspects", Solid State Science vol. 35, Springer-Verlag, New York (1983).
- Bourgoin 1988 - J. C. Bourgoin, H. J. Bardeleben e D. Stiévenard, J. Appl. Phys. 64, R65 (1988).

- Brasil 1989(a) - M. J. S. P. Brasil, P. R. B. Pedreira e P. Motisuke, submetido na Rev. Sci. Instr.
- Brasil 1989(b) - M. J. S. P. Brasil e P. Motisuke, aceito para publicação nos Resumos da IV SBmicro.
- Brasil 1989(c) - M. J. S. P. Brasil e P. Motisuke, submetido para publicação no Appl. Phys. Lett.
- Buchwald 1987 - W. R. Buchwald, N. M. Johnson e L. P. Trombetta, Appl. Phys. Lett. 50, 1007 (1987).
- Chantre 1981 - A. Chantre, G. Vincent e D. Bois, Phys. Rev. B 23, 5335 (1981).
- Day 1981 - D. S. Day, J. D. Oberstai, J. D. Drummond, H. Mockoç, A. Y. Cho e B. G. Streetman, J. Electron. Mater. 10, 445 (1981).
- Dean 1982 - P. J. Dean, Prog. Crystal Growth Charact. 5, 89 (1982).
- Deveaud 1980 - B. Deveaud e B. Toulouse, "Semi- Insulating III-V Materials, Nottingham 1980", pg. 241, editado por G. J. Rees, Shiva Publ., Orpington, U.K. (1980).
- Fairman 1979 - R. D. Fairman, F. J. Morin e J. R. Oliver, Conf. Ser. Inst. Phys. 45, 134 (1979).
- Fairman 1980 - R. D. Fairman e J. R. Oliver, "Semi-Insulating III-V Materials, Nottingham 1980", pg. 83, editado por G. J. Rees, Shiva Publ., Orpington, U.K. (1980).
- Fang 1989 - Z. Fang, L. Shan, T. E. Schlensinger e A. G. Milnes, a ser publicado.
- Grimmeiss 1980 - H. G. Grimmeiss, Lect. Notes Phys. 122, 50 (1980).
- Harris 1985 - J. J. Harris, "The technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy", editado por E. H. C. Parker, Plenum Press, New York (1985), pg. 425.
- Hasegawa 1975 - H. Hasegawa e A. Majerfeld, Electron. Lett. 11, 286 (1975).
- Henini 1986 - N. Henini, B. Tuch e C. J. Paull, Solid State Electron. 29, 483 (1986).
- Hull 1976 - T. E. Hull, W. H. Enright e K. R. Jackson, "User's Guide for DVERK - A Subroutine for Solving Non-Stiff ODE's", TR No.100, Department of Computer Science, University of

Toronto (1976).

- Hurtes 1978 - Ch. Hurtes, M. Boulou, A. Mittonneau e D. Bois, Appl. Phys. Lett 32, 821 (1978).
- Ilegems 1985 - M. Ilegems, "The technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy", editado por E. H. C. Parker, Plenum Press, New York (1985), pg. 83.
- Itoh 1981 - T. Itoh e H. Yanai, Inst. Phys. Conf. Ser. 56, 537 (1981).
- Keil 1965 - T. H. Keil, Phys. Rev. A 140, 601 (1965).
- Kennedy 1981 - T. A. Kennedy, "Nuclear and Electron Resonance Spectroscopies Applied to Material Science", vol. 3, editado por E. N. Kaufmann e G. K. Shenoy, North-Holland, New York (1981).
- Kirkpatrick 1984 - C. G. Kirkpatrick, R. T. Chen, D. E. Holmes, P. M. Asbeck, K. R. Elliot, R. D. Fairman e J. R. Oliver, "Semiconductors and Semimetals", vol. 20, editado por R.K. Willardson e A. C. Beer, Academic Press, New York (1984), pg. 159.
- Kitagawara 1986 - Y. Kitagawara, N. Moto, T. Takahashi e T. Takenaka, Appl. Phys. Lett. 48, 1664 (1986).
- Kremer 1987 - R. E. Kremer, M. C. Arian, J. C. Abele e J. S. Blakemore, J. Appl. Phys. 62, 2424 (1987).
- Lang 1974 - D. V. Lang, J. Appl. Phys 45, 3023 (1974).
- Lang 1975 - D. V. Lang e R. A. Logan, J. Electron. Mater. 4, 1053 (1975).
- Lang 1976 - D. V. Lang, A. Y. Cho, A. C. Gossard, M. Ilegems e Wiegman, J. Appl. Phys. 47, 2558 (1976).
- Lang 1979 - D. V. Lang, Top. Appl. Phys 37, 93 (1979).
- Lin 1976 - A. Lin, E. Omelianovski e R. H. Bube, J. Appl. 47, 1852 (1976).
- Lefreve 1977 - H. Lefreve e M. Schulz, Appl. Phys 12, 45 (1977).
- Look 1983 - D. C. Look, "Semiconductors and Semimetals", vol. 19, pg. 75, editado por R.K. Willardson e A. C. Beer, Academic Press, New York (1983).
- Martin 1977 - G. M. Martin, A. Mittonneau e A. Mircea, Electron. Lett. 31, 191 (1977).
- Martin 1978 - G. M. Martin e D. Bois, Electroch. Soc. Ext. Abstr.

78-3, 32 (1978).

- Martin 1980 - G. M. Martin, "Semi-Insulating III-V Materials, Nottingham 1980", pg. 13, editado por G. J. Rees, Shiva Publ., Orpington, U.K. (1980).
- Martin 1986 - G. Martin e S. Makram-Ebeid, "Deep Centers in Semiconductors", editado por S. T. Pantelides, Gordon & Breach, New York (1986), pg. 399.
- Mircea 1975 - A. Mircea e A. Mitonneau, Appl. Phys. 8, 15 (1975).
- Mitonneau 1977(a) - A. Mitonneau, G. M. Martin e A. Mircea, Conf. Ser. Inst. Phys 33a, 73 (1977).
- Mitonneau 1977(b) - A. Mitonneau, G. M. Martin e A. Mircea, Electron. Lett. 13, 666 (1977)
- Morkoç 1985 - H. Morkoç, "The technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy", editado por E. H. C. Parker, Plenum Press, New York (1985), pg. 185.
- Neumark 1983 - G.F. Neumark e K. Kosai, "Semiconductors and Semimetals", vol. 19, pg. 1, editado por R.K. Willardson e A. C. Beer, Academic Press, New York (1983).
- Pantelides 1986 - S. T. Pantelides, "Deep Centers in Semiconductors", editado por S. T. Pantelides, Gordon & Breach, New York (1986).
- Rhee 1982 - J. K. Rhee e P. K. Battacharya, J. Appl. Phys 53, 4247 (1982).
- Sakai 1974 - K. Sakai e T. Ikoma, Appl. Phys. 5, 165 (1974).
- Schubert 1986 - E. F. Schubert, A. Fischer e K. Ploog, IEE Trans. Electr. Dev. 33, 625 (1986).
- Sheng 1985 - S. Sheng, D. H. Li e C. G. Choi, Appl. Phys. Lett. 47, 1180 (1985).
- Stolte 1984 - C. A. Stolte, "Semiconductors and Semimetals", vol. 20, editado por R.K. Willardson e A. C. Beer, Academic Press, New York (1984), pg. 89.
- Takikawa 1980 - M. Takikawa e T. Ikoma, Jpn. J. Appl. Phys 19, L436 (1980).
- Thomas 1984 - R. N. Thomas, H. M. Hobgood, G. W. Eldridge, D. L. Barret, T. T. Braggins, L. B. Ta e S. K. Wang, "Semiconductors and Semimetals", vol. 20, editado por R.K. Willardson e A. C. Beer, Academic Press, New York (1984), pg. 1.

- Van Vechten 1976 - J. A. Van Vechten and C. D. Thurmond, Phys. Rev. B 14, 3539 (1976).
- Vincent 1981 - G. Vincent, D. Bois e A. Chantre, J. Appl. Phys. 53, 3643 (1977).
- Watanabe 1983 - M. O. Watanabe, A. Tanaka, T. Velegawa, T. Nakanisi e Y. Zheta, Jpn. J. Appl. Phys 22, 923 (1983).
- Williams 1972 - E. W. Williams e H. B. Bebb, "Semiconductors and Semimetals", vol. 8, pg. 321, editado por R.K. Willardson e A. C. Beer, Academic Press, New York (1972).
- Yoshie 1983 - O. Yoshie e M. Kamihara, Jpn. J. Appl. Phys. 22, 621 (1983).
- Yoshie 1985 - O. Yoshie and M. Kamihara, Jpn. J. Appl. Phys. 24, 431 (1985).
- Young 1986 - L. Young, W. C. Tang, S. Dindo e K. S. Lowe, J. Electrochem. Soc. 133, 609 (1986).
- Zielinger 1985 - J. P. Zielinger, B. Pohoryles, J. C. Balland, J. G. Gross e A. Coret, J. Appl. Phys 57, 293 (1985).

APÊNDICES

A.1. SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DO TRANSIENTE DE CORRENTE

Vamos analisar o caso de uma armadilha muito próxima do meio da banda proibida onde a captura e emissão tanto dos elétrons quanto dos buracos sejam importantes, isto é, vamos analisar armadilhas para a qual e_n^t e e_p^t tenham intensidades comparáveis. Além disso, vamos considerar que a corrente de escuro é alta ($I_0 \gg 0$) introduzindo na equação II.3.5 um termo g_{tn} correspondente a emissão térmica de todas armadilhas diferentes daquela que estamos analisando. O mesmo será feito para a equação da densidade de buracos na banda de valência, onde introduzimos o termo g_{tp} . O sistema de equações a resolver será então da forma:

$$\frac{dn}{dt} = e_n n_t - n C_n (N_t - n_t) - \frac{n}{\tau_n} + g_{ln} + g_{tn} \quad (A.1.1)$$

$$\frac{dn_t}{dt} = - e_n n_t + n C_n (N_t - n_t) + e_p (N_t - n_t) - p C_p n_t \quad (A.1.2)$$

$$\frac{dp}{dt} = e_p (N_t - n_t) - p C_p n_t - \frac{p}{\tau_p} + g_{lp} + g_{tp} \quad (A.1.3)$$

onde todos os termos já foram definidos na seção II e g_{ln} e g_{lp} correspondem respectivamente à geração de elétrons e buracos pela excitação óptica de um centro para as bandas (excitação extrínseca), ou a excitação de elétrons da banda de valência para

a banda de condução (excitação intrínseca e neste caso $g_{ln}=g_{lp}$). Observamos que a emissão térmica e óptica de portadores pelas armadilhas diferentes da analisada estão sendo "diferenciadas" no caso de elétrons e buracos.

Na seção II.3 desprezamos os termos cruzados que contém produtos $n_t n$ ou $n_t p$, que aparecem nas equações diferenciais acima, considerando que a recaptura dos portadores pelas armadilhas durante o transiente é desprezível. Mas neste caso, como a densidade de portadores livres nas bandas permanece alta mesmo após o corte de luz, esta aproximação pode não ser válida. Não existe uma solução analítica exata para o sistema de equações A.1.1, A.1.2 e A.1.3, mas podemos resolvê-lo se considerarmos que:

$$n(t) = n_e + \delta n(t) \quad (A.1.4)$$

$$p(t) = p_e + \delta p(t) \quad (A.1.5)$$

com $\delta n \ll n_e$ e $\delta p \ll p_e$ e $\delta n(t \rightarrow \infty) = \delta p(t \rightarrow \infty) = 0$. Então é razoável utilizar a aproximação: $n C_n (N_t - n_t) \cong n_e C_n (N_t - n_t)$, e $p C_p n_t \cong p_e C_p n_t$, durante o transiente. Isto é, vamos resolver o sistema de equações para o transiente de corrente após o corte de luz desprezando os termos $\delta n(t) C_n (N_t - n_t)$ e $\delta p(t) C_p n_t$, que são muito pequenos comparados com $n \tau_n^{-1}$ e $p \tau_p^{-1}$. Assim obtemos:

$$\frac{dn}{dt} \cong e_n n_t - n_e C_n (N_t - n_t) - \frac{n}{\tau_n} + g_{tn} \quad (A.1.6)$$

$$\frac{dn_t}{dt} \cong -e_n n_t + n_e C_n (N_t - n_t) + e_p (N_t - n_t) - p_e C_p n_t \quad (A.1.7)$$

$$\frac{dp}{dt} \approx e_p (N_t - n_t) - p_e C_p n_t - \frac{p}{\tau_p} + g_{tp} \quad (\text{A.1.8})$$

Resolvendo primeiramente a equação A.1.7, temos:

$$n_t(t) = n_{te} + (n_{tl} - n_{te}) \exp[-(e_n^t + e_p^t + n_e C_n + p_e C_p)t] \quad (\text{A.1.9})$$

onde os estados estacionários com luz e no escuro são dados respectivamente por:

$$n_{te} = \frac{N_t}{1 + \frac{e_n^t + p_e C_p}{e_p^t + n_e C_n}} \quad (\text{A.1.10})$$

$$n_{tl} = \frac{N_t}{1 + \frac{e_n + p_l C_p}{e_p + n_l C_n}} \quad (\text{A.1.11})$$

onde p_l e n_l são respectivamente, a densidade de buracos na banda de valência e a densidade de elétrons na banda de condução em estado estacionário sob iluminação. Usando este resultado para resolver a equação A.1.6, encontramos:

$$n(t) = n_e + (n_l - n_e - n_1) \exp(-t/\tau_n) + n_1 \exp[-(e_n^t + e_p^t + n_e C_n + p_e C_p)t] \quad (\text{A.1.12})$$

onde:

$$n_e = \frac{(g_{tn} + e_n^t n_{te})}{[\tau_n^{-1} + C_n (N_t - n_{te})]} \quad (\text{A.1.13})$$

$$n_1 = \frac{(n_e C_n + e_n^t)}{[\tau_n^{-1} - (e_n^t + e_p^t + n_e C_n + p_e C_p)]} (n_{tl} - n_{te}) \quad (\text{A.1.14})$$

Considerando que $\tau_n^{-1} \gg e_n^t, e_p^t, n_e C_n, p_e C_p, C_n(N_t - n_{te})$, temos:

$$n_e = \tau_n g_{tn} + e_n^t n_{te} \tau_n \quad (\text{A.1.15})$$

$$n_1 = \tau_n (n_e C_n + e_n^t) (n_{tl} - n_{te}) \quad (\text{A.1.16})$$

De maneira equivalente para os buracos:

$$p(t) = p_e + (p_l - p_e + p_1) \exp(-t/\tau_p) - p_1 \exp[-(e_n^t + e_p^t + n_e C_n + p_e C_p)t] \quad (\text{A.1.17})$$

onde:

$$p_e = \frac{e_p^t (N_t - n_{te}) + g_{tp}}{[\tau_p^{-1} + C_p n_{te}]} \quad (\text{A.1.18})$$

$$p_1 = \frac{(e_p^t + p_e C_p)}{[\tau_p^{-1} - (e_n^t + e_p^t + n_e C_n + p_e C_p)]} (n_{tl} - n_{te}) \quad (\text{A.1.19})$$

Considerando que $\tau_p^{-1} \gg e_n^t, e_p^t, n_e C_n, p_e C_p, C_p n_{te}$, temos:

$$p_e = \tau_p g_{tp} + e_p^t (N_t - n_{te}) \tau_p \quad (\text{A.1.20})$$

$$p_1 = \tau_p (p_e C_p + e_p^t) (n_{tl} - n_{te}) \quad (\text{A.1.21})$$

A corrente total na amostra será dada então por:

$$\begin{aligned}
 I(t) = q\epsilon A \left\{ \mu_n n(t) + \mu_p p(t) \right\} = q\epsilon A \left\{ \left[\mu_n n_{\bullet} + \mu_p p_{\bullet} \right] + \right. \\
 + \left[\mu_n (n_l - n_{\bullet} - n_1) \exp(-t/\tau_n) + \mu_p (p_l - p_{\bullet} + p_1) \exp(-t/\tau_p) \right] + \\
 + \left[\mu_n \tau_n (n_{\bullet} C_n + e_n^t) - \mu_p \tau_p (p_{\bullet} C_p + e_p^t) \right] (n_{tl} - n_{t\bullet}) \times \\
 \left. \times \exp[-(e_n^t + e_p^t + n_{\bullet} C_n + p_{\bullet} C_p) t] \right\} \quad (A.1.22)
 \end{aligned}$$

A.2 LISTAGEM DOS PROGRAMAS DE CONTROLE

PROGRAMA DE CONTROLE PRINCIPAL EM BASIC PARA MEDIDAS PITS

```

PROGRAMA DE CONTROLE P/ PITS

PITS-G
Programa de controle de PITS com ganho automatico
arquivo resultante: temp. + corrente(1,npts) +
+ mod. ganho(1,3) + fundo

VERSAO: 07-11-88      < Maria Jose >

DIM cor(1200), corrente%(1200), corrente$(1200)
SCREEN 2: CLS
LOCATE 10, 15: PRINT "< PROGRAMA DE CONTROLE DE PITS >"
LOCATE 12, 15: PRINT "LABORATORIO DE ESPECTROSCOPIA II"
LOCATE 14, 15: PRINT "    DFESCM    -    IFGW    -    UNICAMP"
u$ = INPUT$(1)

DATA 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9
DATA 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19
DATA 20,21,22,23,24,25,26,27,28,29
DATA 30,31,32,33,34,35,36,37,38,39
DATA 40,41,42,43,44,45,46,47,48,49
DATA 50,51,52,53,54,55,56,57,58,59
DATA 60,61,62,63,64,65,66,67,68,69
DATA 70,71,72,73,74,75,76,77,78,79
DATA 80,81,82,83,84,85,86,87,88,89
DATA 90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100
DATA 101,102,103,104,105,106,107,108,109
DATA 110,111,112,113,114,115,116,117,118,119
DATA 120,121,122,123,124,125,126,127,128,129
DATA 130,131,132,133,134,135,136,137,138,139
DATA 140,141,142,143,144,145,146,147,148,149,150
DATA 151,152,153,154,155,156,157,158,159,160
DATA 161,162,163,164,165,166,167,168,169,170
DATA 171,172,173,174,175,176,177,178,179,180
DATA 181,182,183,184,185,186,187,188,189,190
DATA 191,192,193,194,195,196,197,198,199,200

definicoes das variaveis do espectro

```

```

obj$ = "Caracterizacao"
autor$ = "ESP II"
nome$ = "FITS"
mat$ = "GaAs"
radiacao$ = "LAMPADA DE W"
fre$ = "5 Hz"
tempo$ = "100 ms"
nosp$ = "#1"
temp$ = "300"

```

////////////////////////////////////

inicio:

```

CLS 0
ON ERROR GOTO label15
v0$ = obj$
v1$ = autor$
v2$ = nome$
v3$ = dia$
v4$ = mat$
v5$ = amos$
v7$ = radiacao$
v8$ = filt$
v9$ = fre$
v10$ = tempo$
v11$ = nosp$

```

Dados de entrada

```

CLS
LOCATE 1, 1: PRINT "-----"
LOCATE 2, 1: PRINT " ::: Dados basicos da serie de medidas ::: "
LOCATE 3, 1: PRINT "-----"
LOCATE 5, 1
PRINT "objetivo = "; v0$: INPUT v0$
CALL defaults(v0$, obj$)
PRINT "nome do autor = "; v1$: INPUT v1$
CALL defaults(v1$, autor$)
PRINT "Nome do espectro = "; v2$: INPUT v2$
CALL defaults(v2$, nome$)
PRINT "data = "; v3$: INPUT v3$
CALL defaults(v3$, dia$)
PRINT "material = "; v4$: INPUT v4$
CALL defaults(v4$, mat$)
PRINT "amostra # = "; v5$: INPUT v5$
CALL defaults(v5$, amos$)
PRINT "radiacao = "; v7$: INPUT v7$

```

```

CALL defaults(v7$, laser$)
PRINT "filtros ="; v8$: INPUT v8$
CALL defaults(v8$, filt$)
PRINT "frequencia ="; v9$: INPUT v9$
CALL defaults(v9$, fre$)
PRINT "tempo iluminado ="; v10$: INPUT v10$
CALL defaults(v10$, tempo$)
PRINT "numero do espectro ="; v11$: INPUT v11$
CALL defaults(v11$, nesp$)
PRINT "dt (ms) ="; dt: INPUT dtn
IF dtn < 0 THEN dt = dtn
PRINT "# de pontos ="; npts%: INPUT t%
IF t% < 0 THEN npts% = t%
PRINT "# de varreduras (maximo=8) ="; nvar%: INPUT t%
IF t% < 0 THEN nvar% = t%
PRINT "Quer trocar os dados (s/n) ?": e$ = INPUT$(1)
IF e$ = "s" THEN GOTO inicio

```

```
rep10: CLS 0
```

```

novo: PRINT " "
PRINT
INPUT "drive:nome base desta serie de medidas"; arq$

IF INSTR(arq$, ":") = 0 THEN GOTO novo
RESTORE
READ n$
narq$ = arq$ + n$ + ".dat"

OPEN narq$ FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, obj$
PRINT #1, autor$
PRINT #1, dia$
PRINT #1, nome$
PRINT #1, mat$
PRINT #1, amos$
PRINT #1, radiacao$
PRINT #1, filt$
PRINT #1, fre$
PRINT #1, tempo$
PRINT #1, dt
PRINT #1, npts%
PRINT #1, nvar%
CLOSE #1

```

```
inici1:
```

```

CLS 0
LOCATE 1, 1

```

```

INPUT "Temperatura (K) ="; temp%
PRINT "Quer trocar (s/n) ?": et$ = INPUT$(1)
IF et$ = "s" THEN GOTO inici1

PRINT
PRINT "Para iniciar aperte qualquer tecla!"
inicia$ = INPUT$(1)

' *****
'               Aquisicao de dados
' *****

FOR n% = 1 TO npts% + 4
    corrente%(n%) = 0
NEXT n%
varp = VARPTR(corrente%(1))
call ptrB6(varseg%, varoff%, varp)
call cpits(npts%, nvar%, varseg%, varoff%)
FOR iz% = 1 TO npts%
    corrente%(iz%) = corrente%(iz%) / nvar%
    cor(iz%) = (corrente%(iz%) / 2048) - 1!
NEXT iz%
s = npts% + 1
p1 = corrente%(s)
s = s + 1
p2 = corrente%(s)
s = s + 1
p3 = corrente%(s)
s = s + 1
fundo = corrente%(s)

' *****
'               Definir os parametros do grafico
' *****

xmax = 1!: xmin = 0
WINDOW (-10, -.05)--((npts% + 10), 1.05)
VIEW (1, 1)--(638, 148), 0, 1
VIEW PRINT

' *****
'               traçar o grafico
' *****

CLS
LOCATE 21, 1
PRINT mat$; " "; amos$; "  temperatura ="; temp%; " "
LOCATE 22, 1
PRINT "H de pontos ="; npts%, "H de varreduras ="; nvar%

```

```

LOCATE 23, 1
PRINT "p1="; p1, "p2="; p2, "p3="; p3, "fundo="; fundo;
LINE (0, xmax)-(0, xmin)
LINE (0, 0)-((npts% + 1), 0)
FOR i% = 1 TO npts%
    PSET (i%, cor(i%))
NEXT i%

```

```

'*****
'
'      Armazenar Dados
'*****

```

```

LOCATE 24, 10

```

```

gravar: INPUT "Quer gravar (s/n)"; s$
IF s$ = "n" OR s$ = "N" THEN GOTO fim

```

```

repl: CLS 0
LOCATE 5, 10
READ numero$
num$ = numero$
FILES arq$ + "*.dat"

```

```

denovo:
PRINT "numero do arquivo :"; num$; INPUT num$
CALL defaults(num$, numero$)
narquivo$ = arq$ + numero$ + ".dat"

```

```

OPEN narquivo$ FOR RANDOM AS #1 LEN = 2
field #1, 2 as temp$
FOR i% = 1 TO npts% + 4
    field #1, 2 as corrente$(i%)
NEXT i%
iset temp$ = mki$(temp%)
PUT #1
FOR i% = 1 TO npts% + 4
    iset corrente$(i%) = mki$(corrente%(i%))
    put #1
NEXT i%
CLOSE #1

```

```

fim:
LOCATE 24, 10: PRINT "
LOCATE 24, 10: INPUT "Continua esta serie de medidas (s/n)"; s$
IF s$ = "n" OR s$ = "N" THEN GOTO naoquer
GOTO inici1

```

```

naoquer:
LOCATE 24, 10: PRINT "
LOCATE 24, 10: INPUT "...Voce tem certeza... (s/n)"; c$
IF c$ = "n" OR c$ = "N" THEN GOTO fim
LOCATE 24, 10: PRINT "
LOCATE 24, 10: INPUT "Inicia outra serie de medidas (s/n)"; m$
IF m$ = "s" OR m$ = "S" THEN GOTO inicio
END

```

ARMADILHA DE ERRO

label15:

VIEW (0, 0)--(638, 198), 0, 0

IF ERR = 11 THEN

LOCATE 10, 5: PRINT "::::DIVISAO POR ZERO::::"

LOCATE 12, 5

PRINT ".....Tecle algo para continuar....."

u\$ = INPUT\$(1)

RESUME inicio

ELSEIF ERR = 5 THEN

LOCATE 10, 2

PRINT "::::RAIZ QUADRADA DE VALOR NEGATIVO::::"

LOCATE 12, 5

PRINT ".....Tecle algo para continuar....."

u\$ = INPUT\$(1)

RESUME inicio

ELSEIF ERR = 71 THEN

LOCATE 10, 5: PRINT "::::DRIVE COM PROBLEMA::::"

RESUME gravar

ELSEIF ERR = 53 THEN

LOCATE 10, 5: PRINT "::::ARQUIVO NAO ENCONTRADO::::"

RESUME gravar

ELSEIF ERR = 61 THEN

LOCATE 10, 5: PRINT "::::DISCO CHEIO::::"

RESUME gravar

END IF

ss = ERR

LOCATE 10, 5: PRINT "ERRO!!!!!!.....VALOR DO CODIGO = "; ss

RESUME gravar

+++++

Subrotina : string

+++++

SUB defaults (a\$, b\$) STATIC

IF a\$ = "" THEN GOTO fim1

b\$ = a\$

fim1:

END SUB

SUBROTINA DE CONTROLE EM ASSEMBLER PARA MEDIDAS PITS - CPITS

```

; SUBROTINA PARA CONTROLAR AS MEDIDAS DE PITS....C-PITS
; VARIACAO AUTOMATICA DO GANHO      .1...2...3...4
; PONTOS DE MUDANCA DE GANHO      ..P1..P2..P3

```

VERSÃO: 10-11-88 NECA

• FORTAS USADAS:

```

PLACA AD:      0340H..PROGRAMA E LE TRIG
                0342H..INICIA E LE MSB
                0343H..LE LSB

```

PLACA CONTROLE:	0780H..PORTA A..FUNDO
	0781H..PORTA B..GANHO
	0782H..PORTA C..FREQ
	0783H..CONTROLE

```
; PARAMETROS:
```

(FIDC,NFTS,NVAR,SEG_ARRAY,OFF_ARRAY)

PUBLIC CFTTS

DATA SEGMENT WORD PUBLIC 'DATA' ;SEGMENTO DE DADOS

F0	DW	0000H
F1	DW	0000H
F2	DW	0000H
F3	DW	0000H
FUNDO	DW	0000H
FDC	DW	0000H

DATA ENDS

CODE	SEGMENT	BYTE	PUBLIC	'CODE'	SEGMENTO DE PROGRAMA
------	---------	------	--------	--------	----------------------

CPITS FROC FAR

```
ASSUME CS:CODE, DS:DATA
```

```

PUSH    BP
MOV     BP, SP

```

VMIN	EQU	2190	;V MINIMO PARA MUDANCA DE GANHO
			;EQUIVALENTE A .07 VOLTS
NADA	EQU	0000	;
			;
	MOV	P0,0	;COMECA COM
	MOV	P1,0	;TODOS OS
	MOV	P2,0	;MARCADORES
	MOV	P3,0	;EM ZERO
	MOV	FUNDO,0	;
			;
	MOV	AL,128	;PROGRAMA
	MOV	DX,0783H	;PORTAS COMO
	OUT	DX,AL	;SAIDAS
			;
	MOV	BX,[BP+14]	;ENDEREÇO PAR 1
	MOV	AX,[BX]	;PAR 1=FDC EM AX
	MOV	FDC,AX	;E EM FDC
			;
	MOV	DX,0780H	;PORTA A: FUNDO
	OUT	DX,AL	;FUNDO = FDC
			;
	MOV	AL,1	;PROGRAMA
	MOV	DX,0781H	;PORTA B: GANHO
	OUT	DX,AL	;GANHO=1
			;
	MOV	BX,0000H	;LIMPA BX PARA GUARDAR VFUNDO
	MOV	CX,0008H	;CONTADOR=8 PONTOS
			;
	CLI		;DESABILITA INTERRUPCOES DO PC
			;
	MOV	AL,10H	;PROGRAMA
	MOV	DX,0340H	;PLACA AD
	OUT	DX,AL	;COM TRIGGER
			;
	MOV	DX,0342H	;INICIA REFERENCIA
	OUT	DX,AL	;VAZIA
			;
TEMP1:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP1	;CONVERSAO
			;
	MOV	DX,0342H	;LIMPA
	IN	AL,DX	;INTERRUPCAO
	MOV	DX,0343H	;LE
	IN	AL,DX	;CONVERSOES
			;
LTRG1:	MOV	DX,0340H	;LE SINAL
	IN	AL,DX	;DE TRIGGER
	ROR	AL,1	;SE TRIGGER (LSB)=1
	JC	LTRG1	;CONTINUA LENDO

	MOV	DX,000EH	; ATRASO	
TEMP2:	DEC	DX	; PARA	
	JNZ	TEMP2	; CONVERSAO	
	MOV	DX,0342H	; LIMPA	
	IN	AL,DX	; INTERRUPTAO	
	MOV	DX,0343H	; LE	
	IN	AL,DX	; CONVERSOES	
	MOV	AL,30H	; PROGRAMA .4.	
	MOV	DX,0340H	; PLACA AD .4.	
	OUT	DX,AL	; SEM TRIGGER .8.	
	MOV	DX,5EEDH	; ATRASO LONGO	
TEMP3:	DEC	DX	; PARA CHEGAR	
	JNZ	TEMP3	; EM V FUNDO :90 MSEG	
LEPL1:	MOV	DX,0342H	; INICIA .4.	
	OUT	DX,AL	; CONVERSAO .8.	
	MOV	DX,000EH	; ATRASO	
TEMP4:	DEC	DX	; PARA	
	JNZ	TEMP4	; CONVERSAO	
	MOV	DX,0342H	; .4.	
	IN	AL,DX	; LE MSB .8.	
	MOV	AH,AL	; COLOCA EM AH .2.	
	MOV	DX,0343H	; .4.	
	IN	AL,DX	; LE LSB .8.	
	AND	AL,0F0H	; APAGA NIBBLE VAZIO .4.	41
	SHR	AX,1	; .2.	
	SHR	AX,1	; .2.	
	SHR	AX,1	; .2.	
	SHR	AX,1	; DIVIDE POR 16 .2.	
	MOV	DX,AX		
	SUB	DX,2048		
	JNC	NAO		
	INC	CX		
	JMP	VAI		
NAO:	ADD	BX,AX	; SOMA VALOR CONVERTIDO EM BX .3.	
VAI:	NOP		; .3.	
	MOV	DX,000EH	; ATRASO PARA	
TEMP5:	DEC	DX	; INTERVALO	
	JNZ	TEMP5	; ENTRE PONTOS	
	DEC	CX	; DECREMENTA CONTADOR PONTOS .2.	...
	JNZ	LEPL1	; SE NAO ACABOU LE OUTRO .16,4.	18

POSIT:

```

SHR     BX,1
SHR     BX,1
SHR     BX,1
SUB     BX,2048
JNC     POSIT
MOV     BX,0000H
SHR     BX,1
SHR     BX,1
SHR     BX,1
SHR     BX,1
SHR     BX,1
MOV     AX,BX
SHR     AX,1
MOV     CX,AX
SHR     CX,1
SHR     CX,1
SHR     CX,1
ADD     AX,BX
ADD     AX,CX

ADD     AX,FDC
MOV     FUNDO,AX

MOV     DX,0780H
OUT     DX,AL

MOV     AL,1
MOV     DX,0781H
OUT     DX,AL

MOV     BX,[BP+12]
MOV     CX,[BX]
MOV     BX,[BP+10]
MOV     DI,[BX]
MOV     BX,[BP+8]
MOV     ES,[BX]
MOV     BX,[BP+6]
MOV     SI,[BX]

MOV     AL,10H
MOV     DX,0340H
OUT     DX,AL

MOV     DX,0342H
OUT     DX,AL

MOV     DX,000EH
DEC     DX

```

```

;
;
;
;DIVIDE FOR 8
;SUBTRAI 2048
;
;SE NEGATIVO COLOCA ZERO
;
;
;
;
;DIVIDE FOR 32
;
;DIVIDE FOR 32*2
;
;
;
;DIVIDE FOR 32*2*8
;
;BX=AD-2048
;DA=BX/32+BX/64+BX/512
;
;SOMA FDC
;GUARDA FUNDO
;
;PROGRAMA FUNDO
;
;PROGRAMA
;PORTA B: GANHO
;GANHO=1
;
;ENDERECO PAR 1
;PAR 2=NPFS EM CX
;ENDERECO PAR 2
;PAR 3=NVAR EM DI
;ENDERECO PAR 3
;PAR 4=SEG-ARRAY EM ES
;ENDERECO PAR 4
;PAR 5=OFF-ARRAY EM SI
;
;PROGRAMA
;PLACA AD
;COM TRIGGER
;
;INICIA REFERENCIA
;VAZIA
;
;ATRASO
;PARA

```

TEMP6:

	JNZ	TEMP6	;CONVERSAO
			;
	MOV	DX,0342H	;LIMPA
	IN	AL,DX	;INTERRUPCAO
	MOV	DX,0343H	;LE
	IN	AL,DX	;CONVERSOES
			;
LTRG2:	MOV	DX,0340H	;
	IN	AL,DX	;ESPERA
	ROR	AL,1	;TRIGGER
	JC	LTRG2	;
			;
TEMP7:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP7	;CONVERSAO
			;
	MOV	DX,0342H	;LIMPA
	IN	AL,DX	;INTERRUPCAO
	MOV	DX,0343H	;LE
	IN	AL,DX	;CONVERSOES
			;
	MOV	AL,30H	;PROGRAMA .4.
	MOV	DX,0340H	;PLACA AD .4.
	OUT	DX,AL	;SEM TRIGGER .8.
			;
	MOV	DX,0342H	;INICIA
	OUT	DX,AL	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,0FFH	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
TEMP71:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP71	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,00H	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
	JMP	LBL1	;TEMPO
			;
LBL1:	MOV	DX,0342H	;
	IN	AL,DX	;LE MSB
	MOV	AH,AL	;COLOCA EM AH
	MOV	DX,0343H	;
	IN	AL,DX	;LE LSB
	AND	AL,0F0H	;APAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;

	SHR	AX,1	;	
	SHR	AX,1	;	DIVIDE POR 16
	ADD	ES:[SI],AX	;	GUARDA NO ARRAY
			;	
	INC	SI	;	INCREMENTA APONTADOR .2.
	INC	SI	;	DO ARRAY .2.
	DEC	CX	;	DECREMENTA CONT. DE PONTOS .2.
	JZ	FIMVAR1	;	FIM PONTOS-FIM VARREDURA .16,4.
			;	
	CMF	AX,VMIN	;	COMPARA COM V MIN .9.
	JC	NP1	;	SE MENOR MUDA GANHO .16,4.
			;	
NOME1:	JMP	NOME1	;	TEMPO .15. . . .
	MOV	AX,00	;	TEMPO .4.
TEMP8:	MOV	DX,000CH	;	ATRASO PARA 47
	DEC	DX	;	INTERVALO 28
	JNZ	TEMP8	;	ENTRE PONTOS
			;	
	MOV	DX,0342H	;	INICIA
	OUT	DX,AL	;	CONVERSAO 12
			;	
	MOV	AL,0FFH	;	SINAL
	MOV	DX,0782H	;	P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;	FREQUENCIA
			;	
TEMP9:	MOV	DX,000EH	;	ATRASO
	DEC	DX	;	PARA 244
	JNZ	TEMP9	;	CONVERSAO
			;	
	MOV	AL,00H	;	SINAL
	MOV	DX,0782H	;	P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;	FREQUENCIA
			;	
	JMP	LBL1	;	LE OUTRO PONTO 15
			;	
			;	
FIMVAR1:	JMP	FIMVAR	;	
			;	MUDANCA PARA GANHO 2
			;	
NP1:	MOV	F1,CX	;	GUARDA F1
			;	
	MOV	AL,2	;	PROGRAMA
	MOV	DX,0781H	;	GANHO
	OUT	DX,AL	;	GANHO=2
			;	
TEMP10:	MOV	DX,000BH	;	ATRASO
	DEC	DX	;	ENTRE
	JNZ	TEMP10	;	PONTOS
			;	
LBL2:	MOV	DX,0342H	;	INICIA

	OUT	DX,AL	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,0FFH	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
TEMP11:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP11	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,00H	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
	MOV	DX,0342H	;
	IN	AL,DX	;LE MSB
	MOV	AH,AL	;COLOCA EM AH
	MOV	DX,0343H	;
	IN	AL,DX	;LE LSB
	AND	AL,0F0H	;APAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;DIVIDE POR 16
	ADD	ES:ESI,AX	;GUARDA NO ARRAY
			;
	INC	SI	;INCREMENTA APONTADOR
	INC	SI	;DO ARRAY
	DEC	CX	;DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS
	JZ	FIMVAR2	;SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA
			;
	CMF	AX,VMIN	;COMPARA COM V MIN
	JC	NF2	;SE MENOR MUDA GANHO
			;
NOME2:	JMP	NOME2	;TEMPO
	MOV	AX,00	;TEMPO
	MOV	DX,000CH	;ATRASSO
TEMP12:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP12	;PONTOS
			;
	JMP	LBL2	;
			;
FIMVAR2:	JMP	FIMVAR	;
			;MUDANCA PARA GANHO 3
			;
NF2:	MOV	P2,CX	;GUARDA P2
			;
	JMP	G3	;TEMPO
			;
G3:	MOV	AL,4	;PROGRAMA

	MOV	DX,0781H	;Ganho=3
	OUT	DX,AL	;
			;
	MOV	DX,000BH	;ATRASSO
TEMP13:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP13	;PONTOS
			;
LBL3:	MOV	DX,0342H	;INICIA
	OUT	DX,AL	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,0FFH	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
TEMP14:	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP14	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,00H	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
	MOV	DX,0342H	;
	IN	AL,DX	;LE MSB
	MOV	AH,AL	;COLOCA EM AH
	MOV	DX,0343H	;
	IN	AL,DX	;LE LSB
	AND	AL,0F0H	;APAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;DIVIDE POR 16
	ADD	ES:[SI],AX	;GUARDA NO ARRAY
			;
	INC	SI	;INCREMENTA APONTADOR
	INC	SI	;DO ARRAY
	DEC	CX	;DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS
	JZ	FIMVAR	;SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA
			;
	CMF	AX,VMIN	;COMPARA COM V MIN
	JC	NP3	;SE MENOR MUDA GANHO
			;
	JMP	NOME3	;TEMPO
NOME3:	MOV	AX,00	;TEMPO
	MOV	DX,000CH	;ATRASSO
TEMP15:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP15	;PONTOS
			;
	JMP	LBL3	;
			;

			;MUDANCA PARA GANH0 4
NP3:	MOV	P3,CX	;GUARDA P3
	JMP	G4	;TEMPO
G4:	MOV	AL,4	
	MOV	DX,0781H	;PROGRAMA
	OUT	DX,AL	;GANHO=4
	MOV	DX,000BH	;ATRASSO
TEMP16:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP16	;PONTOS
LBL4:	MOV	DX,0342H	;INICIA
	OUT	DX,AL	;CONVERSAO
	MOV	AL,0FFH	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
TEMP17:	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP17	;CONVERSAO
	MOV	AL,00H	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
	MOV	DX,0342H	
	IN	AL,DX	;LE MSB
	MOV	AH,AL	;COLOCA EM AH
	MOV	DX,0343H	
	IN	AL,DX	;LE LSB
	AND	AL,0F0H	;AFAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX,1	
	SHR	AX,1	
	SHR	AX,1	
	SHR	AX,1	;DIVIDE POR 16
	ADD	ES:[SI],AX	;GUARDA NO ARRAY
	INC	SI	;INCREMENTA APONTADOR
	INC	SI	;DO ARRAY
	DEC	CX	;DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS
	JZ	FIMVAR	;SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA
	CMP	CX,NADA	;COMPARA ALGO ERRADO
	JC	NP4	;PARA MANTER O MESMO dt
NP4:	JMP	NOME4	;TEMPO

NOME4:	MOV	AX,00	;TEMPO
	MOV	DX,000CH	;ATRASSO
TEMP18:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP18	;PONTOS
			"
	JMP	LBL4	"
			"
			"
			"
			;VARREDURA COM PONTOS
			;P1,P2,P3 JA ESTABELECIDOS
			"
			"
			"
FIMVAR:	DEC	DI	;DECREMENTA NVAR
	JNZ	NVAR	;SE NAO ACABOU NVAR, NOVA VARREDURA
	JMP	FIM	;SE ACABOU, FIM
			"
NVAR:	MOV	AL,1	;PROGRAMA
	MOV	DX,0781H	;GANHO
	OUT	DX,AL	;GANHO=1
			"
	MOV	BX,[BP+12]	;ENDEREÇO PAR 1
	MOV	CX,[BX]	;PAR 2=NPTS EM CX
	MOV	BX,[BP+6]	;ENDEREÇO PAR 4
	MOV	SI,[BX]	;PAR 5=OFF-ARRAY EM SI
			"
	MOV	AL,10H	;PROGRAMA
	MOV	DX,0340H	;PLACA AD
	OUT	DX,AL	;COM TRIGGER
			"
	MOV	DX,0342H	;INICIA REFERENCIA
	OUT	DX,AL	;VAZIA
			"
TEMP19:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP19	;CONVERSAO
			"
	MOV	DX,0342H	;LIMPA
	IN	AL,DX	;INTERRUPCAO
	MOV	DX,0343H	;LE
	IN	AL,DX	;CONVERSORES
			"
LTRG3:	MOV	DX,0340H	"
	IN	AL,DX	;ESPERA
	ROR	AL,1	;TRIGGER
	JC	LTRG3	"
			"
TEMP99:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP99	;CONVERSAO

		MOV	DX,0342H	;LIMPA
	IN	AL,DX	;INTERUPCAO	
	MOV	DX,0343H	;LE	
	IN	AL,DX	;CONVERSOES	
			;	
	MOV	AL,30H	;PROGRAMA	
	MOV	DX,0340H	;PLACA AD	
	OUT	DX,AL	;SEM TRIGGER	
			;	
	MOV	DX,0342H	;INICIA	
	OUT	DX,AL	;CONVERSAO	
			;	
	MOV	AL,0FFH	;SINAL	
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR	
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA	
			;	
TEMP20:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO	
	DEC	DX	;PARA	
	JNZ	TEMP20	;CONVERSAO	
			;	
	MOV	AL,00	;SINAL	
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR	
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA	
			;	
	JMP	NLEBL1	;TEMPO	
			;	
NLEBL1:	MOV	DX,0342H	;LE MSB	
	IN	AL,DX	;COLOCA EM AH	
	MOV	AH,AL	;	
	MOV	DX,0343H	;LE LSB	
	IN	AL,DX	;APAGA NIBBLE VAZIO	
	AND	AL,0F0H	;	
	SHR	AX,1	;	
	SHR	AX,1	;	
	SHR	AX,1	;	
	SHR	AX,1	;DIVIDE POR 16	
	ADD	ES:[SI],AX	;GUARDA NO ARRAY	
			;	
	INC	SI	;INCREMENTA APONTADOR	
	INC	SI	;DO ARRAY	
	DEC	CX	;DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS	
	JZ	NFIMVAR1	;SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA	
			;	
	CMF	P1,CX	;COMPARA P1 COM CONTADOR	
	JNC	TF1	;SE CONTADOR MENOR MUDA GANHO	
			;	
	JMP	NOMES	;TEMPO	

	MOV	DX,0342H	;LIMPA
	IN	AL,DX	;INTERUPCAO
	MOV	DX,0343H	;LE
	IN	AL,DX	;CONVERSOES
			;
	MOV	AL,30H	;PROGRAMA
	MOV	DX,0340H	;PLACA AD
	OUT	DX,AL	;SEM TRIGGER
			;
	MOV	DX,0342H	;INICIA
	OUT	DX,AL	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,0FFH	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
TEMP20:	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP20	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,00	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
	JMP	NLBL1	;TEMPO
			;
NLBL1:	MOV	DX,0342H	;
	IN	AL,DX	;LE MSB
	MOV	AH,AL	;COLOCA EM AH
	MOV	DX,0343H	;
	IN	AL,DX	;LE LSB
	AND	AL,0F0H	;AFAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;DIVIDE POR 16
	ADD	ESI:ESI,AX	;GUARDA NO ARRAY
			;
	INC	SI	;INCREMENTA APONTADOR
	INC	SI	;DO ARRAY
	DEC	CX	;DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS
	JZ	NFIMVAR1	;SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA
			;
	CMP	P1,CX	;COMPARA P1 COM CONTADOR
	JNC	TP1	;SE CONTADOR MENOR MUDA GANHO
			;
NOMES:	JMP	NOMES	;TEMPO
	MOV	AX,00	;TEMPO
	MOV	DX,000CH	;ATRASSO PARA
TEMP21:	DEC	DX	;INTERVALO

	JNZ	TEMP21	; ENTRE PONTOS
			;
	MOV	DX, 0342H	; INICIA
	OUT	DX, AL	; CONVERSAO
			;
	MOV	AL, 0FFH	; SINAL
	MOV	DX, 0782H	; P/ CHECAR
	OUT	DX, AL	; FREQUENCIA
			;
TEMP22:	MOV	DX, 000EH	; ATRASO
	DEC	DX	; PARA
	JNZ	TEMP22	; CONVERSAO
			;
	MOV	AL, 00	; SINAL
	MOV	DX, 0782H	; P/ CHECAR
	OUT	DX, AL	; FREQUENCIA
			;
	JMP	NLBL1	; LE OUTRO PONTO
			;
NFIMVAR1:	JMP	NFIMVAR	; MUDANCA PARA GANHO 2
			;
TP1:	MOV	PO, CX	; GUARDA P/ IGUALAR TEMPO
			;
	MOV	AL, 2	; PROGRAMA
	MOV	DX, 0781H	; GANHO
	OUT	DX, AL	; GANHO=2
			;
TEMP23:	MOV	DX, 000BH	; ATRASO
	DEC	DX	; ENTRE
	JNZ	TEMP23	; PONTOS
			;
NLBL2:	MOV	DX, 0342H	; INICIA
	OUT	DX, AL	; CONVERSAO
			;
	MOV	AL, 0FFH	; SINAL
	MOV	DX, 0782H	; P/ CHECAR
	OUT	DX, AL	; FREQUENCIA
			;
TEMP24:	MOV	DX, 000EH	; ATRASO
	DEC	DX	; PARA
	JNZ	TEMP24	; CONVERSAO
			;
	MOV	AL, 00H	; SINAL
	MOV	DX, 0782H	; P/ CHECAR
	OUT	DX, AL	; FREQUENCIA
			;
	MOV	DX, 0342H	;
	IN	AL, DX	; LE MSB
	MOV	AH, AL	; COLOCA EM AH

	MOV	DX,0343H	;
	IN	AL,DX	;LE LSB
	AND	AL,0F0H	;APAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;
	SHR	AX,1	;DIVIDE POR 16
	ADD	ES:[SI],AX	;GUARDA NO ARRAY
			;
	INC	SI	;INCREMENTA APONTADOR
	INC	SI	;DO ARRAY
	DEC	CX	;DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS
	JZ	NFIMVAR2	;SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA
			;
	CMF	P2,CX	;COMPARA P2 COM CONTADOR
	JNC	TF2	;SE CONTADOR MENOR MUDA GANHO
			;
	JMP	NOME6	;TEMPO
NOME6:	MOV	AX,00	;TEMPO
	MOV	DX,000CH	;ATRASSO
TEMP25:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP25	;PONTOS
			;
	JMP	NLBL2	;
			;
NFIMVAR2:	JMP	NFIMVAR	;
			;MUDANCA PARA GANHO 3
			;
TF2:	MOV	P0,CX	;GUARDA P/ IGUALAR TEMPO
			;
	JMP	NG3	;TEMPO
			;
NG3:	MOV	AL,4	;PROGRAMA
	MOV	DX,0781H	;GANHO=3
	OUT	DX,AL	;
			;
	MOV	DX,000BH	;ATRASSO
TEMP26:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP26	;PONTOS
			;
NLBL3:	MOV	DX,0342H	;INICIA
	OUT	DX,AL	;CONVERSAO
			;
	MOV	AL,0FFH	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
			;
	MOV	DX,000EH	;ATRASSO
TEMP27:	DEC	DX	;PARA
	JNZ	TEMP27	;CONVERSAO

	MOV	AL,00H	;SINAL
	MOV	DX,0782H	;P/ CHECAR
	OUT	DX,AL	;FREQUENCIA
	MOV	DX,0342H	
	IN	AL,DX	;LE MSB
	MOV	AH,AL	;COLOCA EM AH
	MOV	DX,0343H	
	IN	AL,DX	;LE LSB
	AND	AL,0F0H	;APAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX,1	
	SHR	AX,1	
	SHR	AX,1	
	SHR	AX,1	;DIVIDE POR 16
	ADD	ESI,ESI,AX	;GUARDA NO ARRAY
	INC	SI	;INCREMENTA APONTADOR
	INC	SI	;DO ARRAY
	DEC	CX	;DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS
	JZ	NFIMVAR3	;SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA
	CMF	P3,CX	;COMPARA P3 COM CONTADOR
	JNC	TP3	;SE CONTADOR MENOR MUDA GANHO
NOME7:	JMP	NOME7	;TEMPO
	MOV	AX,00	;TEMPO
TEMP28:	MOV	DX,000CH	;ATRASSO
	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP28	;PONTOS
	JMP	NLBL3	
NFIMVAR3:	JMP	NFIMVAR	
			;MUDANCA PARA GANHO 4
TP3:	MOV	P0,CX	;GUARDA P/ IGUALAR TEMPO
	JMP	NG4	;TEMPO
NG4:	MOV	AL,4	
	MOV	DX,0781H	;PROGRAMA
	OUT	DX,AL	;GANHO=4
	MOV	DX,000BH	;ATRASSO
TEMP29:	DEC	DX	;ENTRE
	JNZ	TEMP29	;PONTOS
NLBL4:	MOV	DX,0342H	;INICIA
	OUT	DX,AL	;CONVERSAO

	MOV	AL, 0FFH	; SINAL
	MOV	DX, 0782H	; P/ CHECAR
	OUT	DX, AL	; FREQUENCIA
TEMP30:	MOV	DX, 000EH	; ATRASO
	DEC	DX	; PARA
	JNZ	TEMP30	; CONVERSAO
	MOV	AL, 00H	; SINAL
	MOV	DX, 0782H	; P/ CHECAR
	OUT	DX, AL	; FREQUENCIA
	MOV	DX, 0342H	
	IN	AL, DX	; LE MSB
	MOV	AH, AL	; COLOCA EM AH
	MOV	DX, 0343H	
	IN	AL, DX	; LE LSB
	AND	AL, 0F0H	; APAGA NIBBLE VAZIO
	SHR	AX, 1	
	SHR	AX, 1	
	SHR	AX, 1	
	SHR	AX, 1	; DIVIDE POR 16
	ADD	ES:ESI, AX	; GUARDA NO ARRAY
	INC	SI	; INCREMENTA APONTADOR
	INC	SI	; DO ARRAY
	DEC	CX	; DECREMENTA CONTADOR DE PONTOS
	JZ	NFIMVAR	; SE ACABOU PONTOS FIM DE VARREDURA
	CMP	CX, NADA	; COMPARA ALGO ERRADO
	JC	TF4	; PARA MANTER O MESMO DT
TF4:	JMP	NOME8	; TEMPO
NOME8:	MOV	AX, 00	; TEMPO
	MOV	DX, 000CH	; ATRASO
TEMP31:	DEC	DX	; ENTRE
	JNZ	TEMP31	; PONTOS
	JMP	NLRL4	
NFIMVAR:	DEC	DI	; DECREMENTA NVAR
	JZ	FIM	; SE ACABOU, FIM
	JMP	NVAR	; SE NAO ACABOU, NOVA VAR.
FIM:	MOV	AX, F1	; GUARDA F1
	MOV	ES:ESI, AX	
	INC	SI	
	INC	SI	; APONTA PROXIMO PONTO DO ARRAY
	MOV	AX, F2	; GUARDA F2

	INC	ES:[ESI],AX	;
	INC	SI	;
	INC	SI	;APONTA PROXIMO PONTO DO ARRAY
	MOV	AX,F3	;GUARDA F3
	MOV	ES:[ESI],AX	;
	INC	SI	;
	INC	SI	;
	MOV	AX,FUNDO	;
	MOV	ES:[ESI],AX	;GUARDA FUNDO
	STI		;REABILITA INTERRUPTCOES DO PC
	MOV	AL,0	;PROGRAMA
	MOV	DX,0780H	;PORTA A: FUNDO
	OUT	DX,AL	;FUNDO=0
	MOV	AL,1	;PROGRAMA
	MOV	DX,0781H	;PORTA B: GANHO
	OUT	DX,AL	;GANHO=1
	POP	BP	;RETOMA BP
	RET	10	;RETORNA DA SUBROTINA ARRUMANDO ;A FILHA (2*5 PARAMETROS)
CFITS	ENDP		;FIM DA SUBROTINA
CODE	ENDS		;FIM DO SEGMENTO DE PROGRAMA
	END		;FIM

PROGRAMA DE TRATAMENTO DE DADOS DE TRANSIENTE DE FOTOCORRENTE PARA
OBTENÇÃO DE ESPECTROS PITS NORMALIZADOS

PROGRAMA DE TRATAMENTO DE PITS
COM MUDANÇA DE ESCALA E SUBTRAÇÃO DA CORRENTE DE FUNDO
CALCULA t1 E t2 USANDO UMA MÉDIA DE TRÊS PONTOS

Maria Jose

```
DECLARE SUB lemontado ( )
DECLARE SUB inicializa ( )
DECLARE SUB tarefa ( )
DECLARE SUB completo ( )
DECLARE SUB escalay ( )
DECLARE SUB limpa (n1%)
DECLARE SUB cursor ( )
DECLARE SUB escalax ( )
DECLARE SUB exhibe ( )
DECLARE SUB lerarquivo0 ( )
DECLARE SUB lerarquivo ( )
DECLARE SUB monta ( )
DECLARE SUB prompt ( )
```

OPTION BASE 1

DEFINT I-N

TYPE recordtype

temp AS SINGLE

pits AS SINGLE

END TYPE

TYPE recordtipo

cor AS INTEGER

END TYPE

DIM SHARED recordvar AS recordtype

DIM SHARED recordle AS recordtipo

DIM SHARED p(300), t(300)

DIM SHARED cor0%(200), m%(200, 3)

DIM SHARED cor1%(30, 1000)

DIM SHARED cor2%(31 TO 60, 1000)

DIM SHARED cor3%(61 TO 90, 1000)

DIM SHARED cor4%(91 TO 120, 1000)

DIM SHARED cor5%(121 TO 150, 1000)

DIM SHARED cor6%(151 TO 180, 1000)

DIM SHARED y(20), nvx(20), nvy(20), nvp(20), nv(20), esc(20), npx(20),

DIM SHARED obj\$, autor\$, dia\$, nome\$, mat\$, amos\$, radiacao\$, filt\$

```

DIM SHARED fre$, tempo$, np%, nvar%, barq$, dt, ndecai, ni, nf
DIM SHARED nomearq$, uni$, npts, lm, imprimi, nj, pp, nfinal
DIM SHARED pmax, pmin, xint, dpp, ndiv, fundo
CLEAR
CLOSE

```

```

DATA 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
DATA 11,12,13,14,15,16,17,18,19,20
DATA 21,22,23,24,25,26,27,28,29,30
DATA 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40
DATA 41,42,43,44,45,46,47,48,49,50
DATA 51,52,53,54,55,56,57,58,59,60
DATA 61,62,63,64,65,66,67,68,69,70
DATA 71,72,73,74,75,76,77,78,79,80
DATA 81,82,83,84,85,86,87,88,89,90
DATA 91,92,93,94,95,96,97,98,99,100
DATA 101,102,103,104,105,106,107,108,109,110
DATA 111,112,113,114,115,116,117,118,119,120
DATA 121,122,123,124,125,126,127,128,129,130
DATA 131,132,133,134,135,136,137,138,139,140
DATA 141,142,143,144,145,146,147,148,149,150
DATA 151,152,153,154,155,156,157,158,159,160
DATA 161,162,163,164,165,166,167,168,169,170
DATA 171,172,173,174,175,176,177,178,179,180

```

nib:

```

CALL inicializa
CALL tarefa
END

```

FUNCAO FNNOX

```

DEF FNnox (tt)
f0 = 80 / 640
f1 = 468 / (t(nfinal) - t(1))
mnox = (170 + (tt - t(1)) * f1) * f0
FNnox = mnox
END DEF

```

FUNCAO FNNOY

```

DEF FNnoy (nponto)
g0 = 24 / 200
g1 = 140 / (pmax - pmin)
mnoy = (10 + (pmax - p(nponto)) * g1) * g0
FNnoy = mnoy
END DEF

```

FUNCAO cx

```

DEF FNcx (nponto)
f0 = 80 / 640
f1 = 468 / (t(nfinal) - t(1))

```

```
FNcx = (nponto / f0 - 170) / 40
END DEF
```

FUNCAO Cy

```
DEF FNcy (nny)
  g0 = 24 / 200
  g1 = 140 / (pmax - pmin)
  FNcy = pmax - (nny / g0 - 10) / g1
END DEF
```

SUB completo STATIC

CALL escalay

FOR i = 1 TO lm

 jp = nop(i)

 LINE (t(jp), (p(jp) + dpp))--(t(jp), (p(jp)) + dpp)

NEXT i

VIEW (1, 79)--(165, 150), 0, 1

DRAW "bm5,87 r155 bm20,80 d69 bm100,80 d69"

VIEW PRINT

LOCATE 11, 2: PRINT "#": LOCATE 11, 5: PRINT "Temp.(K)"

LOCATE 11, 15: PRINT "Int."

dec = 65

ialto = 12

FOR i = 1 TO lm

 jx = nox(i)

 jy = noy(i)

 jjx = npx(i)

 jjy = npy(i)

 LOCATE jy, jx

 pimp\$ = CHR\$(dec)

 PRINT "#"; i

 dec = dec + 1

 IF xmeialargura(i) = 0 THEN GOTO pula

 LOCATE jjy, jjx

 PRINT USING "##.#"; xmeialargura(i);

 LOCATE ialto, 2: PRINT USING "#"; i

 LOCATE ialto, 5: PRINT USING "###.#"; t(nop(i));

 LOCATE ialto, 14: PRINT USING "#.####"; p(nop(i));

 ialto = ialto + 1

NEXT i

LOCATE 1, 1: PRINT " UNICAMP -INSTITUTO DE FISICA - DFESCM
 - LABORATORIO DE ESPECTROSCOPIA II"

'??

IMPRESSAO

'??

```

LOCATE 23, 1
PRINT "quer imprimir ? (s/n): p/ retornar ao menu, tecla ENTER"
cimp$ = INPUT$(1)
CALL limpa(23)
VIEW (1, 10)-(165, 75), 0, 1
IF cimp$ = CHR$(115) THEN
    view print
    LOCATE 3, 5
    PRINT dia$: LOCATE 4, 5: PRINT obj$: LOCATE 5, 5
    PRINT nome$: : LOCATE 6, 5
    PRINT mat$: LOCATE 7, 5: PRINT amos$
    LOCATE 8, 5: PRINT "t1=";
    PRINT ; USING "##"; (ni - ndecai) * dt;
    PRINT " t2="; : PRINT ; USING "###"; (nf - ndecai) * dt;
    PRINT "ms": LOCATE 9, 5
    PRINT autor$
    LOCATE 22, 1
    PRINT "excitacao:"; radiacao$: "          filtros: "; filt$
    PRINT "frequencia="; fre$: "          tempo c/ luz="; tempo$
    PRINT "decaimento:: # de pontos="; np%;
    PRINT "          intervalo de tempo="; dt; "          # de var.= "; nvar%;
    imprimi = 1

ELSE
    imprimi = 0
END IF

```

.....

```

END SUB

```

```

SUB cursor STATIC

```

nttrasub:

```

CALL limpa(21): CALL limpa(22): CALL limpa(23): CALL limpa(24)
LOCATE 23, 1
PRINT "tecla ESC para sair / QUALQUER tecla para continuar";
a$ = INPUT$(1): IF a$ = CHR$(27) THEN GOTO saisub
x = 1
CALL limpa(23)
LOCATE 22, 1
INPUT "# do ponto="; nponto
LOCATE 22, 12: PRINT "          "
LOCATE 22, 12
PRINT USING "####"; nponto;
LOCATE 22, 20
PRINT "          "
LOCATE 22, 20
PRINT "temperatura = "; : PRINT USING "#####.##"; t(nponto);
LOCATE 22, 44: PRINT "          "
LOCATE 22, 44
PRINT "intens.= "; : PRINT USING ".#####^"; p(nponto);

```

```

LINE (t(nponto), pmin + dpp)--(t(nponto), pmax - dpp), x AND 1
LOCATE 23, 1
PRINT "Movimentar:::direita(d),esquerda(e),Marcar(enter),Sair(esc)"
DEF SEG = 0: POKE 1050, PEEK(1052)

executar:
  x$ = INPUT$(1)
IF x$ = "d" THEN
  GOTO direita
ELSEIF x$ = "e" THEN
  GOTO esquerda
ELSEIF x$ = CHR$(13) THEN
  GOTO marcar
ELSEIF x$ = CHR$(27) THEN
  x = x + 1
  LINE (t(nponto), pmax)--(t(nponto), pmin), x AND 1
  PSET (t(nponto), p(nponto))
  GOTO entrasub
END IF
GOTO executar

marcar:
LINE (t(nponto), pmin)--(t(nponto), pmax), 0
LINE (t(nponto), p(nponto) + dpp)--(t(nponto), p(nponto) - dpp)
PSET (t(nponto), p(nponto))
nox = FNnox(t(nponto))
noy = FNnoy(nponto)
CALL limpa(23)
LOCATE 23, 1
PRINT "direita(d) esquerda(e) cima(c) baixo(b) Fim(enter) Sair(esc)"

lmarcar:
y$ = INPUT$(1)
IF y$ = "d" THEN
  nox = nox + 1
ELSEIF y$ = "e" THEN
  nox = nox - 1
ELSEIF y$ = "c" THEN
  noy = noy - 1
ELSEIF y$ = "b" THEN
  noy = noy + 1
ELSEIF y$ = CHR$(27) THEN
  CALL limpa(23): CALL limpa(24)
  GOTO entrasub
ELSEIF y$ = CHR$(13) THEN
  lm = lm + 1
  nox(lm) = nox
  noy(lm) = noy
  nop(lm) = nponto
  CALL limpa(23): CALL limpa(24)
LINE (t(nponto), (p(nponto) + dpp / 2)--(t(nponto), (p(nponto)) + dpp / 2)
  GOTO largura
END IF

```

```

cx = FNcx(nox)
cy = FNcy(noy)
PSET (cx, cy) ' indica a posicao do cursor
FOR i = 1 TO 100
    tem = SIN(i) ' atraso
NEXT i
LINE (cx, cy)-(cx, cy), 0 ' apaga o ponto
GOTO lmarcar

```

largura:

```

CALL limpa(23): LOCATE 23, 1
PRINT "Quer marcar a meia-largura:sim(s),nao(n)"
mlarg$ = INPUT$(1)
IF mlarg$ = "s" OR mlarg$ = "S" THEN GOTO ent
GOTO entrasub

```

ent:

```

CALL limpa(23): LOCATE 23, 1
INPUT "Valor do ruido de fundo"; rfundo
ymeio = (p(nponto) + rfundo) / 2
LINE (t(nponto), ymeio + dpp / 2)-(t(nponto), ymeio - dpp / 2)

```

lref:

```

CALL limpa(23): LOCATE 23, 1
PRINT "Referencia::direita(d),esquerda(e),ambas(a).....Sair(esc)"
ref$ = INPUT$(1)
IF ref$ = CHR$(27) THEN
    GOTO entrasub
ELSEIF ref$ = "e" OR ref$ = "E" OR ref$ = "a" OR ref$ = "A" THEN
    GOTO mesq
ELSEIF ref$ = "d" OR ref$ = "D" THEN
    GOTO mdir
END IF
GOTO lref

```

mesq:

```

nd = nponto
WHILE (p(nd) - ymeio) > 0
    nd = nd - 1
WEND
IF ABS(p(nd + 1) - ymeio) < ABS(p(nd) - ymeio) THEN nd = nd + 1
xmeiale = t(nponto) - t(nd)
IF ref$ = "e" OR ref$ = "E" THEN GOTO posicao1

```

mdir:

```

ne = nponto
WHILE (p(ne) - ymeio) > 0
    ne = ne + 1
WEND
IF ABS(p(ne - 1) - ymeio) < ABS(p(ne) - ymeio) THEN ne = ne - 1
xmeiald = t(ne) - t(nponto)

```

posicao1:

```

IF ref$ = "d" THEN
    xmeialargura(lm) = xmeiald * 2
    LINE (t(ne), ymeio)-(t(2 * nponto - ne), ymeio)

```

```

ELSEIF ref$ = "e" THEN
    xmeialargura(lm) = 2 * xmeiale
    LINE (y(nd), ymeio)--(t(2 * nponto - nd), ymeio)
ELSEIF ref$ = "a" THEN
    xmeialargura(lm) = xmeiald + xmeiale
    LINE (t(ne), ymeio)--(t(nd), ymeio)
END IF
nxx = FNnox(t(nponto)); nyy = FNnoy(nponto)
CALL limpa(23); LOCATE 23, 1
PRINT "Direita(d),esquerda(e),cima(c),baixo(b)",
PRINT "..Marcar(enter)..Sair(esc)"

```

posicao:

```

onde$ = INPUT$(1)
IF onde$ = "c" THEN
    nyy = nyy - 1
ELSEIF onde$ = "e" THEN
    nxx = nxx - 1
ELSEIF onde$ = "d" THEN
    nxx = nxx + 1
ELSEIF onde$ = "b" THEN
    nyy = nyy + 1
ELSEIF onde$ = CHR$(13) THEN
    npx(lm) = nxx
    npy(lm) = nyy
    GOTO entrasub
ELSEIF onde$ = CHR$(27) THEN
    GOTO entrasub
END IF
npxx = FNcx(nxx); pyy = FNcy(nyy)
PSET (npxx, pyy)
FOR i = 1 TO 100
    temp = SIN(i)
NEXT i
LINE (npxx, pyy)--(npxx, pyy), 0
GOTO posicao

```

direita:

```

x = x + 1
LINE (t(nponto), pmax - dpp)--(t(nponto), pmin + dpp), x AND 1
IF uni$ = "s" OR uni$ = "S" THEN
    FOR i = nponto - 10 TO nponto + 10
        IF i > 0 AND i < nfinal THEN
            LINE (t(i), p(i))--(t(i + 1), p(i + 1))
        END IF
    NEXT i
    END IF
    PSET (t(nponto), p(nponto))
    nponto = nponto + 1
    IF nponto = nfinal + 1 THEN nponto = 1
    GOTO cursor

```

esquerda:

```

x = x + 1
LINE (t(nponto), pmax - dpp)--(t(nponto), pmin + dpp), x AND 1
IF uni$ = "s" OR uni$ = "S" THEN

```

```

FOR i = nponto - 10 TO nponto + 10
  IF i > 0 AND i < nfinal THEN LINE (t(i), p(i))--(t(i + 1), p(i + 1))
NEXT i
END IF
PSET (t(nponto), p(nponto))
nponto = nponto - 1
IF nponto = 0 THEN nponto = nfinal

cursor:
x = x + 1
LINE (t(nponto), pmax - dpp)--(t(nponto), pmin + dpp), x AND 1
LOCATE 22, 12
PRINT USING "####"; nponto
LOCATE 22, 20: PRINT "temperatura = "; : PRINT USING "#####.##"; t(nponto)
LOCATE 22, 44
PRINT "intens. = "; p(nponto);
GOTO executar

saisub:
CALL limpa(22): CALL limpa(23): CALL limpa(24)
END SUB

SUB escalax STATIC
VIEW PRINT 20 TO 24
CALL limpa(21): CALL limpa(22): CALL limpa(23)
LOCATE 21, 1: INPUT "escolha # de divisoes do eixo x = "; ndiv
xint = (t(nfinal) - t(1)) / ndiv
PRINT "intervalo: "; t(1); " / "; t(nfinal); "temperatura/div. = "; xint
INPUT "escolha novo valor de temperatura/div. = "; xint
CALL limpa(21): CALL limpa(22): CALL limpa(23)
ndiv = (t(nfinal) - t(1)) / xint + 1
dpp = (pmax - pmin) / 5000

FOR i = 1 TO ndiv
  esc(i) = i * 100

  LINE (esc(i), pmin)--(esc(i), pmin + dpp)
  LINE (esc(i), pmax + pmax / 5)--(esc(i), pmax + pmax / 5 - dpp)
  mnv = FNnox(esc(i))
  mnv = mnv - 2
  IF mnv > 76 THEN GOTO opula
  LOCATE 20, mnv
  PRINT esc(i)

opula:
NEXT i
END SUB

SUB escalay STATIC
ddp = (pmax - pmin) / 5
FOR i = 1 TO 5
  LINE (t(1), pmin + ddp * i)--(t(2), pmin + ddp * i)
  LINE (t(nfinal), pmin + ddp * i)--(t(nfinal - 2), pmin + ddp * i)

```

```

NEXT i
END SUB

```

```

SUB exibe STATIC

```

```

CLS

```

```

FOR i = 1 TO lm

```

```

    xmeialargura(i) = 0

```

```

NEXT i

```

```

lm = 0

```

```

pmax = 0

```

```

pmin = 0

```

```

FOR i = 1 TO nfinal

```

```

    IF p(i) > pmax THEN pmax = p(i)

```

```

    IF p(i) < pmin THEN pmin = p(i)

```

```

NEXT i

```

```

IF pmin > 0 THEN pmin = 0

```

```

t1 = t(1)

```

```

t2 = t(nfinal)

```

```

INPUT "Fator do grafico: ", g

```

```

CLS

```

```

WINDOW (t1, pmin / g)-(t2, (pmax + pmax / 50) / g)

```

```

VIEW (170, 10)-(638, 150), 0, 1

```

```

LINE (t(1), 0)-(t(nfinal), 0)

```

```

INPUT "Quer unir os pontos: sim(s), nao(n)"; uni$

```

```

IF uni$ = "n" OR uni$ = "N" THEN GOTO nuni

```

```

FOR i = 1 TO nfinal - 1

```

```

    LINE (t(i), p(i))-(t(i + 1), p(i + 1))

```

```

NEXT i

```

```

GOTO ppp

```

nuni:

```

FOR i = 1 TO nfinal

```

```

    CIRCLE (t(i), p(i)), .5

```

```

NEXT i

```

ppp:

```

CALL limpa(22)

```

```

CALL escalay

```

rein:

```

CALL limpa(20)

```

```

FOR i = 1 TO ndio

```

```

    esc(i) = t(1) + xint * (i - 1)

```

```

LINE (esc(i), pmin)-(esc(i), pmin + dpp), 0

```

```

LINE (esc(i), pmax + pmax / 10)-(esc(i), pmax + pmax / 10 - dpp), 0

```

```

NEXT i

```

```

CALL escalax

```

```

LOCATE 22, 2: INPUT "quer trocar o eixo (s/n) "; t$

```

```

IF t$ = "s" THEN GOTO rein

```

```

END SUB

```

```
SUB inicializa STATIC
DEF SEG = 0: POKE 1050, PEEK(1052)
```

```
SCREEN 2: CLS 0
LOCATE 2, 22: PRINT " TRATAMENTO DE DADOS de PITS "
LOCATE 8, 1: PRINT "
LOCATE 22, 22: PRINT "<tecle algo para iniciar>"
x$ = INPUT$(1)
CALL limpa(22)
```

```
CALL lerarquivo0
```

semonta:

```
LOCATE 5, 1: INPUT "Quer montar pits (s,n): ", s$
```

```
IF s$ = "n" OR s$ = "N" THEN
```

```
    CALL lemontado
```

```
    GOTO fiminic
```

```
ELSEIF s$ = "s" OR s$ = "S" THEN
```

```
    CALL lerarquivo
```

```
    GOTO fiminic
```

```
END IF
```

```
GOTO semonta
```

fiminic:

```
END SUB
```

SUB lemontado

```
    OPEN n$ FOR RANDOM AS #1 LEN = LEN(recordvar)
```

```
    nfinal = LOF(1) / LEN(recordvar)
```

```
    FOR i = 1 TO nfinal
```

```
        GET #1, i, recordvar
```

```
        t(i) = recordvar.temp
```

```
        p(i) = recordvar.pits
```

```
    NEXT i
```

```
    CLOSE #1
```

END SUB

SUB lerarquivo STATIC

```
LOCATE 6, 1: INPUT "# do ponto do inicio do decaimento"; ndecai
```

```
INPUT "Numero de arquivos que deseja ler:"; nfinal
```

```
FOR i = 1 TO nfinal
```

```
    READ varq$
```

```
    narq$ = barq$ + varq$ + ".dat"
```

```
    LOCATE 10, 19: PRINT "...lendo arquivo..."; narq$
```

```

OPEN narq$ FOR RANDOM AS #1 LEN = LEN(recordle)
      ' Forma do arquivo: Temp. + Corrente(1,npts) +
      ' + Mud. ganho(1,3) + Cor. fundo subtraida
comp = LOF(1) / LEN(recordle)

GET #1, 1, recordle      ' Le a temperatura do decaimento
t(i) = recordle.cor
LOCATE 12, 19
PRINT "...temperatura = "; t(i)

jj = 0
FOR j = comp - 3 TO comp - 1      ' Le as 3 posicoes de mudanca
      ' de ganho automaticas
      jj = jj + 1      ' Ganho i ate o ponto =
      GET #1, j, recordle      ' # de pontos
      ' posicao de mudanca
      g = recordle.cor      ' com # de pontos = comp - 4
      mX(i, jj) = (comp - 5) - g
NEXT j

GET #1, comp, recordle
fundo = recordle.cor      ' Cor. fundo subtraida

IF i < 30 OR i = 30 THEN GOTO c1      ' Divide em matrizes
IF i < 60 OR i = 60 THEN GOTO c2      ' de 30 conjuntos
IF i < 90 OR i = 90 THEN GOTO c3      ' com 1000 elementos
IF i < 120 OR i = 120 THEN GOTO c4
IF i < 150 OR i = 150 THEN GOTO c5
IF i < 180 OR i = 180 THEN GOTO c6

CLS : PRINT "ERRO...MAIS QUE 150 PONTOS"

c1:
FOR k = 1 TO comp - 5
      GET #1, k + 1, recordle
      cor1X(i, k) = recordle.cor
NEXT k

GOTO c10

c2:
FOR k = 1 TO comp - 5
      GET #1, k + 1, recordle
      cor2X(i, k) = recordle.cor
NEXT k
GOTO c10

c3:
FOR k = 1 TO comp - 5
      GET #1, k + 1, recordle
      cor3X(i, k) = recordle.cor
NEXT k
GOTO c10

```

c4:

```
FOR k = 1 TO comp - 5
    GET #1, k + 1, recordle
    cor4%(i, k) = recordle.cor
NEXT k
GOTO c10
```

c5:

```
FOR k = 1 TO comp - 5
    GET #1, k + 1, recordle
    cor5%(i, k) = recordle.cor
NEXT k
GOTO c10
```

c6:

```
FOR k = 1 TO comp - 5
    GET #1, k + 1, recordle
    cor6%(i, k) = recordle.cor
NEXT k
```

c10:

```
CLOSE #1
```

```
NEXT i
```

```
npts = comp - 5
CLS 0
```

```
END SUB
```

```
SUB lerarquivo0 STATIC
```

```
LOCATE 4, 1: INPUT "Palavra base do arquivo ( drive:base ): ", barq$
```

```
READ varq$
```

```
narq$ = barq$ + varq$ + ".dat"
```

```
LOCATE 10, 19: PRINT "...lendo arquivo..."; narq$
```

```
OPEN narq$ FOR INPUT AS #1
```

```
INPUT #1, obj$
```

```
INPUT #1, autor$
```

```
INPUT #1, dia$
```

```
INPUT #1, nome$
```

```
INPUT #1, mat$
```

```
INPUT #1, anos$
```

```
INPUT #1, radiacao$
```

```
INPUT #1, filt$
```

```
INPUT #1, fre$
```

```
INPUT #1, tempo$
```

```
INPUT #1, dt
```

```
INPUT #1, np%
```

```
INPUT #1, noar%
```

```

CLOSE #1
CALL limpa(10)
END SUB

```

```

SUB limpa (n1) STATIC
LOCATE n1, 1
In% = 90
PRINT SPACE$(In%);
LOCATE n1, 1
END SUB

```

```

SUB monta STATIC
CLS 0

```

```

LOCATE 20, 1: PRINT "-----"
LOCATE 22, 1: INPUT "Tempo inicial:"; ti
LOCATE 22, 30: INPUT "Tempo final:"; tf
dt = .12287
ni = ti / dt + ndecal
nf = tf / dt + ndecal
FOR i = 1 TO nfinal
    IF ni > m%(i, 1) - 1 AND ni < m%(i, 1) + 4 THEN
        LOCATE 23, 1: PRINT "Proximo a mudanca de ganho"; i
        e$ = INPUT$(1)
        LOCATE 23, 1: PRINT "
    END IF
    IF ni > m%(i, 2) - 1 AND ni < m%(i, 2) + 4 THEN
        LOCATE 23, 1: PRINT "Proximo a mudanca de ganho"; i
        e$ = INPUT$(1)
        LOCATE 23, 1: PRINT "
    END IF
    IF nf > m%(i, 1) - 1 AND nf < m%(i, 1) + 4 THEN
        LOCATE 23, 1: PRINT "Proximo a mudanca de ganho"; i
        e$ = INPUT$(1)
        LOCATE 24, 1: PRINT "
    END IF
    IF nf > m%(i, 1) - 1 AND nf < m%(i, 1) + 4 THEN
        LOCATE 23, 1: PRINT "Proximo a mudanca de ganho"; i
        e$ = INPUT$(1)
        LOCATE 23, 1: PRINT "
    END IF
    IF i < 30 OR i = 30 THEN GOTO m1
    IF i < 60 OR i = 60 THEN GOTO m2
    IF i < 90 OR i = 90 THEN GOTO m3
    IF i < 120 OR i = 120 THEN GOTO m4
    IF i < 150 OR i = 150 THEN GOTO m5
    IF i < 180 OR i = 180 THEN GOTO m6
    CLS : PRINT "ERRO...MAIS QUE 150 PONTOS"

```

m1:

Co = 0

' Faz media da

```

FOR j = 6 TO ndecai - 5                                ' corrente inicial

    c = (cor1Z(i, j) - 2048) / 2048                    ' eliminando os
    IF j > mZ(i, 1) THEN                                ' 5 primeiros e os
        c = c / 10.4                                    ' 5 ultimos pontos
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Co = Co + c
NEXT j
Co = Co / (ndecai - 10)

Cf = 0                                                    ' Faz media da
FOR j = npts - 9 TO npts                                ' corrente final
    c = (cor1Z(i, j) - 2048) / 2048                    ' com os ultimos
    IF j > mZ(i, 1) THEN                                ' 10 pontos
        c = c / 10.4
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Cf = Cf + c
NEXT j
Cf = Cf / 10                                              ' Se a corrente final e
IF Cf < 0 THEN Cf = 0                                    ' negativa, considera zero

C1 = 0

FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor1Z(i, ni - 2 + in) - 2048) / 2048        ' Calcula a corrente
    IF ni - 2 + in > mZ(i, 1) THEN                      ' inicial
        Cn = Cn / 10.4
        IF ni - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C1 = C1 + Cn
NEXT in
C1 = C1 / 3

C2 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor1Z(i, nf - 2 + in) - 2048) / 2048        ' Calcula a corrente
    IF nf - 2 + in > mZ(i, 1) THEN                      ' final
        Cn = Cn / 10.4
        IF nf - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C2 = C2 + Cn
NEXT in
C2 = C2 / 3

p(i) = (C1 - C2) / (Co - Cf)                            ' Calcula o sinal de FITS
GOTO m10

```

m2:

```

Co = 0
FOR j = 6 TO ndecai - 5
    c = (cor2%(i, j) - 2048) / 2048
    IF j > mZ(i, 1) THEN
        c = c / 10.4
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Co = Co + c
NEXT j
Co = Co / (ndecai - 10)

Cf = 0
FOR j = npts - 9 TO npts
    c = (cor2%(i, j) - 2048) / 2048
    IF j > mZ(i, 1) THEN
        c = c / 10.4
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Cf = Cf + c
NEXT j
Cf = Cf / 10
IF Cf < 0 THEN Cf = 0

C1 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor2%(i, ni - 2 + in) - 2048) / 2048
    IF ni - 2 + in > mZ(i, 1) THEN
        Cn = Cn / 10.4
        IF ni - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C1 = C1 + Cn
NEXT in
C1 = C1 / 3

C2 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor2%(i, nf - 2 + in) - 2048) / 2048
    IF nf - 2 + in > mZ(i, 1) THEN
        Cn = Cn / 10.4
        IF nf - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C2 = C2 + Cn
NEXT in
C2 = C2 / 3

p(i) = (C1 - C2) / (Co - Cf)
GOTO m10

```

m3:

```

Co = 0
FOR j = 6 TO ndecal - 5
    c = (cor3Z(i, j) - 2048) / 2048
    IF j > mZ(i, 1) THEN
        c = c / 10.4
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Co = Co + c
NEXT j
Co = Co / (ndecal - 10)

Cf = 0
FOR j = npts - 9 TO npts
    c = (cor3Z(i, j) - 2048) / 2048
    IF j > mZ(i, 1) THEN
        c = c / 10.4
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Cf = Cf + c
NEXT j
Cf = Cf / 10
IF Cf < 0 THEN Cf = 0

C1 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor3Z(i, ni - 2 + in) - 2048) / 2048
    IF ni - 2 + in > mZ(i, 1) THEN
        Cn = Cn / 10.4
        IF ni - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C1 = C1 + Cn
NEXT in
C1 = C1 / 3

C2 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor3Z(i, nf - 2 + in) - 2048) / 2048
    IF nf - 2 + in > mZ(i, 1) THEN
        Cn = Cn / 10.4
        IF nf - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C2 = C2 + Cn
NEXT in
C2 = C2 / 3

p(i) = (C1 - C2) / (Co - Cf)
GOTO m10

Co = 0

```

Calcula o sinal de PITS

Faz media da

```

FOR j = 6 TO ndecai - 5
    c = (cor4%(i, j) - 2048) / 2048
    IF j > m%(i, 1) THEN
        c = c / 10.4
        IF j > m%(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Co = Co + c
NEXT j
Co = Co / (ndecai - 10)

Cf = 0
FOR j = npts - 9 TO npts
    c = (cor4%(i, j) - 2048) / 2048
    IF j > m%(i, 1) THEN
        c = c / 10.4
        IF j > m%(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Cf = Cf + c
NEXT j
Cf = Cf / 10
IF Cf < 0 THEN Cf = 0

C1 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor4%(i, ni - 2 + in) - 2048) / 2048
    IF ni - 2 + in > m%(i, 1) THEN
        Cn = Cn / 10.4
        IF ni - 2 + in > m%(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C1 = C1 + Cn
NEXT in
C1 = C1 / 3

C2 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor4%(i, nf - 2 + in) - 2048) / 2048
    IF nf - 2 + in > m%(i, 1) THEN
        Cn = Cn / 10.4
        IF nf - 2 + in > m%(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C2 = C2 + Cn
NEXT in
C2 = C2 / 3

p(i) = (C1 - C2) / (Co - Cf)

GOTO m10

```

' corrente inicial
 ' eliminando os
 ' 5 primeiros e os
 ' 5 ultimos pontos
 ' Faz media da
 ' corrente final
 ' com os ultimos
 ' 10 pontos
 ' Se a corrente final e
 ' negativa, considera zero
 ' Calcula a corrente
 ' inicial
 ' Calcula a corrente
 ' final
 ' Calcula o sinal de FITS

GOTO m10

m5:

Co = 0 ' Faz media da

```

FOR j = 6 TO ndecai - 5          ' corrente inicial
  c = (cor5%(i, j) - 2048) / 2048 ' eliminando os
  IF j > mZ(i, 1) THEN           ' 5 primeiros e os
    c = c / 10.4                 ' 5 ultimos pontos
    IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
  END IF
  Co = Co + c
NEXT j
Co = Co / (ndecai - 10)

Cf = 0                          ' Faz media da
FOR j = npts - 9 TO npts        ' corrente final
  c = (cor5%(i, j) - 2048) / 2048 ' com os ultimos
  IF j > mZ(i, 1) THEN           ' 10 pontos
    c = c / 10.4
    IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
  END IF
  Cf = Cf + c
NEXT j
Cf = Cf / 10                    ' Se a corrente final e
IF Cf < 0 THEN Cf = 0           ' negativa, considera zero

C1 = 0
FOR in = 1 TO 3
  Cn = (cor5%(i, ni - 2 + in) - 2048) / 2048 ' Calcula a corrente
  IF ni - 2 + in > mZ(i, 1) THEN               ' inicial
    Cn = Cn / 10.4
    IF ni - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
  END IF
  C1 = C1 + Cn
NEXT in
C1 = C1 / 3

C2 = 0
FOR in = 1 TO 3
  Cn = (cor5%(i, nf - 2 + in) - 2048) / 2048 ' Calcula a corrente
  IF nf - 2 + in > mZ(i, 1) THEN               ' final
    Cn = Cn / 10.4
    IF nf - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
  END IF
  C2 = C2 + Cn
NEXT in
C2 = C2 / 3

p(i) = (C1 - C2) / (Co - Cf)      ' Calcula o sinal de PITS
GOTO m10

m6:
Co = 0                          ' Faz media da
FOR j = 6 TO ndecai - 5          ' corrente inicial
  c = (cor6%(i, j) - 2048) / 2048 ' eliminando os

```

```

        IF j > mZ(i, 1) THEN / 5 primeiros e os
            c = c / 10.4 / 5 ultimos pontos
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Co = Co + c
NEXT j
Co = Co / (ndecai - 10)

Cf = 0 / Faz media da
FOR j = npts - 9 TO npts / corrente final
    c = (cor6Z(i, j) - 2048) / 2048 / com os ultimos
    IF j > mZ(i, 1) THEN / 10 pontos
        c = c / 10.4
        IF j > mZ(i, 2) THEN c = c / 9.2
    END IF
    Cf = Cf + c
NEXT j
Cf = Cf / 10 / Se a corrente final e
IF Cf < 0 THEN Cf = 0 / negativa, considera zero

C1 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor6Z(i, ni - 2 + in) - 2048) / 2048 / Calcula a corrente
    IF ni - 2 + in > mZ(i, 1) THEN / inicial
        Cn = Cn / 10.4
        IF ni - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C1 = C1 + Cn
NEXT in
C1 = C1 / 3

C2 = 0
FOR in = 1 TO 3
    Cn = (cor6Z(i, nf - 2 + in) - 2048) / 2048 / Calcula a corrente
    IF nf - 2 + in > mZ(i, 1) THEN / final
        Cn = Cn / 10.4
        IF nf - 2 + in > mZ(i, 2) THEN Cn = Cn / 9.2
    END IF
    C2 = C2 + Cn
NEXT in
C2 = C2 / 3

p(i) = (C1 - C2) / (Co - Cf) / Calcula o sinal de PITS
m10:
NEXT i

LOCATE 24, 1: INPUT "Grava "; g$
IF g$ = "n" OR g$ = "N" THEN GOTO ngr
LOCATE 24, 1: INPUT "nome do arquivo para este espectro:"; esp$
nq$ = "c:\neca\dat\" + esp$ + ".dat"

```

```

OPEN nq$ FOR RANDOM AS #1 LEN = LEN(recordvar)
FOR i = 1 TO nfinal
    recordvar.temp = t(i)
    recordvar.pits = p(i)
    PUT #1, i, recordvar
NEXT i
CLOSE #1

ngt:

CLS 0

END SUB

SUB prompt STATIC
    LOCATE 23, 1
    PRINT SPACE$(9);
LOCATE 23, 1
    PRINT "#";

END SUB

SUB tarefa STATIC
início0:
    DEF SEG = 0: POKE 1050, PEEK(1052)
VIEW PRINT 20 TO 24
    imprimi = 0
    CALL limpa(21): CALL limpa(22): CALL limpa(23): CALL limpa(24)
    LOCATE 21, 1
    PRINT "menu::::Ler, Montar, Exibir, Cursor, Definitivo, Fim::::"
    LOCATE 24, 1: PRINT "escolha uma tarefa com ENTER e a PRIMEIRA letra";
início1:
    CALL prompt
    FOR npausa = 1 TO 1200: NEXT npausa
    y$ = INKEY$
    IF y$ = "" THEN GOTO início1
    INPUT x$
    CALL limpa(21): CALL limpa(22): CALL limpa(23): CALL limpa(24)

    IF x$ = "L" OR x$ = "l" THEN
        CLS 0
        CALL lerarquivo0
        CALL lerarquivo
        GOTO início0

    ELSEIF x$ = "M" OR x$ = "m" THEN
        CALL monta
        GOTO início0

    ELSEIF x$ = "E" OR x$ = "e" THEN

```

```

        CALL exibe
        GOTO inicio0

ELSEIF x$ = "C" OR x$ = "c" THEN
        CALL cursor
        GOTO inicio0
        ' exibe o CURSOR na tela

ELSEIF x$ = "D" OR x$ = "d" THEN
        CALL completo
        IF imprimi = 1 THEN GOTO impl
        GOTO inicio0
        ' desenha o grafico DEFINITIVO

ELSEIF x$ = CHR$(102) THEN
        GOTO exittarefa
        ' FIM

END IF

CALL prompt
GOTO inicio0

impl:
    sai$ = INPUT$(1)

IF sai$ = CHR$(13) THEN GOTO inicio0
GOTO impl
exittarefa:
    END SUB

```