

JULIAN DAVID RODRIGUEZ RAMIREZ

Desempenho de Dispositivos Fotodetectores com multiplicação de
Elétrons por Avalanche

São Paulo
2010

JULIAN DAVID RODRIGUEZ RAMIREZ

Desempenho de Dispositivos Fotodetectores com multiplicação de
Elétrons por Avalanche

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Francisco Javier
Ramirez Fernandez

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à revisão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 5 de Março de 2010

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Rodríguez Ramírez, Julian David

Desempenho de dispositivos fotodetectores com multiplicação de elétrons por avalanche / J.D. Rodríguez Ramírez. – ed.rev.- São Paulo, 2010.

137 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Fotodetectores 2. Dispositivos ópticos 3. Semicondutores I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.

DEDICATORIA

Dedico este trabalho à todos que me ajudaram a completar mais esta etapa da minha formação acadêmica.

Em especial, dedico a minha esposa e meu filho,
Edna Carolina Gutierrez e Camilo,
meus pais Alirio e Carola, pelo incentivo,
apoio e, compreensão demonstrados não só durante
o período de realização deste trabalho, mas durante toda a minha vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

O Deus pela inspiração e conhecimento que deu para a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr Francisco Javier Ramirez pela oportunidade de realizar este trabalho, orientação apoio e confiança em mim.

Ao pessoal do Laboratório de Microeletrônica pela colaboração e apoio na parte experimental deste trabalho.

Ao pessoal pertencente ao projeto BTFI, coordenado pela Prof. Dr Claudia Mendes de oliveira. Permitindo-se o desenvolvimento da parte experimental do sistema de teste usado.

Ao conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico (CNPQ) pela concessão da bolsa de mestrado, a traves do programa nacional de microeletrônica (PNM), sem a qual este trabalho não teria sido realizado.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento de um sistema especificado para realizar testes na caracterização de dispositivos fotodetectores como fotodiodos de avalanche. O sistema de ensaios elaborado pretende auxiliar com na caracterização da fotodeteção em dispositivos de acoplamento de cargas com multiplicação de elétrons (EMCCD). O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dos dispositivos fotodetectores para caracterizar os parâmetros mais significativos no processo da transdução óptica de modo a colaborar no projeto da eletrônica embarcada de controle e leitura da informação contida no EMCCD. A tecnologia da multiplicação dos elétrons em dispositivos CCD e diodos de avalanche têm aplicações importantes na vigilância de ambiente de luminosidade reduzida, astronomia, além de outras aplicações de imagens científicas incluindo as de baixo nível de bioluminescência para identificação de drogas e aplicações da engenharia genética. Para efeito de avaliação do desempenho do sistema fotodetector foi necessário desenvolver uma infra-estrutura para ter controle adequado da temperatura de operação do EMCCD. Foram nomeadas as opções com uma montagem de resfriamento com células Peltier e uma opção por criogenia resfriada com nitrogênio líquido. Os resultados obtidos são úteis na detecção de sinais luminosos ultrafracos minimizando o ruído do detector na aquisição de imagens com o auxílio da instrumentação de um filtro óptico sintonizável que será integrado no telescópio SOAR de 4 metros, instalado no Chile, para observações melhoradas com óptica adaptativa.

Palavras chave: fotodetectores, dispositivo de acoplamento de carga, multiplicação de elétrons, fotodiodo de avalanche.

ABSTRACT

This work presents the results obtained in the development of a system specified to perform tests in the characterization of photo-detectors devices such as avalanche photodiodes. The test system is prepared to contribute to the characterization of the photo-detection in charge-coupled devices with electron multiplication (EMCCD). The objective of this study is to evaluate the performance of photo-detectors devices to characterize the most significant parameters in the optic transduction in order to collaborate in the project of an embedded electronic system for controlling and reading the information contained with the EMCCD. The technology of the electron multiplication in CCD devices and avalanche diodes has important applications in monitoring the environment of low light, astronomy and other scientific imaging applications including the low level of bioluminescence for the identification of drugs and applications of genetic engineering. For purposes of assessing the performance of the photo-detector it was necessary to develop an infrastructure to have proper control of the operating temperature of the EMCCD. Options were named with a montage of Peltier cell cooling and a choice of cryogenically cooled with liquid nitrogen. The results are useful in the detection of ultra weak light signals while minimizing detector noise during the acquisition of images from instrument comprising an optical tunable filter, that will be integrated into SOAR 4 meters telescope, installed in Chile, for observations improved with adaptive optics.

Key Word: Photo detectors. Charge coupled device. Electron multiplication. Adaptive optics. Avalanche photodiode.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMCCD	Electron Multiplying Charge Coupled Device
BTFI	Brazilian Tunable Filter Image
SOAR	Southern Astrophysical Research Telescope
CIC	Clock Induced Charge
CTE	Charge Transfer efficiency.
LED	light emitter diode
SiO₂	Oxido de silício
QE	Quantum efficiency
APD	Avalanche Photodiode

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura geral do CCD	22
Figura 2.2 - Estrutura básica de um CCD.....	24
Figura 2.3 - a) estrutura da porta de um CCD , b) estrutura mostrando a superposição das portas	24
Figura 2.4 - a) armazenameto de uma carga em um pixel, b)estrutura do um pixel no CCD	25
Figura 2.5 - Ddistribuição das camadas na estrutura de CCD.....	25
Figura 2.6 - Captura e acumulação da luz num detector CCD. 1 - placa de silício, 2 - elétrodos, 3 - fóton que gera um elétron capturado, 4 - fótons incidentes, 5 - fóton absorvido pelo elétrodo, 6 - elétrons capturados, 7 - fóton que gera um elétron perdido, 8 - fóton refletido	26
Figura 2.7 - Diagrama da operação da tensão de um típico CCD de três fases. As tensões da temporização são mostradas a três vezes durante o processo de leitura de saída, indicando seu ciclo de temporização de 0, 10, e 5 volts. Um ciclo de temporização causa o armazenamento da carga dentro de um pixel e é transferido este pacote de carga a um pixel vizinho. A leitura do CCD continua até que todos os pixels tenham sua carga transferida completamente fora do arranjo e são enviados para o conversor analógico – digital.....	27
Figura 2.8 - Métodos de leitura de saída a)quadro completo progressivo, b) transferência de quadro completo, c) transferência entrelinhar	30
Figura 2.9 - Estrutura de um CCD de iluminação frontal	30
Figura 2.10 - Estrutura de um CCD retro <i>iluminado</i>	31
Figura 2.11 - Comprimento de absorção do fóton no silício com função de comprimento de onda em nanômetros.....	32
Figura 2.12 - Eficiência quântica em função do comprimento de onda de iluminação frontal e retro iluminada CCD.....	33
Figura 2.13 - Estrutura do EMCCD	34
Figura 2.14 - Posição do registro de ganho.....	35
Figura 2.15 - Relação de fase 2 com ganho	36
Figura 2.16 - a) Transferência de carga de um elemento em um EMCCD, b) multiplicação de elétrons.....	37

Figura 2.17 - Gráfico da eficiência quântica de um EMCCD	37
Figura 2.18 - Estrutura da fase de um CCD para o qual os cálculos são executados. Deve-se a presença do alto campo elétrico na borda da região de barreira e então, multiplicação por avalanche pode acontecer. O elétron gerado por avalanche se moverá na direção x e a lacuna gerada na direção determinada por as forças em direções de $-x$ e z	40
Figura 2.19 - Fator de ganho g calculado para três taxas de ionização diferentes ..	41
Figura 2.20 - Fontes de luz predominantes em função da exposição de luz.	44
Figura 2.21 - Regiões de fontes de corrente no escuro no CCD.....	47
Figura 2.22 - Gráficos mostram: (acima) corrente de escuro de superfície (abaixo) corrente de escuro do corpo em um CCD com um pixel de $15\mu\text{m}$	47
Figura 2.23 - Curva típica de corrente de escuro	48
Figura 2.24 - Câmera típica para o CCD, dewar	50
Figura 2.25 - Recombinação e geração através de estados de banda média.....	51
Figura 2.26 - Histograma de uma imagem plana.....	53
Figura 2.27 - Geração de cargas espúrias	55
Figura 2.28 - Linearidade de um EMCCD	57
Figura 2.29 - Estrutura “reach-through” o qual oferece a melhor combinação para alta velocidade, baixo ruído e capacitância, e resposta até infravermelho .	59
Figura 2.30 - Diagrama da estrutura do APD	60
Figura 2.31 - Diagrama esquemático do processo de avalanche	62
Figura 2.32 - Corrente no escuro do apd.....	62
Figura 2.33 - Corrente de escuro em função da tensão reversa	63
Figura 2.34 - Circuito típico de conexão.	66
Figura 3.1 - Diagrama esquemático do <i>chip</i> CCD97 e2v-technologies,2004	67
Figura 3.2 - Diagrama das especificações físicas do fotodiodo de avalanche	68
Figura 3.3 - Resposta espectral típica do fotodiodo de avalanche 012-70-62-541 ...	69
Figura 3.4 - Câmara escura para medições no fotodiodo de avalanche	69

Figura 3.5 - Fonte de corrente variável. Seção somente para um led.....	70
Figura 3.6 - Câmera de teste com célula peltier	71
Figura 3.7 - a) desenho do testdewar , b) fotografia do desenho do testdewar	71
Figura 3.8 - Tampa da câmera	72
Figura 3.9 - Corpo da câmera do teste.....	72
Figura 3.10 - Câmera de teste com dedo frio	72
Figura 3.11 - Interior da câmera.....	73
Figura 3.12 - Recipiente de nitrogênio líquido e dedo frio.....	73
Figura 3.13 - Desenho e fotografia da câmara escura para a câmera do EMCCD para os testes.....	74
Figura 4.1 - Fonte de luz constante.	75
Figura 4.2 - Montagem para medir a estabilidade da luz constante.	76
Figura 4.3 - Intensidade luminosa para LED vermelho em função com o tempo. ...	77
Figura 4.4 - Intensidade luminosa para LED amarelo em função do tempo.	77
Figura 4.5 - Variação da corrente em função da posição do potenciômetro de controle	78
Figura 4.6 - Relação da tensão de referência com a corrente dos LEDs	78
Figura 4.7 - Relação da intensidade luminosa com a corrente de cada LED	79
Figura 4.8 - Medida da contagem de fótons em relação ao comprimento de onda e tempo de exposição para o LED vermelho a) para corrente $i=5\text{ma}$, b) para corrente $i= 4.37\text{ma}$, c) para corrente $i=\text{para } 3.78\text{ma}$, d) para corrente 2.55ma	80
Figura 4.9 - Medida da contagem de fótons em relação ao comprimento de onda e tempo de exposição para o LED amarelo. A) para corrente $i=1.77\text{ma}$, b) para corrente $i= 1.67\text{ma}$, c) para corrente $i=\text{para } 1.53\text{ma}$, d) para corrente 1.29ma	81
Figura 4.10 -Medida da contagem de fótons em relação ao comprimento de onda e tempo de exposição para o led verde, a) para corrente $i=4.5\text{ma}$, b) para corrente $i= 4.25\text{ma}$, c) para corrente $i=\text{para } 4.13\text{ma}$, d) para corrente 3.67ma	82

Figura 4.11 - Gráficos do led vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 0.9 s.	82
Figura 4.12 - Gráficos com regressão gaussiana do led vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda.	83
Figura 4.13 - Relação da contagem de fótons em função da corrente para o led vermelho com um tempo de exposição de 0,9 s.	83
Figura 4.14 - Gráficos do led verde da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 4.8 s.	84
Figura 4.15 - Gráficos com regressão gaussiana do led verde da contagem de fótons em função do comprimento de onda.	84
Figura 4.16 - Relação contagem de fótons em função da corrente para o led verde com tempo de exposição de 4.8 segundos.	85
Figura 4.17 - Gráficos do led amarelo da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 1.4 s.	85
Figura 4.18 - Gráficos com regressão gaussiana do led amarelo da contagem de fótons em função do comprimento de onda.	86
Figura 4.19 - Relação contagem de fótons em função da corrente para o led amarelo com um tempo de exposição de 1,4 s.	86
Figura 4.20 - Gráficos do led vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 0.75 s.	87
Figura 4.21 - Gráficos com regressão gaussiana do led vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda.	87
Figura 4.22 - Relação da contagem de fótons em função da corrente para o led vermelho 0.75 s.	88
Figura 4.23 - Gráficos do led amarelo da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 1.2 s.	88
Figura 4.24 - Gráficos com regressão gaussiana do led amarelo da contagem de fótons em função do comprimento de onda.	89
Figura 4.25 - Relação da contagem de fótons em função da corrente para o led amarelo 1.2 s	89

Figura 4.26 - Posição inicial da câmara para desarmar.	91
Figura 4.27 - Extração da tampa do <i>testdewar</i>	91
Figura 4.28 - Montagem do EMCCD na base e a placa eletrônica.	91
Figura 4.29 - Vista do EMCCD montado na câmara.	92
Figura 4.30 - Câmera de teste com nitrogênio líquido.	92
Figura 4.31 - Acople do dedo frio na câmara de teste.	93
Figura 4.32 - Montagem do sistema de teste refrigerado com nitrogênio líquido	93
Figura 4.33 - Montagem da câmara de teste refrigerada com célula peltier.	93
Figura 4.34 - Diagrama de blocos da montagem do sistema de teste para o emCCD	94
Figura 4.35 - Montagem do sistema de teste para o EMCCD.	95
Figura 4.36 - Montagem do sistema de teste para o fotodiodo de avalanche.	96
Figura 4.37 - Diagrama de blocos do sistema de teste para o fotodiodo de avalanche	96
Figura 5.1 - Circuito de polarização para o fotodiodo de avalanche	99
Figura 5.2 - Corrente no escuro em função da tensão aplicada.	99
Figura 5.3 - Representação gráfica do fenômeno da fotocorrente com dependência somente do resistor série a) resistor de 1mohm, b) resistor de 100kohm.	100
Figura 5.4 - Eficiência quântica experimental dos fotodiodos de avalanche em relação ao comprimento de onda com fator de multiplicação $m=1$ com potência luminosa 1.	104
Figura 5.5 - Eficiência quântica experimental dos fotodiodos de avalanche em relação ao comprimento de onda com fator de multiplicação $m=1$ com potência luminosa 2.	105
Figura 5.6 - Valores da foto corrente com diferentes comprimentos de onda para ref 155	106
Figura 5.7 - Valores da foto-corrente com diferentes comprimentos de onda para ref 155	107

Figura 5.8 - Resposta do fotodiodo de avalanche com duas potências a) cor amarelo ref. 155, b) cor amarelo ref. 193, c) cor vermelho ref. 155, d) cor vermelho ref. 193, e) cor verde ref. 193, f) cor verde ref. 193.	108
Figura 5.9 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 193 com potência luminosa 2.....	109
Figura 5.10 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 155 com potência luminosa 2.....	110
Figura 5.11 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 155 com potência luminosa 2. Método experimental	112
Figura 5.12 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 193 com potência luminosa 2. Método experimental	112
Figura 5.13 - Corrente no escuro $t=27^{\circ}c$	113
Figura 5.14 - Corrente no escuro em relação com o fator de multiplicação para o fotodiodo de ref. 155	114
Figura 5.15 - Corrente no escuro em relação com o fator de multiplicação para o fotodiodo de ref. 193	114
Figura 5.16 - Método gráfico para encontrar a corrente de joelho. Resposta do fotodiodo com polarização direta (adaptado de getreu, 1976)	117
Figura 5.17 - Resposta do fotodiodo de avalanche ref 193 em polarização direta .	118
Figura 5.18 - Assíntotas indicando em a) corrente de alta injeção e b) corrente de baixa injeção para o fotodiodo de avalanche 193	118
Figura 5.19 - Resposta do fotodiodo de avalanche ref 155 em polarização direta .	119
Figura 5.20 - Assíntotas indicando a corrente de alta e baixa injeção para o fotodiodo de avalanche 155	119
Figura 5.21 - Tensões de saída no emCCD para o led vermelho para diferentes valores de corrente.....	121
Figura 5.22 - Tensões de saída no emCCD para o led amarelo para diferentes valores de corrente.....	121
Figura 5.23 - Tensões de saída no CCD para o led verde para diferentes valores de corrente	122
Figura 5.24 - Tensões de saída no CCD para cada cor do led.....	122
Figura 5.25 - Variação da tensão de saída do emCCD em função da quantidade de fótons incididos para o led amarelo.....	123

Figura 5.26 - Variação da tensão de saída do emCCD em função à quantidade de fótons incididos para o led vermelho	123
Figura 5.27 - Linearidade do emCCD.....	124
Figura 5.28 - Ganho do emCCD na saída amplificada em função a intensidade luminosa aplicada com uma tensão constante.....	126
Figura 5.29 - Corrente no escuro em adus em função da temperatura do dispositivo emCCD	127
Figura 5.30 - Corrente no escuro em e ⁻ /pixel/segundo em função da temperatura do dispositivo emCCD.....	128

SUMARIO

INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo.....	18
1.2 Estrutura do trabalho	20
2 PROPRIEDADES DOS DISPOSITIVOS DE ACOPLAMENTO DE CARGAS COM MULTIPLICAÇÃO DE ELÉTRONS.	22
2.1 Dispositivo por acoplamento de cargas CCD.....	22
2.1.1 Princípio de funcionamento	25
2.1.2 Métodos de leitura da saída.....	28
2.1.2.2 Transferência de quadro completo	29
2.1.2.3 Transferência entrelinha	29
2.1.3 CCD de iluminação frontal (Thick front-side illuminated CCDs).....	30
2.1.4 CCD Retro iluminado (Thin back-side illuminated CCDs).....	31
2.1.5 Eficiência quântica	31
2.2 EMCCD- Multiplicação de elétrons em dispositivos de acoplamento de carga	33
2.2.1 Registro de multiplicação de ganho	35
2.2.2 Ruptura por avalanche.....	38
2.2.3 Taxa de ionização.....	38
2.2.4 Multiplicação por avalanche.....	39
2.2.5 Ruídos	42
2.2.5.1 Ruído fixo padrão (Fixed Pattern Noise) – N_f	42
2.2.6 Ruído no EMCCD	44
2.3 Corrente de escuro	46
2.3.1 Medida da corrente de escuro	50
2.3.2 Geração e recombinação.....	51
2.4 Ganho	52
2.5 Ruído de leitura de saída	53
2.6 Carga induzida pelo relógio (CIC).....	54
2.6.1 Cargas espúrias.....	55
2.7 Linearidade	57
2.8 Eficiência da carga transferida.....	58
2.9 Fotodiodo de Avalanche (APD).....	58
2.9.1 Estrutura do fotodiodo de avalanche	59
2.9.2 Princípio da multiplicação por avalanche no fotodiodo de avalanche.....	60
2.9.3 Corrente no escuro em função a tensão reversa	62
2.9.4 Ganho em função da tensão reversa.....	63
2.9.5 Ruído	64
2.9.6 Circuito de conexão	65

3	SISTEMA DE TESTE	67
3.1	EMCCD.....	67
3.2	Fotodiodo de avalanche.....	68
3.3	Fonte luminosa de intensidade constante.....	69
3.4	Câmara do EMCCD com célula Peltier, TESTDEWAR	70
3.5	Câmara de teste com dedo frio.....	72
3.6	Câmara escura	73
4	ENSAIOS NO SISTEMA DE TESTE DOS FOTODETECTORES ...	75
4.1	Montagem dos componentes.....	75
4.1.1	Montagem da fonte de luz constante	75
4.1.2	Montagem do EMCCD na câmara	90
4.1.2.1	Diagrama da montagem do sistema de teste do EMCCD	94
4.1.3	Montagem do sistema de teste para o fotodiodo de avalanche	95
4.1.3.1	Diagrama de blocos.....	96
5	CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE MULTIPLICAÇÃO DE ELÉTRONS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	98
5.1	Caracterização do fotodiodo de avalanche.....	98
5.1.1	Medições das características primordiais do fotodiodo de avalanche	100
5.1.1.1	Medição da Responsividade.....	102
5.1.1.2	Medição da eficiência quântica.....	103
5.1.1.3	Porcentagem de incerteza.....	104
5.1.1.4	Fenômeno de Avalanche.....	106
5.1.1.5	Medição do fator de multiplicação	108
5.1.1.6	Corrente no escuro	113
5.1.1.8	Conexão do fotodiodo em polarização direta	116
5.2	Medições com fotodetector EMCCD	120
5.2.1	Sinal elétrico na saída do EMCCD sem amplificação.....	120
5.2.2	Linearidade	124
5.2.3	Ganho	125
5.2.4	Corrente no escuro	126
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS	129
6.1	Trabalhos futuros	131

INTRODUÇÃO

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento de um sistema especificado para realizar os testes na caracterização de dispositivos fotodetectores como fotodiodos de avalanche. A tecnologia da multiplicação dos elétrons em dispositivos CCD e diodos de avalanche têm aplicações importantes na vigilância de ambientes de luminosidade reduzida, astronomia, além de outras aplicações de imagens científicas, incluindo as de baixo nível de bioluminescência para identificação de drogas, e aplicações da engenharia genética (JERRAM, 2006). Os resultados obtidos são úteis na detecção de sinais luminosos ultrafracos, minimizando o ruído do detector na aquisição de imagens a partir de um instrumento contendo um filtro óptico sintonizável que será integrado no telescópio SOAR de 4 metros, instalado no Chile, para observações melhoradas com óptica adaptativa.

Além disso, é apresentado o desenvolvimento de um sistema para realizar os testes de caracterização das propriedades de dispositivos fotodetectores como fotodiodos de avalanche e dispositivos de acoplamento de cargas (EMCCD), cujo princípio da multiplicação de elétrons é baseado no fenômeno de ionização por impacto ou avalanche (HOLST, 2007).

Os dispositivos ópticos apresentam uma variação muito grande em suas características de desempenho, até mesmo em relação àquelas que constam em suas folhas de dados. Por essa razão existe a necessidade de medirem-se as propriedades óticas e elétricas para cada dispositivo, pois os gráficos de propriedades fornecidos pelos fabricantes são muito genéricos, de forma que às vezes não é especificado o verdadeiro desempenho do dispositivo ótico.

Nas medições serão caracterizadas duas classes de dispositivos ópticos: um fotodiodo de avalanche (APD) e um dispositivo por acoplamento de cargas com multiplicação de elétrons (EMCCD). Esses dispositivos ópticos têm uma característica similar: obter um ganho da foto corrente pela multiplicação de elétrons, processo baseado no fenômeno da ionização por impacto, ou também denominada multiplicação por avalanche (TATE, 2006).

O dispositivo por acoplamento de cargas ou **CCD** (*charge-coupled device*) foi inventado por Williard S. Boyle e George E. Smith nos laboratórios da Bell Telephone (BOYLE; SMITH, 1970). O CCD é um dispositivo idealizado nos seus primórdios como elemento de memória digital armazenando cargas elétricas. A partir da constatação da possibilidade da transferência de cargas elétricas pelo efeito fotoelétrico foi ampliada a sua utilização como dispositivo para captura de imagens (FELLERS; DAVIDSON, 2006; HAMAMATSU, 2003).

O que começou como uma demonstração de um pixel de transferência de carga entre as três portas de metal em uma superfície de óxido de silício evoluiu para dispositivos tão grandes como 66 Megapixels preenchendo só uma lâmina de silício de 150-milímetros (JANESICK, 2001).

Os fotodiodos de avalanche são construídos de forma a incluírem uma região de campo elétrico elevado, que irá acelerar os fotoportadores até uma velocidade suficiente para que as colisões com átomos produzam novos portadores. Estas partículas criadas por ionização são aceleradas por este campo elétrico, dando continuidade ao processo de avalanche. (HAMAMATSU, 2004) Assim, os APD multiplicam (amplificam) internamente a corrente fotodetectada primária.

Para a caracterização de um dispositivo de acoplamento de carga não é necessário buscar objetos ou objetivos astronômicos, só precisa-se ter um sistema de teste com intensidade luminosa e temperatura controlada, com a capacidade de gerar quadros escuros e planos. Um quadro escuro é onde o EMCCD é exposto durante períodos na faixa de milissegundos e segundos, com o obturador fechado, ou a aquisição da imagem é feita em um lugar totalmente escuro para que o detector não capture nenhum tipo de luz. O quadro plano é onde o detector é iluminado e focado a um campo luminoso constante, onde todos os fótons emitidos alcancem toda a área sensível de forma uniforme no detector (HOWELL, 2006, p 78).

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é avaliar o desempenho dos dispositivos fotodetectores com tecnologia de multiplicação de elétrons, para

caracterizar os parâmetros mais significativos no processo da transdução óptica de modo a colaborar no projeto da eletrônica embarcada de controle e leitura da informação contida no EMCCD.

Para atingir-se esse objetivo é necessário:

- Desenvolver uma infra-estrutura adequada para o controle da temperatura de operação do EMCCD, para efeito de avaliação do desempenho do sistema fotodetector.

Avaliar as propriedades e características no funcionamento ótimo dos fotodetectores: fotodiodo de avalanche e o EMCCD, e comparar com os dados fornecidos pelo fabricante.

Elaborar um sistema de ensaios para colaborar com a caracterização da foto detecção em dispositivos de acoplamento de cargas com multiplicação de elétrons (EMCCD).

O desenvolvimento da caracterização e desempenho dos dispositivos fotodetectores é dividido em duas etapas:

1ª etapa:

Construir uma fonte luminosa controlada para o dispositivo detector em teste; instalar um sistema de teste composto principalmente por uma câmara de teste e uma câmara escura para realizar uma caracterização e otimização do dispositivo fotodetector; estabelecer um conjunto de testes e obter dados para realizar a caracterização. Os dispositivos fotodetectores são caracterizados com duas opções de esfriamento: uma utilizando uma montagem com células Peltier e outra feita por criogenia com nitrogênio líquido.

2ª etapa:

Executar uma caracterização do fotodetector no laboratório e comparar os resultados com dados do fabricante e de outros grupos de pesquisa.

Caracterizar-se-ão e serão comparadas com as especificações do fabricante as seguintes propriedades:

EMCCD

- Ganho das cargas do dispositivo fotodetector;
- Corrente de escuro (*Dark Current*) e sua dependência com a temperatura;
- Ruído na leitura de saída (*Readout noise*);
- Linearidade.

FOTODIODO DE AVALANCHE

- Ganho das cargas do dispositivo fotodetector;
- Corrente de escuro (*Dark Current*);
- Eficiência quântica;
- Responsividade (*responsivity*).

1.2 Estrutura do trabalho

O texto desta pesquisa está organizado em 6 capítulos, conforme a seguinte estrutura:

O capítulo introdutório contém de maneira concisa uma descrição dos objetivos e a justificativa para o desenvolvimento deste trabalho e finalmente a organização do texto como um todo.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura dos fundamentos teóricos na parte de funcionamento, composição, tipos e características principais do desempenho do fotodiodo de avalanche, CCD e EMCCD. Além disso é incluída uma abordagem teórica da metodologia na aquisição dos dados para obter as propriedades mais relevantes na caracterização dos dispositivos de acoplamento de cargas.

No terceiro capítulo são descritas as especificações dos dispositivos CCD e APD para caracterizar, a conformação e descrição dos elementos inclusos no sistema de

teste; como são as câmeras escuras, circuitos eletrônicos, fonte de luz constante e sistema de esfriamento.

No quarto capítulo são mostrados e discutidos os diferentes resultados experimentais obtidos no funcionamento, a estabilidade térmica e luminosa do sistema de teste e procedimentos, e precauções da montagem dos dispositivos EMCCD e fotodiodo de avalanche em sua respectiva câmera.

O quinto capítulo apresenta os resultados das propriedades relacionadas com a caracterização do fotodiodo de avalanche e EMCCD montados no sistema de teste. Finalmente se apresentam as discussões, argüições e comparações com dados do fabricante e trabalhos semelhantes publicados na literatura em relação aos resultados obtidos neste projeto de pesquisa.

O sexto capítulo apresenta uma análise conclusiva da pesquisa, assim como propostas para trabalhos futuros que complementem e melhorem os resultados obtidos nesta pesquisa.

2 PROPRIEDADES DOS DISPOSITIVOS DE ACOPLAMENTO DE CARGAS COM MULTIPLICAÇÃO DE ELÉTRONS.

Na caracterização de dispositivos por acoplamento de cargas é necessário estudar algumas propriedades que influem no ótimo funcionamento na aquisição de informação. Neste capítulo são descritos os fundamentos dessas propriedades para CCDs e APDs.

2.1 Dispositivo por acoplamento de cargas CCD

O CCD refere-se a uma arquitetura semicondutora na qual a carga é transferida através das áreas de armazenamento. A arquitetura do CCD tem três funções básicas: coleta das cargas, transferência das cargas e a conversão da carga a um valor de tensão mensurável (HOLST; LOMHEIN, 2007).

O controle da aquisição e transferência das imagens dentro do dispositivo é feito por um circuito eletrônico externo, onde cada fotodiodo pode transferir sua carga elétrica para outro fotodiodo vizinho. Os CCDs são usados em fotografia digital, imagens de satélites, equipamentos médico-hospitalares e na astronomia (particularmente em fotometria, óptica e espectroscopia UV e técnicas de alta velocidade) (PAWLEY, 2006, p 918-931).

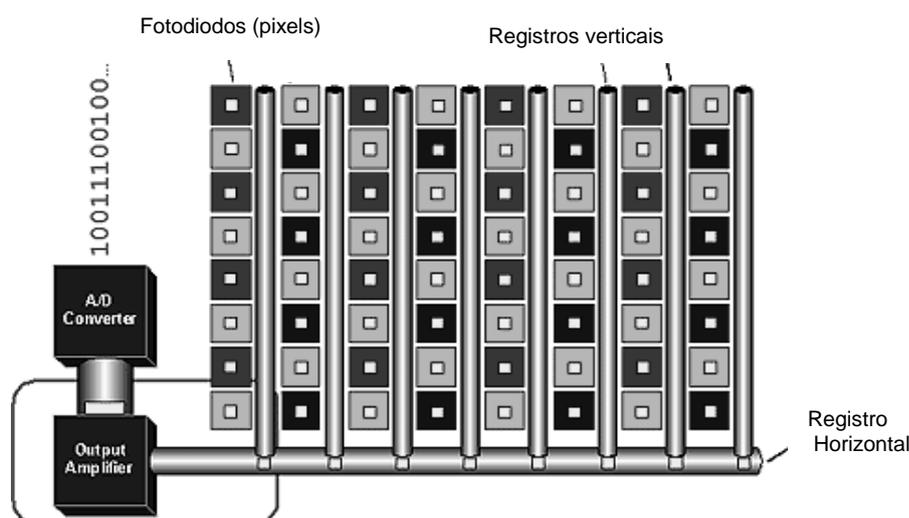


Figura 2.1 - Estrutura geral do CCD. (Adaptado de AXIS-COMMUNICATIONS)

A capacidade de resolução da imagem depende do número de células fotoelétricas do CCD, e esse número é expresso em *pixels*. Quanto maior for o número de *pixels*, maior é a resolução da imagem. Atualmente há câmeras científicas que incorporam CCDs com capacidades de até 1.4 Gigapixels (CHANDLER, 2008).

No silício, um fóton qualquer que passa através das camadas superficiais e é absorvido, produz um fotoelétron originando o processo denominado “fotodeteção”. O silício é um material com uma alta sensibilidade à radiação luminosa, portanto tem uma boa capacidade de resposta e detecção aos comprimentos de onda visíveis compreendidos na faixa de 400 até 700 nanômetros (HOWELL, 2006).

Os dispositivos por acoplamento de carga para a aquisição de uma imagem necessitam de uma tensão na forma de pulsos seqüenciais. Esses pulsos são sinais do tipo quadrado sobre cada uma das fases para controlar a transferência da carga dentro do CCD. Permitindo assim aos fotodiodos capturar “pacotes” de elétrons e transferi-los de uma seção nomeada de “imagem” para outra seção denominada de “leitura” para o CCD convencional, ou, “salvamento” para o EMCCD (FELLERS; DAVIDSON, 2006; AKIRA; TAKAHASHI, 2001).

O *chip* do CCD apresenta um desempenho maior e uma melhor operação em temperaturas reduzidas, motivo pelo qual normalmente é associado um dissipador de calor ao *chip* para diminuir a temperatura de trabalho. Os modelos de CCD mais avançados para aplicações científicas precisam de refrigeração com vácuo e nitrogênio líquido, diminuindo a corrente no escuro, de forma a melhorar a qualidade da imagem (BAUTZ, 1997; CUMANI, 2004).

Externamente o *chip* tem uma apresentação como um microcircuito de poucos milímetros de espessura, onde a estrutura de silício é soldada no fundo do dispositivo e protegida por uma janela de vidro óptico de boa qualidade.

A estrutura convencional da área do CCD é dividida em linhas e colunas que compõem os *pixels* com dimensões de aproximadamente 4 x 4µm até 24 x 24µm.

O registro vertical é representado pelas colunas, cuja função é a transferência das cargas fotoinduzidas em forma descendente até o registro horizontal. Pixels ao longo de cada linha são separados por faixas verticais numa organização como a descrita na figura 2.2

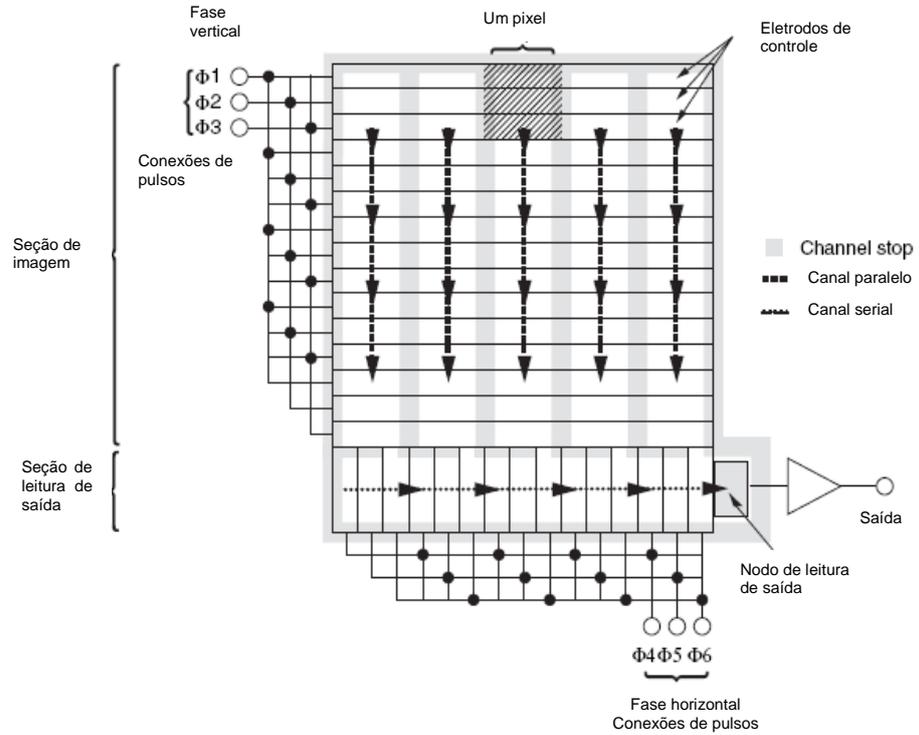


Figura 2.2 - Estrutura básica de um CCD (Adaptado de PAWLEY 2006).

Na figura 2.3a, 2.4, é mostrado o esquema da estrutura das portas para se formar um pixel, e a figura 2.3b apresenta a seção transversal de um CCD.

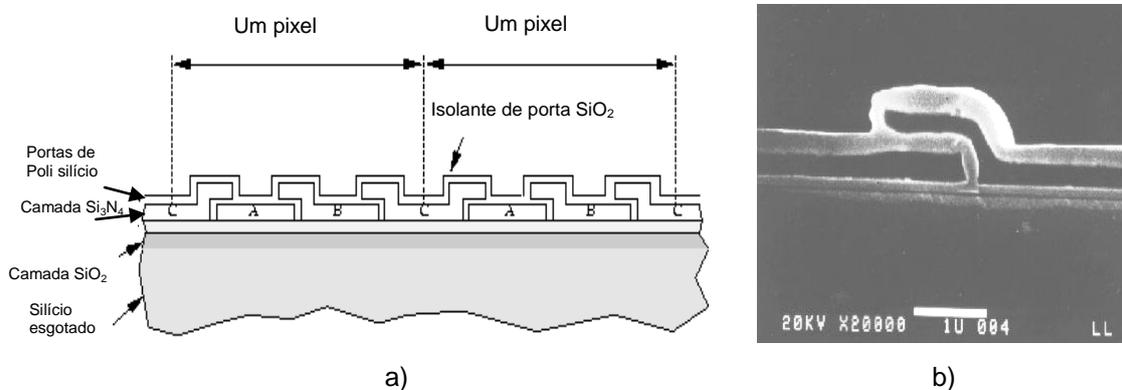


Figura 2.3 – a) Estrutura da porta de um CCD , b) Estrutura mostrando a superposição das portas (BAUTZ,1997; FUJIWARA; TAKAHASHI, 2001).

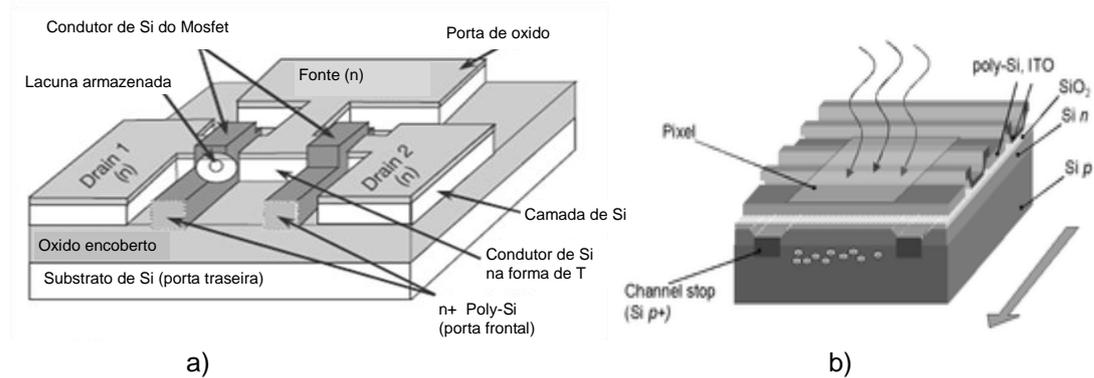


Figura 2.4 – a) armazenameto de uma carga em um pixel, b) Estrutura do um pixel no CCD (FUJIWARA; TAKAHASHI, 2001).

As dimensões mais comuns da estrutura do detector CCD são (FUJIWARA; TAKAHASHI, 2001; HOLST; LOMHEIN, 2007)

- Espessura do condutor de silício = 15 a 20 nanômetros;
- Espessura da porta (Gate) óxido = 35 a 40 nanômetros;
- Porta do silício policristalino (Poly Si gate) = 90 nanômetros de comprimento;

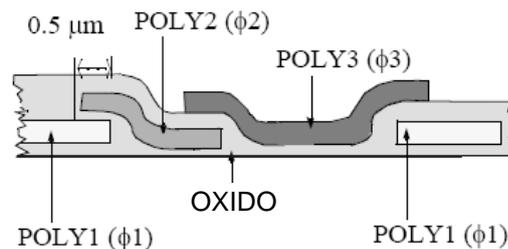


Figura 2.5- Distribuição das camadas na estrutura de CCD (FUJIWARA; TAKAHASHI, 2001).

2.1.1 Princípio de funcionamento

O funcionamento do CCD é associado ao efeito fotoelétrico, o que para o processamento das imagens, estabelece uma metodologia na interpretação da informação das cargas geradas dentro de um pixel. Os fótons incididos sobre um pixel feito de silício são facilmente absorvidos, caso possuam o correto comprimento de onda ou energia necessária para vencer a banda proibida do silício. O silício tem uma banda proibida de energia de 1,12 elétron volts (eV), e portanto absorve facilmente a energia da luz de 1,12 a 4,1 eV (1100 a 300 nm). A energia de um fóton (eV) para um determinado comprimento de onda (λ) pode ser calculado na equação 2.1 (HOWELL, 2006, p. 9-10).

$$E(eV) = \frac{1240}{\lambda(nm)} \quad (2.1)$$

A absorção dos fótons no silício causa a liberação de um elétron da banda valência e esse elétron é movido dentro da banda de condução. A figura 2.6 mostra a captura e acumulação dos fótons dentro de um dispositivo de acoplamento de cargas

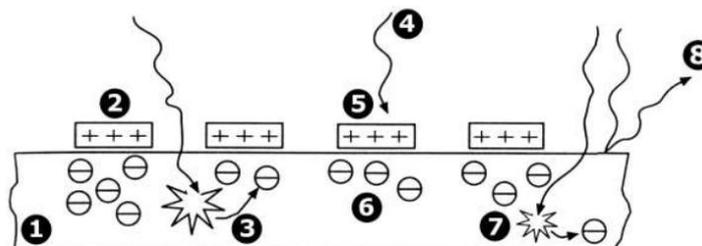


Figura 2.6 - Captura e acumulação da luz num detector CCD. 1- Placa de silício, 2- eletrodos, 3- fóton que gera um elétron capturado, 4- fótons incidentes, 5- fóton absorvido pelo eletrodo, 6- elétrons capturados, 7- fóton que gera um elétron perdido, 8- fóton refletido. (Ré, 2005).

Cada pixel tem estruturas onde são aplicadas tensões sobre um eletrodo denominado porta. Essas estruturas proporcionam em cada pixel a capacidade de recolher elétrons liberados e armazenar-los em um poço potencial nas proximidades dos eletrodos até o final da exposição.

Em um arranjo típico cada pixel tem associado a ele três portas, e em cada uma das quais pode ser aplicada um valor de tensão diferente. As tensões são controladas por circuitos temporizados onde cada terceira porta é conectada ao mesmo sinal de relógio. A figura 2.7 ilustra um esquema típico da temporização das três fases do dispositivo.

Observa-se na figura 2.7 que, depois de uma exposição, as tensões da temporização são manipuladas de modo que os elétrons que têm sido reunidos e mantidos em cada pixel com 10 volts no poço de potencial pela tensão de temporização **V3**, agora podem ser movidos dentro do dispositivo. Nota-se que os elétrons gerados em qualquer lugar dentro de um pixel durante a exposição serão forçados a migrar em direção ao fundo do poço de potencial (onde a área da superfície de cada pixel é igual à área total de todas as três portas).

Quando a exposição é terminada e a leitura do CCD começa, as tensões aplicadas a cada porta são cíclicas (este processo é denominado temporização do dispositivo). Por conseguinte a carga armazenada em cada pixel durante a integração é eletronicamente transferida. Uma simples mudança nos valores das tensões (**V3**

muda para 5 volts, enquanto V_1 passa a 10 volts e assim por diante), permite à carga seja transladada de forma serial ao longo das colunas do CCD, de um pixel para outro pelo arranjo todo.

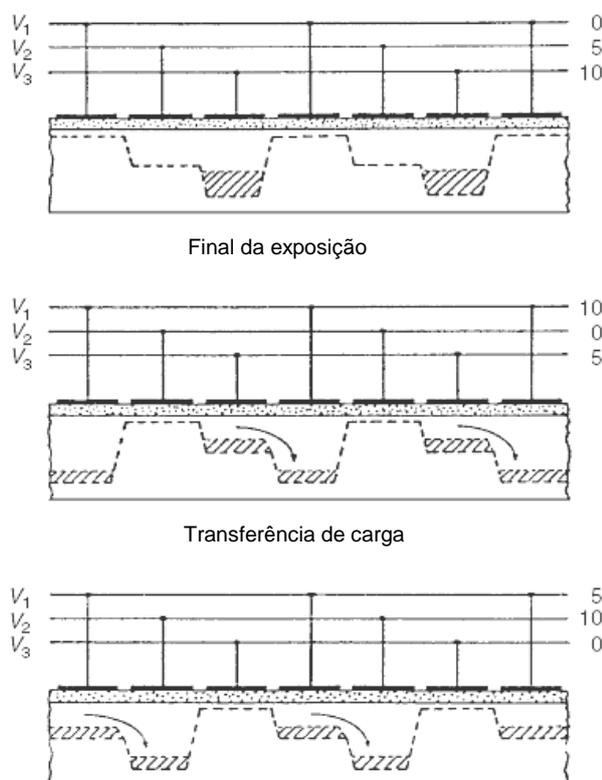


Figura 2.7 - Diagrama da operação da tensão de um típico CCD de três fases. As tensões da temporização são mostradas a três vezes durante o processo de leitura de saída, indicando seu ciclo de temporização de 0, 10, e 5 volts. Um ciclo de temporização causa o armazenamento da carga dentro de um pixel e é transferido este pacote de carga a um pixel vizinho. A leitura do CCD continua até que todos os pixels tenham sua carga transferida completamente fora do arranjo e são enviados para o conversor analógico – digital. (Walker 1987)

Cada coluna no arranjo é conectada em paralelo e desse modo a carga presente sobre cada pixel é movida simultaneamente através do arranjo todo. Um ciclo da temporização move as cargas de cada linha de pixels à coluna seguinte, iniciando-se com a linha superior, que é deslocada até fora do arranjo, o que é denominado registro de deslocamento de saída ou registro de deslocamento horizontal. Este registro é apenas outra linha de pixels ocultos da luz incidente e serve como transição entre as linhas ativas sobre o arranjo e a saída do dispositivo.

Logo que uma linha inteira é deslocada dentro do registro de saída, a mesma é enviada à saída eletrônica ao mesmo tempo em que acontece um novo deslocamento sobre uma linha da área ativa do dispositivo detector. Na saída eletrônica a carga coletada dentro de cada pixel é detectada e amplificada por um

amplificador de saída. Os amplificadores de saída dos CCDs são designados para ter um baixo ruído e são construídos diretamente dentro dos circuitos do silício. Esses amplificadores operam a tensões muito baixas e sua sensibilidade tem valores típicos na faixa de 0,5 a 4 μ volts por elétron.

A tensão da saída gerada pelo pixel é convertida em um número digital, que é tipicamente denominado ADU (unidades analógico a digital, *analog to digital units*). A quantidade de tensão necessária para produzir 1 ADU é nomeada ganho do dispositivo. Um ganho típico é 10 elétrons/ADU, o que significa. Que, para cada 10 elétrons coletados dentro de um pixel, a saída proveniente de cada pixel produzirá uma média de 1 ADU (HOWELL, 2006, p. 12).

A conversão da saída do sinal da tensão a um número digital é feita dentro de um dispositivo denominado conversor analógico a digital (*A/D ou ADC*). Os números digitais da saída usualmente são armazenados em um computador para um processamento posterior.

Cada transferência da carga (que ocorre uma vez a cada mudança de tensão ou ciclo de temporização) tem uma eficiência associada. Essa eficiência é a porcentagem da carga transferida comparada com a carga coletada. Dispositivos modernos apresentam uma eficiência de transferência da carga (*charge transfer efficiency – CTE*) de 99.9999% por cada transferência. (HOWELL, 2006, p. 11)

2.1.2 Métodos de leitura da saída

Nos dispositivos por acoplamento de cargas existem fundamentalmente três métodos para realizar a leitura da saída do conjunto das cargas coletadas: transferência de quadro completo, transferência de quadro completo progressivo e transferência entrelinhas.

2.1.2.1 Transferência do quadro completo progressivo

A leitura provém de uma longa área sensível, onde uma imagem é capturada e transferida de forma imediata para o registro horizontal ou de saída. Apresenta um

nível de baixo ruído de leitura na saída e maior precisão fotométrica. Este método apresenta algumas desvantagens, sendo que a mais relevante é o dispositivo detector não conseguir coletar e fazer a leitura do sinal ao mesmo tempo, figura 2.8 seção **a** (James B, 2006; Holst, 2007).

2.1.2.2 Transferência de quadro completo

O conjunto total da carga equivalente a uma imagem é rapidamente transferido por acoplamento das cargas a um segundo depósito 2D, (arranjo de armazenamento). O depósito tem o mesmo tamanho que o arranjo do sensor ou área sensível (*sensor array*) e é localizado próximo à área ativa do CCD, e também é fisicamente mascarado com um metal evaporado e blindado à luz, mostrado na figura 2.8 seção **b**. Esse tipo de transferência apresenta uma vantagem: um conjunto de carga ou imagem é enviado à saída do depósito 2D para ser amplificado, ao mesmo tempo em que a área do sensor coleta uma nova imagem. (HOLST, 2007).

2.1.2.3 Transferência entrelinha

As seções de armazenamento e leitura são entrelaçadas entre as áreas sensíveis à luz do sensor (cada pixel é dividido em áreas de detecção e áreas de leitura), depois da exposição os pacotes de carga equivalentes à imagem podem ser movidos para um arranjo de leitura de saída em um tempo menor do que 1 microssegundo, mostrado na figura 2.8 seção **c**.

Esse movimento das cargas pode ser usado como um obturador eletrônico para eliminar as manchas na seção vertical, onde pelo menos a metade de cada pixel deve ser mascarada, e em algumas ocasiões uma parte da informação da luz é perdida, diminuindo o fator de abastecimento e proporcionalmente reduzindo a eficiência quântica.

O fator de abastecimento é a fração da superfície efetivamente sensível à luz. A solução para a diminuição do fator de abastecimento é colocar uma micro-lente sobre cada pixel permitindo um maior foco sobre a área da imagem sem máscara (ou área sensível do sensor) (PAWLEY, 2006).

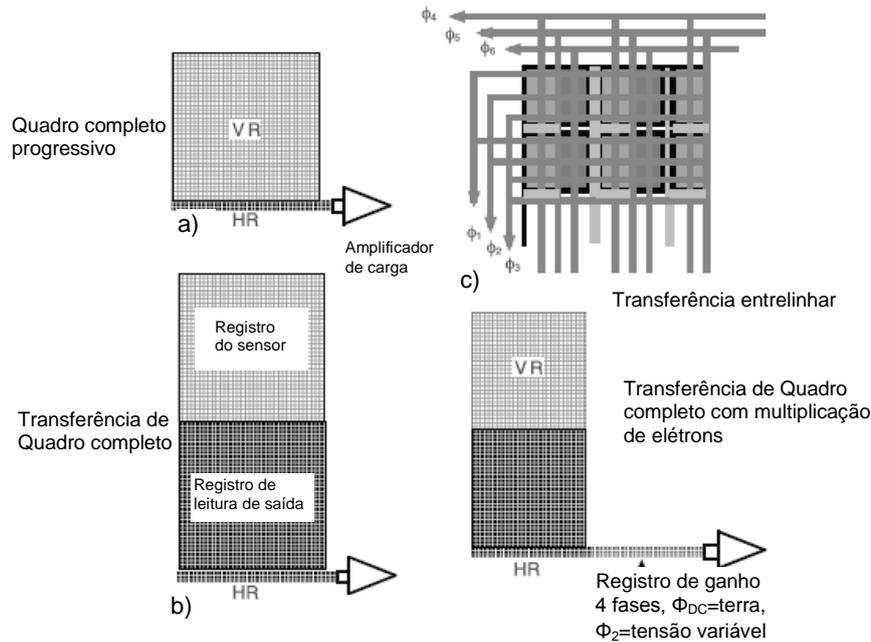


Figura 2.8 - Métodos de leitura de saída a) Quadro completo progressivo, b) Transferência de quadro completo, c) Transferência entrelinhar (Adaptado de PAWLEY, 2006)

Os CCD são construídos principalmente em dois grandes tipos de estruturas: CCD de iluminação frontal e CCD retro-iluminado, que estão descritos a seguir:

2.1.3 CCD de iluminação frontal (Thick front-side illuminated CCDs)

Esta classe de estrutura apresenta uma camada receptora refletiva em frente da camada do silício e tem as seguintes características: (figura 2.9) (CUMANI,2004).

- Baixa eficiência quântica (baixa reflexão e absorção da luz nos eletrodos da superfície).
- Não é possível uma camada anti-refletiva (pela estrutura do eletrodo).
- São mais sensíveis ao verde, vermelho e a infravermelho (comprimentos de onda entre 500 e 800 nm); e têm resposta pobre à tonalidade azul (400-500 nm).

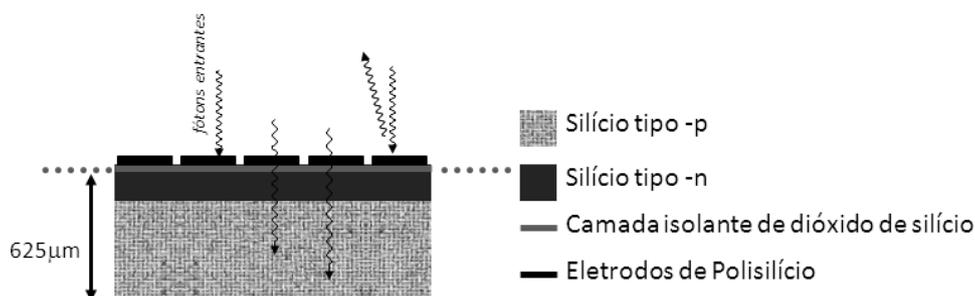


Figura 2.9 - Estrutura de um CCD de iluminação frontal (Adaptado de CUMANI, 2004).

2.1.4 CCD Retro iluminado (Thin back-side illuminated CCDs)

A camada receptora apresenta-se por trás das camadas do silício tipo p e n, melhorando a eficiência do dispositivo. Igualmente apresenta as seguintes características principais: (figura 2.10) (CUMANI, 2004)

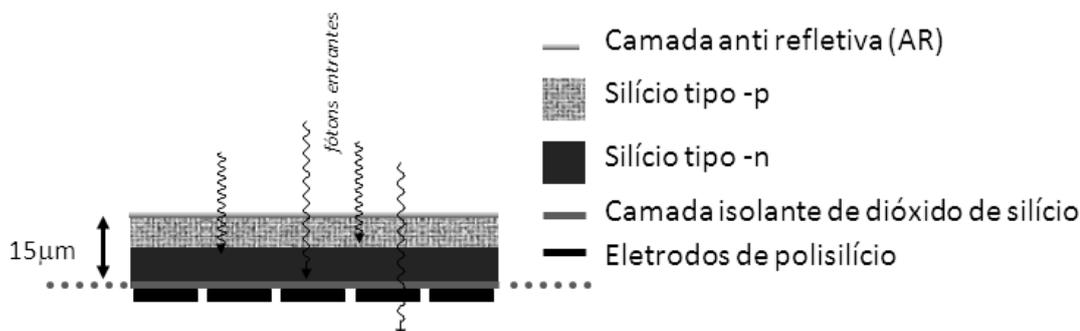


Figura 2.10 - Estrutura de um CCD retro iluminado. CUMANI, 2004

- Silício quimicamente gravado e polido a uma espessura de poucos micra (15 μm).
- A luz entra da parte traseira e desse modo os eletrodos não obstruem os fótons. A eficiência quântica pode aproximar-se a 100%.
- Torna-se transparente à luz infravermelha e tem resposta pobre ao vermelho.
- A resposta pode ser incrementada pela aplicação de uma camada anti-refletiva sobre a superfície traseira.

2.1.5 Eficiência quântica

A eficiência quântica é a medida da efetividade em produzir uma carga eletrônica com respeito à energia incidente. Quando um fóton incide no CCD, pode gerar no máximo um elétron (fotoelétron) por cada elétron incidente. Se cada vez que incide um fóton gera um fotoelétron, a eficiência quântica (QE) é de 100%. Na prática esta eficiência quântica não existe porque a energia do fóton para liberar um elétron nem sempre é a suficiente (HOWELL, 2006).

O silício, na estrutura de bandas, tem uma banda proibida típica de 1,12 eV. Um fóton incidente precisa de uma energia maior para liberar um elétron de seu enlace, (produzir um elétron). Caso o fóton incidente não tenha a energia necessária, o mesmo não terá nenhum efeito. A eficiência quântica depende de uma variedade de fatores incluindo as camadas, espessura do arranjo, espessura das portas, e as

tensões no poço do CCD. (HOLST; LOMHEIN, 2007; HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003)

A absorção e reflexão pelas coberturas dos eletrodos do CCD reduzem a eficiência quântica e é necessário aplicar camadas anti-refletivas, ou em alguns casos colocar micro-lentes para aumentar o foco do pixel e dessa maneira aumenta a eficiência quântica do dispositivo detector.

O CCD em sua construção e composição é essencialmente silício, que deste modo é o elemento responsável pela resposta do detector a diferentes comprimentos de onda de luz. A dependência dos comprimentos de onda pode ser observada pela figura 2.11. Essa figura mostra o comprimento de silício necessário para que um fóton seja absorvido para um comprimento de onda específico (HOWELL, 2006).

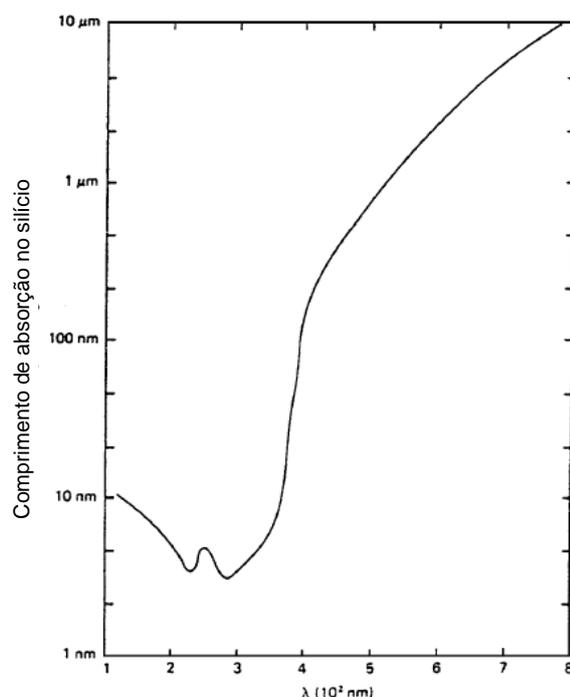


Figura 2.11 - Comprimento de absorção do fóton no silício com função de comprimento de onda em nanômetros. (Adaptado de HOWEL, 1994).

O comprimento de absorção é definido como a distância necessária pelo qual 63% dos fótons incididos sejam absorvidos. A figura 2.11 mostra que nos comprimentos de onda da luz fora da faixa de 3.50 a 0.8 nanômetros, os fótons: 1) passam direto através do silício, 2) são absorvidos dentro das finas camadas superficiais, ou 3) simplesmente são refletidos para fora da estrutura do CCD. (HOWELL, 2006, p. 37)

Nos comprimentos de onda curtos, 70% ou mais dos fótons são refletidos, e para comprimentos de onda muito curtos (também para longos comprimentos de onda) o CCD torna-se completamente transparente. Deste modo, a eficiência quântica de um CCD convencional pode ser aproximada à curva de absorção dos fótons no silício.

A figura 2.12, mostra a eficiência quântica geral dos detectores CCD, onde o CCD retro-iluminado apresenta uma melhor resposta a diversos comprimentos de onda, permitindo uma boa aquisição da imagem sem ruído e com alta resolução (RÉ, 2005).

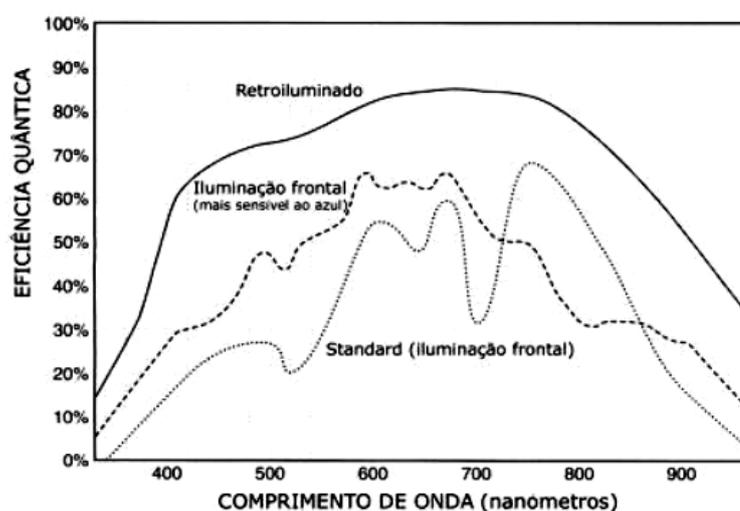


Figura 2.12 - Eficiência quântica em função do comprimento de onda de iluminação frontal e retro iluminada CCD. (RÉ, 2005).

2.2 EMCCD- Multiplicação de elétrons em dispositivos de acoplamento de carga

A tecnologia EMCCD (*Electron multiplying charge coupled device*) permitiu o desenvolvimento de um detector digital para aplicações científicas no ano 2000, pela empresa Andor Technology. EMCCD é uma nova tecnologia capaz de detectar eventos provocados por um único fóton, mantendo uma alta eficiência quântica. Isto é possível pela única estrutura de multiplicação construída e adicionada dentro do sensor.

EMCCD é um dispositivo onde a detecção dos fótons desde uma fonte luminosa de interesse é amplificada pela ionização por impacto dos elétrons, sem comprometer a eficiência quântica e as características da resolução de um CCD convencional (onde a eficiência quântica deve ter um valor próximo de $\eta = 90\%$).

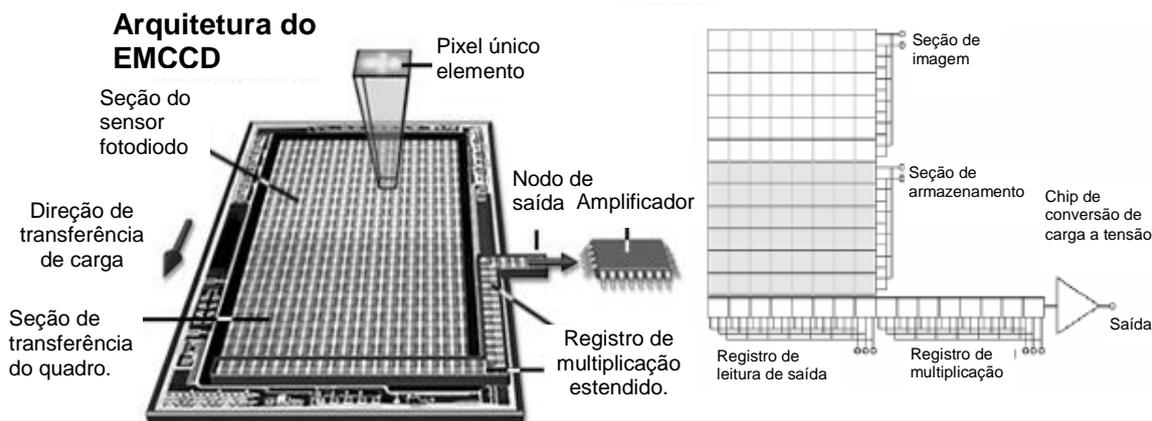


Figura 2.13 - Estrutura do EMCCD (Adaptado de FELLERS; DAVIDSON, 2006; JERRAM,2006).

No EMCCD, a seção sensível para a captura da imagem, a seção de armazenamento da informação da imagem capturada e o registro de leitura têm o mesmo desenho de um CCD convencional. Uma seção de registro de multiplicação é estendida no EMCCD, a qual está localizada após do registro serial e antes da entrada do circuito de conversão e amplificação da tensão (figura 2.14) (FELLERS; DAVIDSON, 2006).

Distinto de um CCD convencional, o EMCCD não é limitado pelo ruído na leitura de saída do amplificador, quando opera a altas velocidades de leitura de saída. O registro serial de estado sólido para a multiplicação dos elétrons (*Electron Multiplying (EM)*) adicionado ao dispositivo detector permite que os sinais fracos sejam multiplicados antes que algum ruído na leitura de saída seja adicionado pelo amplificador da saída (ANDOR-TECHNOLOGY, 2001).

O registro de multiplicação de elétrons tem centenas de estágios que usam tensões de valores normais de temporização (CLK, 10 a 15 volts). A carga equivalente aos fótons capturados é transferida por cada estágio pelo fenômeno de ionização por impacto para produzir elétrons secundários, apresentando um alto ganho na saída desse registro. Além disso, o registro de multiplicação pode ser controlado por software e variar o resultado do ganho desde um valor unitário até milhares de vezes.

A inclusão do registro serial de multiplicação é apropriada para aplicações onde é feita a aquisição de uma imagem de baixa luminosidade sem usar intensificadores

externos de imagem, porque o ganho de multiplicação se origina pelo processo já mencionado de ionização por impacto no silício (figura 2.16) (PAWLEY, 2006). O fato de que um EMCCD não precisar de um intensificador de imagem significa que se pode utilizar a máxima eficiência quântica do sensor de silício, o qual é aproximadamente de 95%.

2.2.1 Registro de multiplicação de ganho

O registro de multiplicação do ganho assemelha-se a um registro horizontal adicional com duas importantes diferenças:

- Têm quatro fases, uma a mais, em comparação com as três fases que tem o registro horizontal de um CCD convencional. A nova fase consiste em um eletrodo de alta tensão referenciado a terra, localizado entre a fase1 e a fase2.
- A tensão de transferência da carga é de valor significativamente mais elevado, compreendido entre 35 e os 50 volts, comparado com o valor da tensão no CCD tradicional que usualmente tem 15 volts. Além dessa alta tensão, no EMCCD pode-se controlar também o ganho do registro de multiplicação.

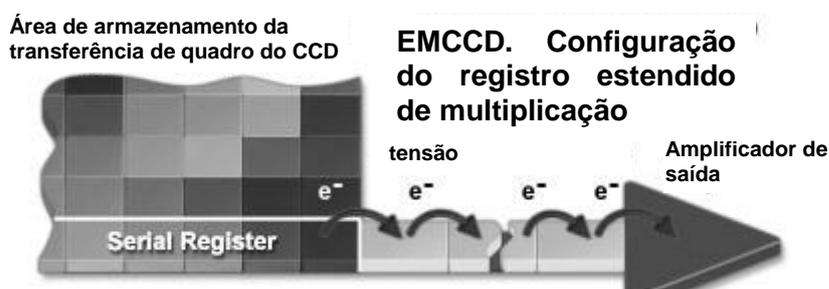


Figura 2.14 - Posição do registro de ganho. (Adaptado de FELLERS; DAVIDSON, 2006)

A probabilidade de geração dos elétrons é dependente dos níveis da tensão do relógio do registro serial e a temperatura do EMCCD, as faixas típicas são de 1 a 1.6% e descreve-se pela seguinte função:

$$M = (1 + p)^N \quad (2.2)$$

Onde **M** é o ganho total dos elementos do registro de multiplicação, **p** é a probabilidade de geração de elétrons e **N** é o número de elementos no registro de multiplicação. Por exemplo, em um CCD com 512 elementos no registro de

multiplicação de alto ganho, e uma probabilidade de 1.3%, a saída total de multiplicação das cargas será de 744.

A figura 2.15 ilustra uma forma geral do incremento exponencial do ganho em relação da amplitude da tensão aplicada ao eletrodo de alta tensão da fase 2.

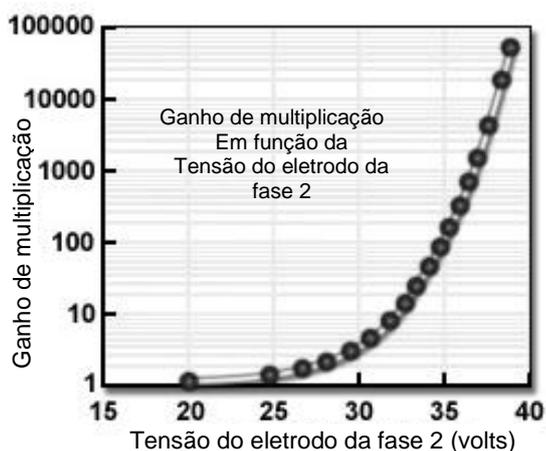


Figura 2.15 - Relação de fase 2 com ganho (Adaptado de FELLERS; DAVIDSON, 2006).

A figura 2.16 ilustra a transferência da carga sobre as diferentes portas (*Gates*) do EMCCD, note-se que as duas portas ϕ_1 e ϕ_3 são temporizadas com pulsos de normal amplitude (10 ou 15 Volts) e esses mesmos pulsos são aplicados às duas seções do registro de leitura da saída.

Os pulsos aplicados à fase 2 do registro de multiplicação têm uma elevada amplitude de 35 a 50 volts, e é instalada uma porta seguida da fase 2, que tem um baixo nível DC. A diferença de potencial entre a porta DC e a porta de alto nível de tensão da ϕ_2 gera uma região de campo alto; esse campo é o suficientemente grande para gerar um choque de elétrons durante a transferência de ϕ_1 a ϕ_2 , e para que se apresente o processo de ionização por impacto, onde aparecem novos elétrons incrementando o pacote da carga transferida cada vez que passa sobre cada elemento da multiplicação.

Os elétrons são transferidos da fase 1 à fase 2 em uma seqüência normal de relógio e a multiplicação da carga por transferência é somente de 1.01 a 1.016. O ganho acumulado sobre o longo dos pixels no registro de multiplicação é substancial e será de centenas ou milhares de vezes. O ganho de multiplicação é exponencial e proporcional à alta tensão aplicada à fase 2, e pode ser incrementado ou diminuído

apenas variando-se a amplitude desta tensão, podendo-se obter um valor de ganho com valores acima de 1000x. (PAWLEY, 2006)

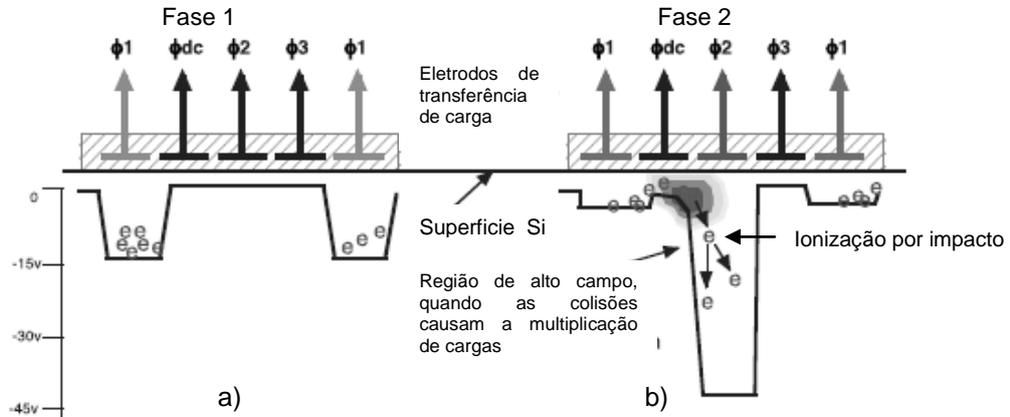


Figura 2.16 – a) Transferência de carga de um elemento em um EMCCD, b) multiplicação de elétrons (CUMANI,2004; JERRAM ,2006)

O EMCCD é favorecido pela alta eficiência quântica (QE) disponível da retro iluminação (*back-illumination*). A escolha de uma técnica correta na parte da temporização e refrigeração para um ótimo funcionamento do CCD. Este pode proporcionar eficiências quânticas úteis na faixa de comprimentos de onda de 1 nanômetro ate 1 micrômetro (figura 2.17). (JERRAM, 2006)

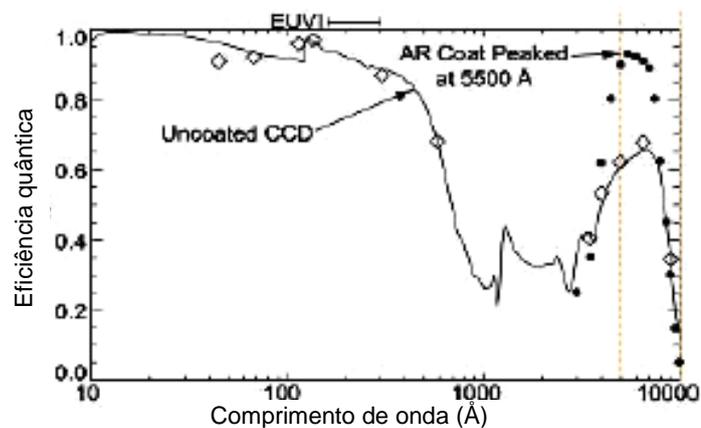


Figura 2.17 - Gráfico da eficiência quântica de um EMCCD. (JERRAM, 2006)

Estas técnicas podem ser um esfriamento correto com vácuo, diminuindo a corrente no escuro (*dark current*) a qual é gerada pelos fótons no processo de aquisição de imagem e é proporcional à temperatura. Também se há um baixo ruído aumenta a eficiência quântica e este ruído pode diminuído utilizando-se leituras rápidas de saída. (HOWELL, 2006; JERRAM, 2006; DENVIR; CONROY, 2003)

Para o entendimento do funcionamento do EMCCD é necessário citar alguns conceitos e fenômenos presentes e relacionados com o comportamento físico dos dispositivos de acoplamento de carga, como a ruptura por avalanche, ionização por impacto, taxa de ionização e outros.

2.2.2 Ruptura por avalanche

Este mecanismo controla a ruptura de junções de regiões pouco dopadas. O processo de ruptura é decorrente do efeito de multiplicação por avalanche ou ionização por impacto dos portadores minoritários (REY; LETURCQ, 1972).

Devido à tensão inversa aplicada, e na presença de um campo elétrico elevado, os portadores liberam energia suficiente para gerarem novos portadores na colisão com os átomos da rede cristalina. Os elétrons e lacunas recém-gerados podem, por sua vez, ser acelerados pelo campo elétrico, e adquirir a energia suficiente para criar outros pares por colisão, iniciando uma reação em cadeia que conduz a correntes inversas elevadas (REY; LETURCQ, 1972).

2.2.3 Taxa de ionização

O mecanismo de multiplicação por avalanche é ponderado pela taxa de ionização α . Essa taxa de ionização representa o número de pares elétrons-lacunas gerados por um portador por uma unidade de percurso. Essa taxa é diferente para elétrons (α_n) e para lacunas (α_p). A ionização por impacto ocorre unicamente quando a partícula recebe ao menos o limiar de energia para a ionização E a partir de um campo elétrico. Partindo da aplicação das leis de conservação da energia e cinética ao evento da colisão, pode-se deduzir que um mínimo de energia de $1.5E_g$ (E_g energia da banda proibida) é necessário, se as massas efetiva das lacunas e elétrons são assumidos iguais. Em geral a taxa de ionização depende da probabilidade dos portadores de conseguirem este limiar de energia. Como uma primeira aproximação a taxa de ionização depende unicamente do campo elétrico local. O modelo mais comumente usado é a expressão empírica de Chynoweth (MADAN et al, 1983).

Duas fórmulas empíricas são normalmente usadas (2.3a) e (2.3b).

$$\alpha_{n,p} = A_{n,p} \exp(-b_{n,p} / E_i) \quad (2.3a)$$

$$A_{n,p} = A E_i^g \quad (2.3b)$$

Onde α_n taxa de ionização de elétrons, α_p taxa de ionização de lacunas, A

Os parâmetros correspondentes às expressões (2.3a) e (2.3b) são discriminados na tabela 2.1.

Tabela 2.1. Parâmetros para a taxa de ionização (RAMIREZ, 1978)

	α [cm ⁻¹]	b[V/cm]	$E > 4 \times 10^5$ [V/cm]		$E < 4 \times 10^5$ [V/cm]	
			A [cm/V]	G	A [cm/V]	G
Elétrons	$3,80 \times 10^6$	$1,75 \times 10^6$	$2,80 \times 10^{-13}$	3	$8,45 \times 10^{-36}$	7
Lacunas	$2,25 \times 10^7$	$3,26 \times 10^6$				

Com esses dados experimentais se pode estimar uma taxa de ionização dos elétrons ou lacunas em um dispositivo feito de silício.

2.2.4 Multiplicação por avalanche

Um fenômeno bem conhecido nos dispositivos semicondutores é a multiplicação por avalanche. Esse fenômeno ocorre quando os portadores passam através de um campo elétrico na ordem de grandeza de 10^5 V/cm. Devido ao alto campo elétrico, os portadores conseguem a energia suficiente para gerar pares elétrons-lacunas. Os portadores gerados são adicionados ao sinal de carga original e conseqüentemente dão origem à multiplicação de portadores. (MADAN et al, 1983).

Em dispositivos de acoplamento de carga os eletrodos estão situados muito próximos uns dos outros para ter um eficiente e ótimo acoplamento das cargas. A aplicação de uma tensão da grandeza de 10 Volts entre dois eletrodos próximos e adjacentes resulta em um máximo campo elétrico da ordem de 10^5 até 2×10^5 V/cm (MADAN et al, 1983).

No EMCCD há uma barreira direcionando a transferência da carga. Essa barreira pode ser inerente na estrutura do CCD ou também pode ser obtida com uma correta temporização nas quatro fases do CCD (fig 2.18). A presença da barreira origina um alto campo elétrico, que é tipicamente concentrado a $1 \mu\text{m}$ do redor do intereletrodo proibido.

Para uma barreira o suficientemente grande com altura $\Delta\Phi_0$, um campo elétrico na ordem de grandeza de 10^5 V/cm deve ser apresentado sobre a distância w com comprimento da ordem de $1\mu\text{m}$, causando a geração de pares elétrons-lacunas devido à ionização por impacto quando um portador cai sobre essa barreira, tornando-se quente. (MADAN et al, 1983)

Em um dispositivo de canal n os elétrons gerados são adicionados ao pacote do sinal e as lacunas geradas tendem a acumular-se em direção ao corpo do silício e contribuir com a corrente do substrato. Os elétrons gerados e os elétrons do sinal podem adquirir novamente a energia suficiente para gerar mais pares elétrons-lacunas causando um efeito de multiplicação do sinal da carga.

A geração de lacunas será sujeita a dois campos elétricos. O campo ao longo da superfície tenderá a mover-se a elas na direção da barreira (direção de $-x$), conforme figura 2.18, e o campo na direção Z resultará em sua deriva para o corpo do silício. Se o campo elétrico na direção x é grande comparado com o da direção em Z , então as lacunas tenderão a permanecer na região do alto campo elétrico por um longo período e isso também pode causar uma ionização adicional. (MADAN et al, 1983)

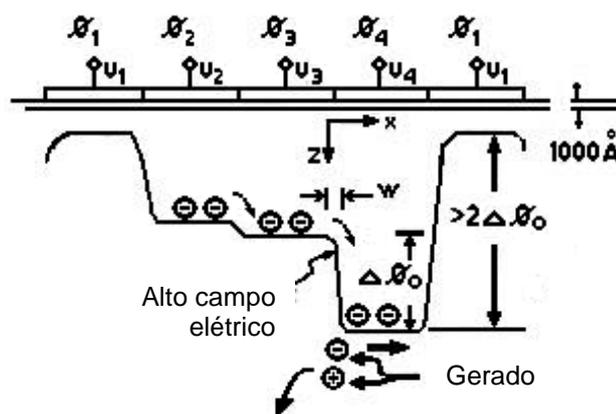


Figura 2.18 - Estrutura da fase de um CCD para o qual os cálculos são executados. Deve-se a presença do alto campo elétrico na borda da região de barreira e então, multiplicação por avalanche pode acontecer. O elétron gerado por avalanche se moverá na direção x e a lacuna gerada na direção determinada por as forças em direções de $-x$ e z . (Modificado de MADAN et al, 1983)

Assumindo que a multiplicação é devida somente a elétrons, $\alpha_n(E)$ é a taxa de ionização por centímetro para os elétrons, $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ é o campo elétrico e \mathbf{x} é a distância. $n(0)$ é o número de elétrons obtidos injetados a $\mathbf{x} = 0$, $n(\mathbf{x})$ número de elétrons a \mathbf{x} , conforme a equação que descreve a multiplicação de portadores é:

$$\frac{dn(x)}{dx} = \alpha_n(x) \cdot n(x) \quad (2.4)$$

Onde se tem a solução

$$n(x) = n(0) \cdot \exp\left(\int_0^x \alpha_n(x') \cdot dx'\right) \quad (2.5)$$

Se $M(w)$ é o fator de multiplicação sobre a distância w , então

$$M(w) = \frac{n(w)}{n(0)} \cdot \exp\left(\int_0^w \alpha_n(x) \cdot dx\right) \quad (2.6)$$

Onde a distância w é mostrada na figura 2.18, e é definido outro valor, o fator de ganho (g), será:

$$g = M(w) - 1 = \frac{n(w) - n(0)}{n(0)} \quad (2.7)$$

A taxa de ionização $\alpha_n(E)$ é, comumente expressada pela equação 2.8:

$$\alpha_n(E) = A_n \cdot \exp(-b_n / E) \quad (2.8)$$

Onde os parâmetros A_n e b_n são obtidos empiricamente.

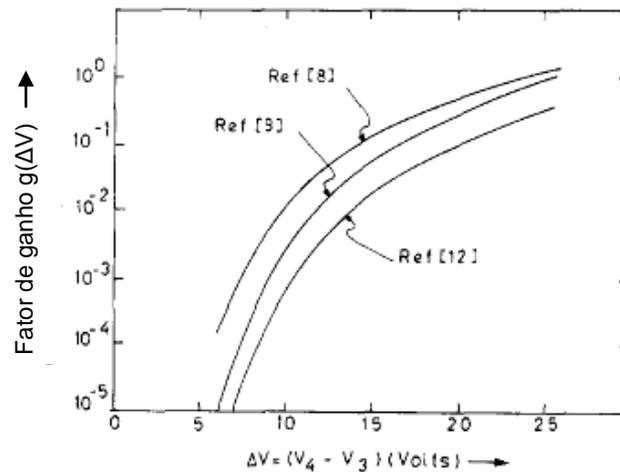


Figura 2.19 - Fator de ganho g calculado para três taxas de ionização diferentes, (MADAN et al, 1983)

MADAM (1983) calcula o fator de ganho para um CCD de 4 fases operado em modo de 2 fases para entregar uma tensão **DC** às duas portas adjacentes. A figura 2.19 mostra o valor de fator de ganho calculado (g) versus a diferença da tensão de relógio $\Delta V = (V_4 - V_3)$ entre as duas portas adjacentes ϕ_4 e ϕ_3 , a taxa de ionização é encontrada na tabela 2.2.

Tabela 2.2. Parâmetros de taxa de ionização (MADAN et al, 1983)

	Ghandh1	Van Overstraeten	Moll
$A_n \text{ cm}^{-1}$	9×10^5	$7,03 \times 10^5$	$1,6 \times 10^6$
$b_n \text{ (V/cm)}$	$1,8 \times 10^6$	$1,23 \times 10^6$	$1,65 \times 10^6$

2.2.5 Ruídos

Existem diversas fontes que geram ruído nos detectores EMCCD, incluindo aqueles gerados de fatores extrínsecos, como radiações cósmicas. Considerando somente as fontes de ruídos intrínsecas do EMCCD, pode-se classificá-las em quatro diferentes categorias:

2.2.5.1 Ruído fixo padrão (Fixed Pattern Noise) – N_f

É a variação em foto-resposta entre pixels vizinhos. Essa variação é causada por uma pequena diferença na sensibilidade entre cada pixel, diferença está resultada principalmente de variações na eficiência quântica entre pixels causada por uniformidades na área de abertura e espessura do filme que surge durante a fabricação do CCD. Quando o sinal é grande, o ruído é proporcional ao nível de exposição (número de elétrons do sinal). O $N_f = 0$ é usado se é considerado o ruído de um pixel (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003)

2.2.5.2 Ruído de captura (**Shot Noise**) – N_s

É o ruído associado à variação estatística no número de fótons incidentes no CCD durante o tempo de exposição. O N_s é modelado pela função de distribuição de Poisson aplicada no sinal de entrada (número de cargas integradas) (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003).

$$N_s = \sqrt{S} \quad (2.9)$$

Onde N_s é o ruído de captura e S é a amplitude do sinal, os dois expressados em (e^-).

O ruído de captura é gerado quando os portadores inesperadamente aparecem e desaparecem e também quando esses portadores passam através de uma barreira de potencial. O ruído de captura é também gerado na região de pinçamento (*pinch-*

off) do MOSFET na seção do amplificador, induzido pela ionização por impacto e é dependente da corrente de dreno. Por essa razão a corrente do MOSFET é reduzida o máximo possível para não afetar significativamente o ganho, a impedância da saída, e a linearidade do CCD. (Janesick, 2001)

2.2.5.3 Ruído de disparo no escuro (*Dark Shot Noise*) – N_d

A corrente de escuro é afetada pelo ruído de disparo (N_s) e as duas são correlacionadas pela mesma característica física. Quantitativamente, o ruído de disparo de escuro (N_d) é proporcional à raiz quadrada do número de cargas geradas na ausência de iluminação. Portanto, para reduzir o efeito provocado por N_d , devem-se utilizar métodos que minimizem a corrente de escuro no sensor CCD, tal como uma boa refrigeração do dispositivo. (ROBBINS; HADWEN, 2003; HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003)

2.2.5.4 Ruído de leitura na saída (*Readout Noise*) – N_r

É o ruído elétrico resultante do ruído térmico causado pelos dispositivos MOSFET que compõem o amplificador de saída. Este amplificador é responsável pela conversão das cargas integradas em tensões elétricas mensuráveis (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003).

Geralmente esse ruído determina o limite da detecção luminosa mínima do sensor. O nível de N_r é independente da quantidade de radiação luminosa incidente na superfície ativa do dispositivo, porém apresenta certa dependência com o comprimento de onda da mesma. Para um mesmo comprimento de onda detectado, o ruído de leitura permanece constante em função da intensidade luminosa presente. (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003).

O ruído total introduzido (N_t) no processo de detecção de imagens por dispositivos CCDs é expressado na equação (2.10) como:

$$N_t = \sqrt{N_f^2 + N_s^2 + N_d^2 + N_r^2} \quad (2.10)$$

O desempenho de um CCD pode ser otimizado, no sentido de redefinir o limite mínimo da detecção (*readout noise*), operando o CCD de tal forma que o ruído de captura no escuro (**Nd**) seja inferior ao ruído de leitura (**Nr**). Isto pode ser conseguido refrigerando-se devidamente o sensor, a fim de reduzir a corrente de escuro (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003).

A relação sinal-ruído (S/N) do sensor durante a operação é determinada pelo Ruído fixo padrão (**Nf**) a altos níveis de exposições luminosas e pelo do ruído de captura (**Ns**) a baixos níveis de exposição. Os fatores que influem no limite da detecção da imagem são o ruído de captura no escuro (**Nd**) e o Ruído de Leitura da saída (**Nr**). O ruído de captura no escuro (**Nd**) depende significativamente da corrente de escuro e, portanto, este pode ser efetivamente minimizado tornando o ruído de Leitura (**Nr**) o fator dominante do limite de detecção luminosa. (ROBBINS; HADWEN, 2003, HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003)

A figura 2.20 a seguir ilustra como as diferentes componentes do ruído presentes no CCD se relacionam com o nível de exposição luminosa:

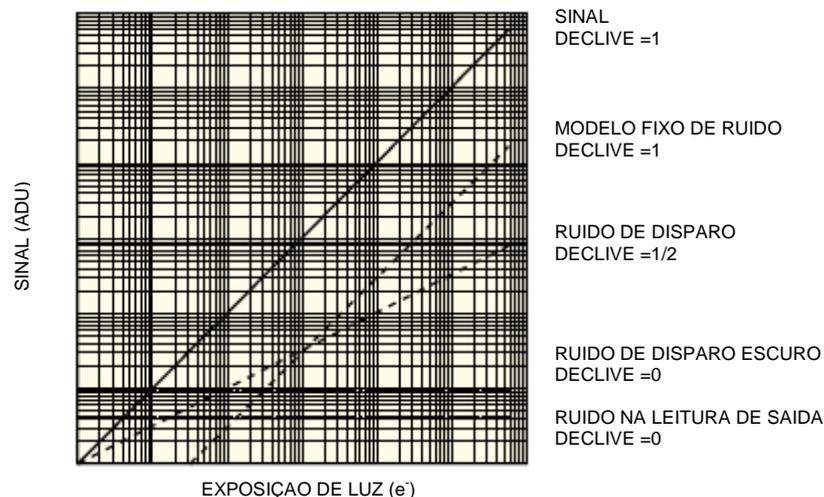


Figura 2.20 - Fontes de luz predominantes em função da exposição de luz. (Adaptado de HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2003)

2.2.6 Ruído no EMCCD

A multiplicação dos elétrons para obter um alto ganho na formação de uma imagem em baixa luminosidade introduz um ruído adicional na imagem de saída e então se pode definir um fator de ruído (HOLST; LOMHEIN, 2007). Dado pela equação (2.11)

$$k_{EMCCD} = \frac{\langle n_{\text{ANTES DO GANHO}} \rangle}{M \langle n_{\text{DEPOIS DO GANHO}} \rangle} \quad (2.11)$$

Onde k é o fator de ruído, M ganho de multiplicação, η a eficiência quântica

Para obter-se uma expressão analítica do fator de ruído adicionado no dispositivo, primeiro, é necessário considerar um só estágio de multiplicação.

Tomando n e m como o número médio de elétrons que entram e saem do estágio de multiplicação, σ_n^2 e σ_m^2 são respectivamente, as a variância no número de elétrons que entram e saem do estagio, onde g é o valor médio do ganho e σ_g^2 é a variância no ganho.

$$m = gn \quad (2.12)$$

Assumindo que g é independente de n tem-se que:

$$\frac{\sigma_m^2}{m^2} = \frac{\sigma_n^2}{n^2} + \frac{\sigma_g^2}{g^2} \quad (2.13)$$

Se o ganho é tratado com um processo de Bernoulli, os números de elétrons gerados pelos eventos de multiplicação podem ser descritos por uma distribuição binomial. Portanto, a variância no número de elétrons adicionados ($\sigma_{\text{adicionado}}^2$) é dada por:

$$\sigma_{\text{adicionado}}^2 = n\alpha(1 - \alpha) \quad (2.14)$$

Onde α é a probabilidade de um evento de multiplicação = $g - 1$ para valores pequenos de α

$$\sigma_g^2 = \frac{\sigma_{\text{adicionado}}^2}{n^2} = \frac{\alpha(1 - \alpha)}{n} \quad (2.15)$$

Substituindo as equações (2.12) e (2.15) em (2.14)

$$\alpha_m^2 = (1 + \alpha)^2 \sigma_n^2 + n\alpha(1 - \alpha) \quad (2.16)$$

Agora, todos os elementos idênticos N do registro de multiplicação podem ser considerados. S_{entrada} e S_{saida} são a média dos sinais de entrada e saída, respectivamente. Assumindo que o sinal de entrada tem um ruído de captura limitado, à variância desse ruído é simplesmente S_{entrada} . A variância na saída σ_{saida}^2 pode-se obter obtida aplicando-se a equação 2.16 sobre cada estágio.

Para

$$N = 1 \quad \sigma^2_{saida} = S_{entrada} (3\alpha + 1)$$

$$N = 2 \quad \sigma^2_{saida} = S_{entrada} (\alpha + 1)(2\alpha^2 + 5\alpha + 1)$$

$$N = 3 \quad \sigma^2_{saida} = S_{entrada} (\alpha + 1)^2 (2\alpha^3 + 6\alpha^2 + 7\alpha + 1)$$

Para um valor arbitrário de N, a variância da saída é dada pela equação (2.17)

$$\begin{aligned} \sigma^2_{saida} &= S_{entrada} (\alpha + 1)^{(N-1)} (2(\alpha + 1)^N + \alpha - 1) \\ &= S_{entrada} M \left(\frac{2M + \alpha - 1}{\alpha + 1} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Portanto, tomando que $\sigma^2_{entrada} = S_{entrada}$ e combinando as equações (2.17) e (2.11), se obtém

$$k^2 = \frac{1}{M} \left(\frac{2M + \alpha - 1}{\alpha + 1} \right) = \frac{2(M - 1)}{M^{(N+1)/N}} + \frac{1}{M} \quad (2.18)$$

O ganho depende do número das células de multiplicação e o ganho por célula: $M = (1+g)^N$. Na equação (2.18), o cálculo do ruído para dispositivos onde tem uma ampla faixa de multiplicação em cascata terá valores grandes de **N**, o que cria um valor de **M** grande, $k^2_{EMCCD} \approx 2$ ou $k_{EMCCD} \approx 1.4$

2.3 Corrente de escuro

A Corrente de escuro (*dark current*) é intrínseca aos semicondutores e ocorre naturalmente através da geração térmica dos portadores minoritários. A corrente é denominada de escuro porque é produzida quando o EMCCD está em completa escuridão. O nível da corrente de escuro gerado determina a quantidade de tempo no poço de potencial que pode existir ao coletar o sinal da carga toda. Este tempo não é muito longo e só há uma solução para eliminar o sinal de escuro, que é refrigerar o sensor. (HOLST; LOMHEIN, 2007; JANESICK, 2001)

Há três principais regiões que contribuem à geração da corrente de escuro: (1) magnitude do material neutro abaixo do poço de potencial e regiões finais do canal, (2) material esvaziado dentro do poço de potencial, e, (3) estados de interface de Si-SiO₂. Não obstante, a magnitude da corrente de escuro varia consideravelmente dependendo da qualidade do material do silício e o processamento utilizado sobre as lâminas.

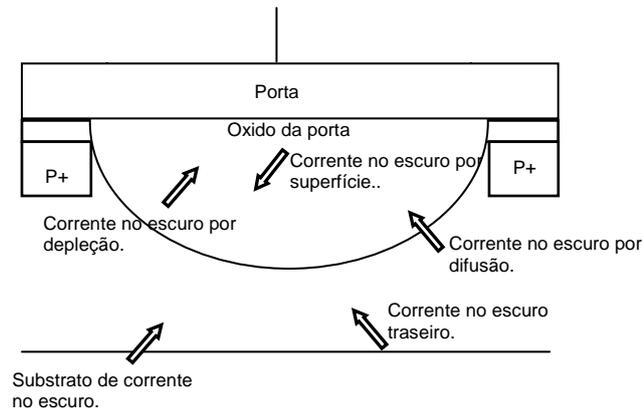


Figura 2.21 - Regiões de fontes de corrente no escuro no CCD. (Adaptado de JANESICK, 2001)

Há três fontes principais de corrente de escuro: 1) geração térmica na região de depleção, 2) geração térmica e difusão no corpo neutro do material, e 3) geração térmica devido ao estado da superfície (JANESICK, 2001).

As densidades de corrente variam significativamente entre fabricantes, cuja faixa está desde 2 pA/cm^2 até 10 nA/cm^2 . Como a corrente de escuro é devido aos elétrons gerados termicamente, pode ser reduzida somente por resfriamento do dispositivo. A corrente de escuro de estado da superfície é minimizada com *multi phase pinning* (MPP). Tipicamente os dispositivos MPP tem poços de carga que são três vezes menores que os dos dispositivos convencionais. MPP é uma arquitetura comumente usada nas aplicações científicas e médicas. (Gerald c. et al, 2007)

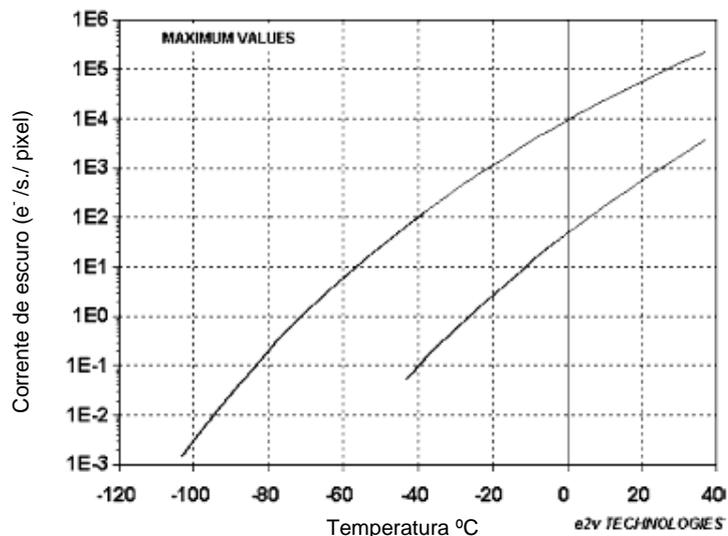


Figura 2.22 - Gráficos mostram: (acima) corrente de escuro de superfície (abaixo) corrente de escuro do corpo em um CCD com um pixel de $15\mu\text{m}$ (adaptado de e2v Technologies)

Quando o dispositivo faz a leitura das imagens, a corrente de escuro é adicionada e convertida em parte do sinal, sendo indistinguível dos fótons gerados por imagens de alvos astronômicos, baixa luminosidade ou do sinal original de entrada. Os elétrons de geração térmica no silício têm uma forte influência da temperatura do CCD, que para uso na astronomia precisa de alguma forma de refrigeração (McLean, 1997b). A figura 2.23 mostra um gráfico típico da corrente de escuro e sua variação com a temperatura.

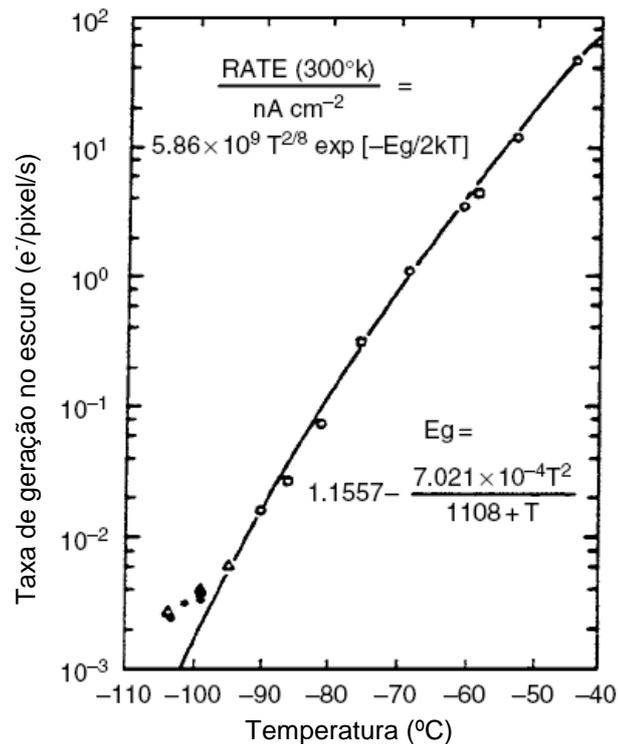


Figura 2.23 - Curva típica de corrente de escuro. (adaptado de HOWELL, 2006)

A corrente de escuro para um CCD é especificada também como o número de elétrons térmicos gerados por segundo por pixel (e⁻/pixel/s), ou também como a corrente gerada por área do dispositivo (pA cm⁻²). No CCD à temperatura ambiente, o valor típico da corrente no escuro é próximo a 2.5×10^4 elétrons/pixel/segundo. Valores típicos de dispositivos frios ou refrigerados baixam a níveis próximos a 0,04 elétrons por segundo por pixel.

A corrente de escuro de depleção e superfície são as principais contribuições da corrente de escuro do dispositivo, mostrando a mesma dependência da temperatura

da concentração de portadores intrínsecos n_i . Usando a equação de concentração de portadores como fórmula geral da corrente de escuro, tem-se (HOWELL, 2006):

$$D_R(e^-) = CT^{1.5} \exp(-E_g / 2kT) \quad (2.19)$$

Onde $D_R(e^-)$ é a média da corrente no escuro gerada (e-/segundo/pixel), C é uma constante, T é a temperatura de operação (K), E_g é a energia da banda proibida do silício, e k é a constante Boltzmann (8.62×10^{-5} eV/K).

A banda proibida varia com a temperatura de operação e pode ser encontrada pela seguinte fórmula empírica

$$E_g = 1.1557 - \frac{7.021 \times 10^{-4} T^2}{1108 + T} \quad (2.20)$$

A constante C pode ser resolvida à temperatura ambiente (300°K, 27°C)

$$C = \frac{D_{FM} P_S}{q T_{RM}^{1.5} e^{-E_g/(2kT_{RM})}} \quad (2.21)$$

Onde P_S é a área do pixel (cm^2), T_{RM} é a temperatura ambiente (300 K), e D_{FM} é a chamada “figura de mérito da corrente no escuro” a 300 K (nA/cm^2), e substituindo-se por estes valores produz-se a fórmula final de corrente no escuro.

$$D_R(e^-) = 2.5 \times 10^{15} P_S D_{FM} T^{1.5} e^{(-E_g / 2kT)} \quad (2.22)$$

O esfriamento do CCD é geralmente feito por dois métodos. O primeiro é usado para CCD científicos na maioria de observatórios astronômicos, como o nitrogênio líquido colocado no interior de uma câmara denominada DEWAR. Na figura 2.24 é mostrado o típico DEWAR astronômico. Dentro desta câmara feita de metal é encaixado o CCD com a eletrônica embarcada sob um alto vácuo, embora não tenha um contacto direto com o dispositivo, e a temperatura de operação do dispositivo aproxima-se aos -100°C. (HOWELL, 2006; JANESICK, 2001)

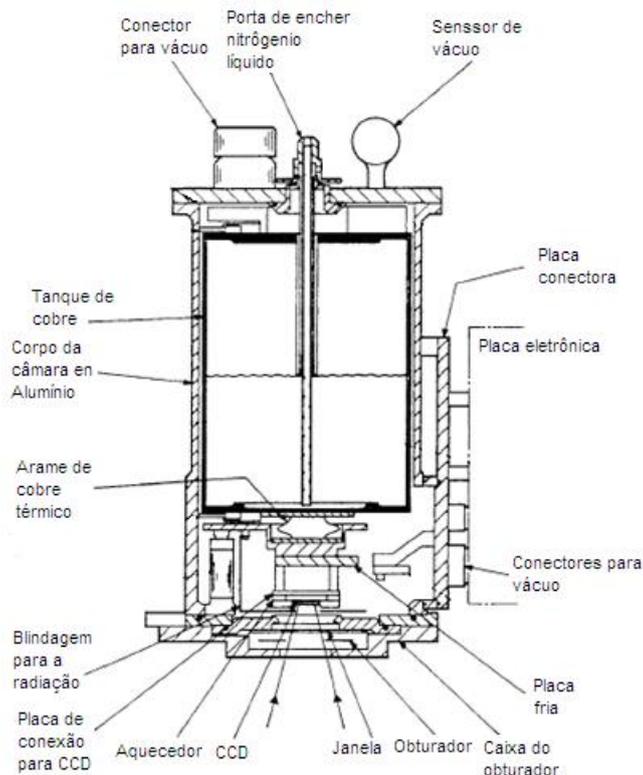


Figura 2.24 - Câmera Típica para o CCD, DEWAR (Adaptado de HOWELL, 2006)

A outra técnica de esfriamento simples e econômica usa métodos de refrigeração termoelétrica. Tais métodos são utilizados em sistemas CCD *“off the shelf”* permitindo temperaturas de operação de -20° até -50°C , colocando um cooler ou vários coolers Peltier dentro da placa eletrônica que conecta o dispositivo detector CCD.

2.3.1 Medida da corrente de escuro

Uma forma aproximada de encontrar o valor da corrente de escuro é capturar uma série de imagens em um ambiente escuro durante um determinado tempo de exposição e calcular a média de cada grupo de quadros escuros; examinar o histograma dos valores dos pixels para cada média de quadros encontrada e escrever o intervalo em valores de pixel para uma distribuição grande. Em seguida deve-se encontrar a média dos pixels que estão dentro dessa distribuição, desenhar um gráfico da média em função ao tempo de exposição e calcular o declive, sendo este declive ($ADU\ sec$) a corrente de escuro. (HOWEL, 2006)

2.3.2 Geração e recombinação

Portadores de corrente no escuro são gerados completamente no centro de níveis intermediários associados com as imperfeições ou impurezas dentro do semiconductor ou na interface Si-SiO₂. Esses estados introduzem níveis de energia dentro do intervalo da banda proibida onde se promove a corrente no escuro por representações similares a “passos” na transição de elétrons e lacunas entre a banda de condução e valência (JANESICK, 2001).

Geração e recombinação se formam por quatro processos mostrados na figura 2.25 (captura do elétron, emissão do elétron, captura das lacunas e emissão das lacunas). Elétrons e lacunas são necessários para a recombinação. Esse processo raramente ocorre no CCD porque o sinal de carga é seguro quando está contido em um poço potencial (não há portadores majoritários na qual a carga pode se recombinar) (JANESICK, 2001).

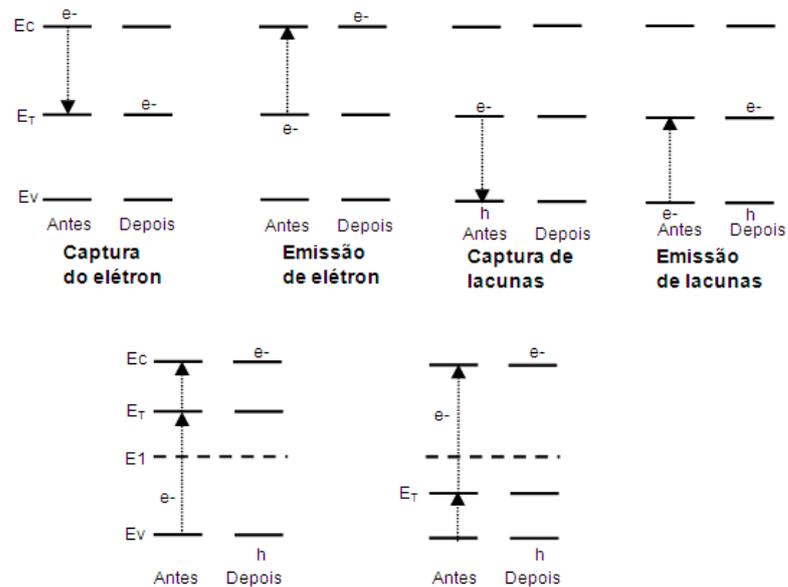


Figura 2.25 - Recombinação e geração através de estados de banda média. (Janesick 2001)

A emissão dos elétrons e as lacunas estão presentes na geração da carga no escuro. A emissão de uma lacuna é a transição de um elétron desde a banda de valência até a banda média, partindo de uma lacuna na banda de valência. A emissão de um elétron é a transição entre a banda media e a banda de condução. Uma vez o elétron na banda de condução, este pode ser coletada pelo poço potencial como o sinal no escuro. (JANESICK, 2001, p.605)

O processo de geração e recombinação é definido teoricamente pela equação do Shockley/Hall/Read, (JANESICK, 2001)

$$U = \frac{\zeta_p \zeta_n v_{th} (pn - n_i^2) N_T}{\zeta_n \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \zeta_p \left[p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]} \quad (2.23)$$

Onde U é o grupo de portadores da recombinação e geração (portadores/s-cm³), N_T é a concentração de geração e recombinação no centro (*traps*) no nível de energia E_t (cm⁻³), $E_t - E_i$ é a energia do nível de imperfeição com relação ao nível intrínseco de Fermi E_i (eV), ζ_p e ζ_n são as secções transversais dos elétrons e as lacunas (cm²) e n e p são o número de elétrons e lacunas livres, respectivamente (cm⁻³).

Para um CCD em equilíbrio térmico, $pn = n_i^2$ e $U=0$, indicando que a geração é igual à recombinação. Um negativo U implica uma taxa de geração líquida de pares elétrons-lacuna, sendo mais geração que a recombinação, apresentando uma relação com a corrente no escuro do CCD. Um U positivo indica que existe uma recombinação e implica no fato do CCD ter sido estimulado (JANESICK, 2001).

2.4 Ganho

O histograma de uma imagem pode produzir uma distribuição gaussiana que está relacionada com o ruído da leitura e o ganho do detector. Além disso, uma relação similar existe para o histograma de uma típica imagem plana, de acordo com a figura 2.26.

Imagens *bias* e imagens planas podem ser usadas para determinar propriedades importantes do CCD como o ruído da leitura e o ganho. Usando dois quadros *bias* e da mesma forma duas imagens planas denominadas 1 e 2 determina-se a média dos valores dos pixels dentro de cada imagem (deve-se ter cuidado de não usar as bordas das linhas e colunas que podem ter valores grandes ou pequenos devido às propriedades da leitura da saída do CCD, como é a ativação do amplificador originando alguns picos). Serão denominados os valores médios de cada quadro *bias* \bar{B}_1 \bar{B}_2 e \bar{F}_1 \bar{F}_2 correspondentes ao valor das imagens planas (HOWELL, 2006; JANESICK, 2001).

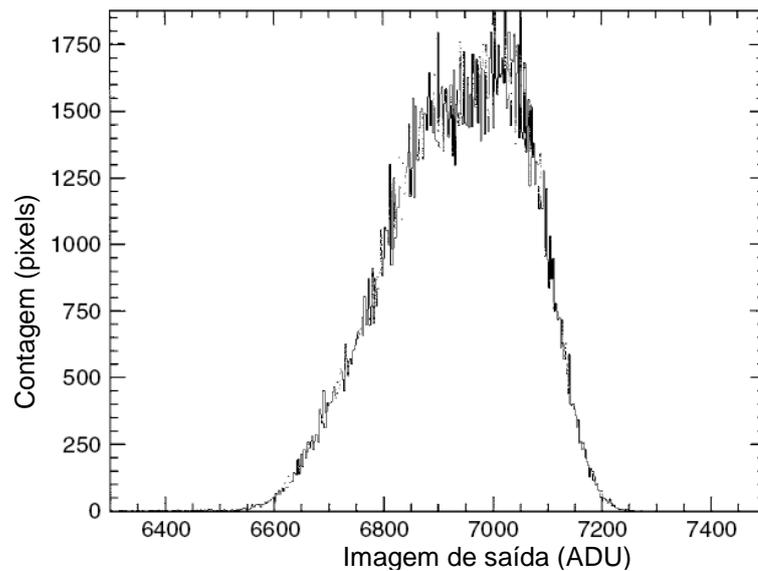


Figura 2.26 - Histograma de uma imagem plana.

Depois, criam-se dois quadros dados pela diferença entre imagens $B_1 - B_2$ e $F_1 - F_2$, e calcula-se o desvio padrão destas diferenças entre as imagens, dado por $\sigma_{B_1-B_2}$ e $\sigma_{F_1-F_2}$. Tendo-se isto o ganho pode ser determinado por: (HOWELL, 2006)

$$\text{ganho: } \frac{(\overline{F_1 + F_2}) - (\overline{B_1 + B_2})}{\sigma_{F_1-F_2}^2 - \sigma_{B_1-B_2}^2} \quad (2.24)$$

2.5 Ruído de leitura de saída

O Ruído de leitura de saída, também denominado apenas ruído de leitura, é citado para o EMCCD em termos do número de elétrons introduzidos por pixel dentro do sinal final sobre a leitura de saída. O ruído na leitura consiste de dois componentes, o primeiro é a conversão de um sinal analógico em um número digital, o qual não é perfeitamente repetitivo. Sobre cada amplificador e circuito analógico digital (A/D) será produzida uma distribuição estatística de possíveis respostas centradas sobre um valor médio. No segundo, a própria instrumentação eletrônica introduz elétrons espúrios no processo todo, permitindo flutuações aleatórias não desejáveis na saída. Os dois efeitos combinam a produção de valores incertos na saída final para cada pixel (HOWELL, 2006).

O nível médio dos valores incertos é a leitura de ruído, que é limitada pelas propriedades eletrônicas do *chip* amplificador de saída e a saída eletrônica

(conversão de analógico para digital). (Djorgovski, 1984). Além o tamanho físico do *chip* amplificador, a construção do circuito integrado, a temperatura do amplificador e a sensibilidade (p.e. coleta do fotoelétron) também contribuem no ruído na leitura para o EMCCD, e os valores desse ruído são altamente relacionados às propriedades térmicas do amplificador, o que determina a sensibilidade de cada pequena tensão de saída.

Tomando os quadros *bias* e imagens planas na obtenção do ganho, é possível também encontrar o ruído de leitura do detector. Esse pode ser obtido com a expressão (2.25) (HOWELL, 2006):

$$\text{ruído.de.leitura} : \frac{\text{ganho} \cdot \sigma_{B_1-B_2}}{\sqrt{2}} \quad (2.25)$$

Onde B média de imagem *bias*

2.6 Carga induzida pelo relógio (CIC)

O CIC (*clock induced charge*) é causado pela ionização por impacto dos portadores, porque eles se movem dentro e fora da interface do silício e óxido de silício durante o tempo da temporização. A carga gerada é dependente do número de transferências através do EMCCD e não depende do tempo de integração, este é dependente da amplitude do sinal de temporização, taxa da transferência e tempo de temporização. (LOT-ORIEL_GRUPPE, 2004).

A carga de relógio induzida (CIC) é uma fonte de ruído que pode ser omitida em um CCD convencional. O CIC aparece durante a transferência das cargas sobre o dispositivo e são suficientemente baixas para ser descartadas no ruído de leitura do CCD convencional. Em um EMCCD que opera a alto ganho as cargas induzidas apareceram na saída do amplificador como uma transferência normal de elétrons correspondentes de uma imagem, desta maneira serão criadas uns elétrons falsos impossíveis de discriminar e diferenciar dos elétrons coletados pelo dispositivo, originando um ruído na imagem adquirida. (E2V Technologies, 2004)

Se o esfriamento não é suficiente, a *multi phase pinned (MPP)* também pode ser usada. Isso faz que o sistema seja suscetível ao CIC, mas pode-se minimizá-lo escolhendo-se cuidadosamente as condições de operação. Além disso, em

operação MPP, o relógio inverte a superfície do silício, saturando-o com lacunas e aumentando o ruído dentro do dispositivo (DAIGLE, 2006).

2.6.1 Cargas espúrias

Cargas espúrias são geradas quando um CCD é temporizado em modo invertido. Quando é invertido o sinal do canal, lacunas migram desde o final dos canais e são coletadas na parte inferior da porta. (figura 2.27). Quando o sinal de relógio é mudado ao estado não invertido, as lacunas são aceleradas desde a interface Si-SiO₂ com energia suficiente para criar pares elétrons-lacunas por colisão com os átomos de silício (ionização por impacto).

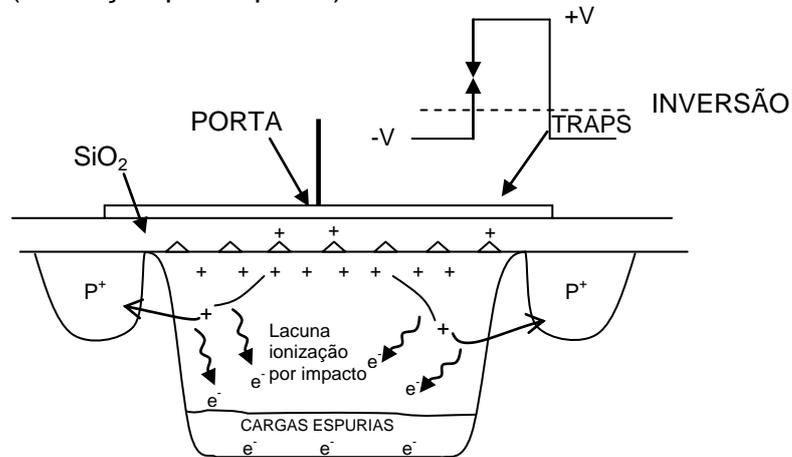


Figura 2.27 - Geração de cargas espúrias (Adaptado de JANESICK, 2001)

As características mais importantes das cargas espúrias são mencionadas a seguir: (JANESICK, 2001)

- As cargas espúrias são geradas pela borda de subida do relógio quando a fase sai da inversão. A borda de descida não tem influência na geração das cargas espúrias.
- As cargas espúrias decrescem exponencialmente com o tempo de subida do sinal de relógio enviando lacunas trás do final dos canais com um movimento rápido, e aumenta exponencialmente com a variação da amplitude do relógio aumentando a ionização por impacto e a geração de cargas espúrias.
- Cargas espúrias aumentam de acordo com a largura do pulso de relógio, quando a largura do pulso é pequena as lacunas permanecerão no estado de interface, reduzindo a ionização por impacto.

- d) Cargas espúrias aumentam com o decrescimento da temperatura de operação. A teoria mostra que a ionização por impacto é mais eficiente a temperaturas frias porque tem melhor mobilidade de portadores.
- e) Cargas espúrias aumentam linearmente com o número de transferências.
- f) O mais crítico, é o desempenho do ruído de leitura. Este fenômeno pode ser caracterizado como ruído de captura, em outras palavras, o ruído aumenta pela raiz quadrada da média de cargas espúrias geradas como:

$$N_{SC}(e^-) = S_{SC}(e^-)^{1/2} \quad (2.26)$$

Onde $S_{SC}(e^-)$ é a média de cargas espúrias ($-e$), e $N_{SC}(e^-)$ é o ruído de captura produzido (rms e^-).

Cinco métodos são utilizados para reduzir as cargas espúrias a valores insignificantes. O método principal usado é simplesmente a forma da onda na temporização. A forma de onda permite capturar as lacunas e retorná-las às regiões do canal às condições de pouco campo elétrico. O segundo método limita a excursão positiva dos sinais de temporização sem diminuir o desempenho do dispositivo (JANESICK, 2001).

No terceiro, a captura de lacunas pode também ser melhorada usando o método “temporização de três níveis”. Esta técnica usa uma tensão de temporização intermediária, que se situa entre o valor máximo e mínimo requerido para realizar uma transferência de carga completa. A tensão intermediária é fixada um pouco acima do estado invertido e mantida o maior tempo possível, permitindo às lacunas retornar ao final do canal a uma condição de baixo campo elétrico.

O quarto método usa pulsos de temporização muito estreitos, onde os elétrons não têm oportunidade de deixar armadilhas e criar cargas. Essa técnica é usada em aplicações de alta velocidade onde a borda dos sinais da temporização deve ser rápida. O quinto método é não inverter o sinal do canal. Os registros horizontais não devem ser invertidos, não obstante há muitas vantagens quando são invertidos os registros verticais, como baixas corrente no escuro e supressão de imagem residual. Os registros verticais são mais lentos que os registros horizontais e podem ser

invertidos sem grandes gerações de cargas espúrias, que depois serão eliminadas por formas da onda do sinal de temporização (JANESICK, 2001).

2.7 Linearidade

Uma das características mais importantes dos EMCCD como detectores astronômicos é sua linearidade, na qual o sinal digital de saída é proporcional à entrada dos fótons recebidos pelo detector. A linearidade significa que há uma relação linear entre o valor de entrada (carga coletada em cada pixel) e o valor de saída (número digital salvo na imagem de saída) (BURKE, 2006; HOWELL, 2006).

O principal objetivo é identificar o nível onde o CCD começa a tornar-se não linear, e com essa informação mantê-lo na faixa linear nos testes para o desempenho e otimização do EMCCD.

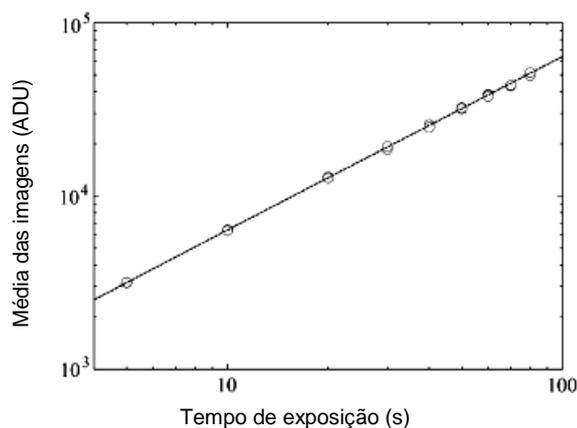


Figura 2.28 - Linearidade de um EMCCD (HOWELL, 2006)

O procedimento para obter as imagens e determinar a linearidade do EMCCD, é aumentar o tempo de exposição dos quadros planos (*flat Field*) até conseguir a saturação do dispositivo. É recomendável que a exposição em saturação seja de um minuto como o mínimo para obter os dados suficientes. O tempo de exposição se expressa como t , tomando uma série de quadros planos com exposições de duração $1.00t$, $0.90t$, $0.80t$, $0.70t$, $0.60t$, $0.50t$, $0.40t$, $0.30t$, $0.20t$, $0.10t$, $0.05t$, $0.025t$, $0.0125t$, $0.00625t$, $0.003125t$ e $0.0015625t$; depois, são usadas as séries das exposições tomadas e calcula-se a média aritmética dos ADUs por pixel. Logo, realiza-se a representação gráfica das médias dos ADU em função do tempo de exposição em segundos (p.ex figura 2.28) (HOWELL, 2006; JANESICK, 2001).

2.8 Eficiência da carga transferida

Os CCDs são totalmente dispositivos de transferência de cargas, idealmente não há perdas no processo de transferência. No funcionamento do dispositivo, porém, 100% da carga transferida não são conseguidas devido às armadilhas (*traps*) resultantes dos materiais semicondutores e processo das lâminas (*wafers*). Conseqüentemente uma pequena quantidade de carga não é transferida e é deixada para trás (JANESICK, 2001).

A eficiência de carga transferida (*CTE*) é a medida da fração de carga que é satisfatoriamente transferida por cada pixel. Os valores típicos de *CTE* para um CCD moderno é 0.999995. Para um CCD de 512x512 pixels, a carga no último pixel da leitura da saída foi deslocada 1024 vezes, deste modo o *CTE* deve ser aproximadamente 100% ($CTE = 1$), para preservar a carga em cada pixel durante a leitura de saída. A perda durante a transferência é dada por CTI (ineficiência de carga transferida), é $1 - CTE$ e numericamente perto a 10^{-5} ou 10^{-6} (HAMAMATSU, 2003).

2.9 Fotodiodo de Avalanche (APD)

Um APD basicamente consiste em um diodo PIN polarizado reversamente, com uma tensão suficiente para que aconteça a multiplicação dos portadores através do efeito de ionização por impacto ou avalanche. Devido a esse mecanismo de multiplicação de elétrons, os APDs podem funcionar com uma área ativa menor, diminuindo a corrente de escuro gerada pelo fotodiodo (STOYKOV et al, 2005).

A eficiência quântica do fotodiodo de avalanche pode ser próxima a 90% devido a o alto ganho interno, onde esses valores podem chegar até 10^4 . Os APD possuem uma alta velocidade dos portadores, com respostas temporais de dezenas de picossegundos (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004). A configuração PIN é utilizada nos APDs para reduzir a variabilidade do ganho entre os diodos fabricados, que poderia surgir devido à não uniformidade da espessura das camadas e das variações nos perfis de dopagem.

Os fotodiodos de avalanche são construídos de forma a incluírem uma região de campo elétrico elevado, que irá acelerar os fotoportadores até uma velocidade suficiente para que as colisões com átomos produzam novos portadores. Estas partículas criadas por ionização são aceleradas por este campo elétrico dando continuidade ao processo de avalanche. Assim, os APD multiplicam (amplificam) internamente a corrente fotodetectada primária (STOYKOV et al, 2005; HAMAMATSU, 2004).

2.9.1 Estrutura do fotodiodo de avalanche

O fotodiodo de avalanche (*APD Avalanche photodiode*) ideal deve ter um valor de zero na corrente de escuro, não gerar ruído, ter uma resposta larga espectral e em frequência, uma faixa do ganho desde 1 até 10^6 ou mais, e baixo custo. Simplesmente o APD ideal poderia ser um bom fotodiodo PIN com ganho.

A estrutura básica dos elementos conformados pelo desenho de uma estrutura ADP é mostrado na figura 2.29, inclui uma região de absorção *A* e uma região de multiplicação *M*. Na região *A* está presente um campo elétrico que serve para separar as lacunas foto-geradas e os elétrons, e varre um portador na direção da região de multiplicação. A região de multiplicação *M* é projetada para ser aplicada a um alto campo elétrico e prover um ganho de foto corrente interna pela ionização por impacto. (PERKINELMER-INC, 2000).

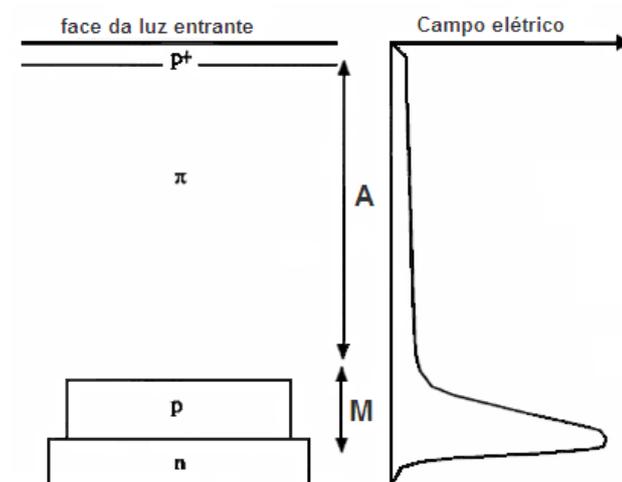


Figura 2.29 - Estrutura "reach-through" o qual oferece a melhor combinação para alta velocidade, baixo ruído e capacitância, e resposta até infravermelho (Adaptado de PERKINELMER-INC, 2000).

Na figura 2.30 é apresentado o esquema da estrutura do fotodiodo de avalanche.

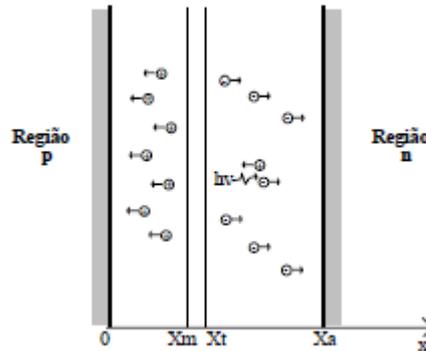


Figura 2.30 - Diagrama da estrutura do APD (GEIRINHAS, P. M. L. A. D. M, 2009)

A junção PN é localizada em $x=0$ e as regiões de multiplicação, transição e de absorção são denotadas por x_m , x_t e x_a . A largura da região de absorção é dada por $W_a = x_a - x_t$. Como estas três regiões estão quase sem portadores móveis, a largura da região de depleção (W_d) é igual à x_a . A dopagem da região de multiplicação n^+ resulta num campo elétrico que descreve uma função triangular com um pico na junção PN ($x=0$), sendo a largura da região de multiplicação muito pequena comparada com a largura da região de depleção total. (GEIRINHAS, P. M. L. A. D. M, 2009).

Como consequência desta estrutura as lacunas secundárias são coletadas numa região P neutra logo que são criadas. Quase todos os elétrons secundários, por seu turno, viajam através da região de depleção antes de serem recolhidos. Como a corrente no circuito exterior resulta da movimentação das cargas através da região de depleção, a contribuição das lacunas secundárias pode ser desprezada.

2.9.2 Princípio da multiplicação por avalanche no fotodiodo de avalanche.

Quando a luz entra no fotodiodo, pares elétrons-lacunas são gerados se a energia da luz é maior que a energia da banda proibida. Energia da luz (E) em (eV) e comprimento de onda (λ) em (nm) têm uma relação particular, tomando a equação (2.1) o comprimento de onda é obtido com a equação (2.27):

$$\lambda = \frac{1240}{E} (nm) \quad (2.27)$$

A banda proibida do silício é 1.12 eV a temperatura ambiente, e este é sensível a comprimento de onda menores que 1100 nm. Essa sensibilidade é comumente

chamada foto sensibilidade (**S**) em (A/W) e eficiência quântica (**QE**) em (%). A foto sensibilidade é a foto-corrente dividida pela potência irradiante incidente expressada em A/W. A eficiência quântica (QE) é a relação de pares elétrons-lacunas gerados versus o número incidente de fótons. Estes dois termos têm a seguinte relação: (HAMAMATSU, 2004)

$$QE = \frac{S * 1240}{\lambda} * 100(\%) \quad (2.28)$$

Quando os pares elétrons-lacunas são gerados na camada de depleção do fotodiodo com uma tensão reversa aplicada na junção PN, os elétrons são desviados na direção de N⁺, enquanto as lacunas desviam na direção do lado P⁺ devido ao campo elétrico desenvolvido na seção da junção PN. A velocidade dos pares elétrons-lacunas desviados ou portadores dependem da intensidade do campo elétrico. Quando o campo elétrico é incrementado até certo nível, os portadores provavelmente colidem com a rede cristalina até que sua velocidade de desvio torna-se uma velocidade média (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004).

Esse fenômeno começa a ocorrer com campos elétricos próximos a 10⁴ V/cm, e o ponto de saturação está ao redor de 10⁷ V/cm. Se a tensão reversa é ainda maior, alguns dos portadores que escaparam da colisão com a estrutura cristalina terão uma grande quantidade de energia. Quando esses portadores colidem com a estrutura cristalina são gerados novos pares elétrons-lacunas originando a ionização (PERKINELMER-INC, 2000).

Estes pares elétrons-lacunas, em seguida, criam pares elétrons-lacunas adicionais em um processo como uma reação em cadeia. Esse fenômeno refere-se à multiplicação por avalanche da foto-corrente, e ocorre com intensidades de campos elétricos de 2 x10⁵ V/cm. Na figura 2.31 é observado o processo de avalanche (HAMAMATSU, 2004; PERKINELMER-INC, 2000).

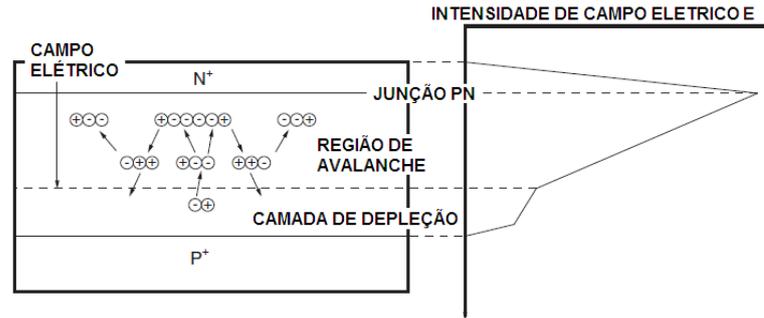


Figura 2.31 - diagrama esquemático do processo de avalanche (Adaptado de HAMAMATSU-TECHNOLOGY)

O número de pares elétrons-lacunas gerados durante o tempo em que os portadores viajam a uma determinada distância, este é referido como a taxa de ionização. A taxa de ionização para elétrons é definida como α_n e para as lacunas como α_p . Estes dois fatores são importantes na determinação da multiplicação por avalanche. A relação k entre α_p e α_n é chamada taxa de ionização e é usado como um parâmetro que indica o ruído do dispositivo.

$$k = \frac{\alpha_p}{\alpha_n} \quad (2.29)$$

2.9.3 Corrente no escuro em função a tensão reversa

A corrente no escuro está presente dentro da corrente de dispersão da superfície (I_{ds}) que flui através da interface entre a junção PN e a camada de óxido de silício e a corrente interna (I_{dg}) gerada dentro do substrato de Si (Figura 2.32).

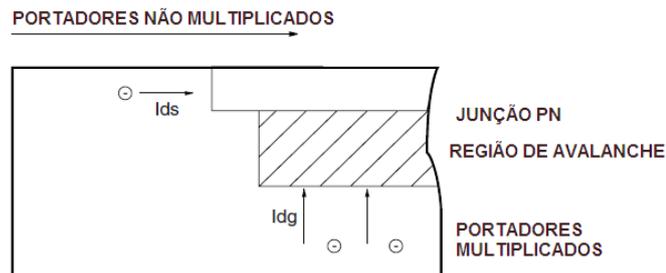


Figura 2.32 - Corrente no escuro do APD (Adaptado de HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004).

A corrente de dispersão da superfície não é multiplicada porque essa não flui dentro da região de avalanche, mas a corrente gerada internamente que flui na região de avalanche é multiplicada. A corrente no escuro total (I_D) produzida é dada por:

$$I_D = I_{ds} + M \cdot I_{dg} \quad (2.30)$$

Onde M é a relação de multiplicação do ganho, I_{ds} é a corrente de dispersão e I_{dg} a corrente gerada no substrato de Si. A figura 2.33 mostra graficamente como a corrente no escuro muda com a tensão reversa, I_{DG} aumenta igualmente a tensão reversa.

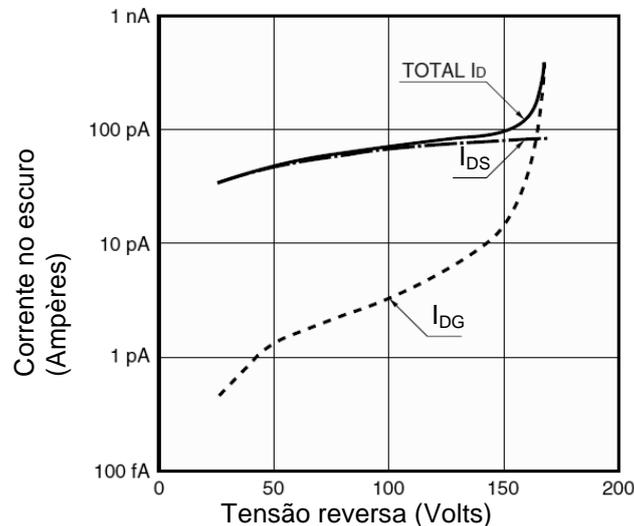


Figura 2.33 - corrente de escuro em função da tensão reversa (HAMAMATSU-TECHNOLOGY,2004)

2.9.4 Ganho em função da tensão reversa

A relação de multiplicação do APD depende do campo elétrico aplicado através da camada de avalanche. Geralmente se o campo elétrico é alto o ganho também será. Se a tensão reversa aumenta ainda mais, uma queda de tensão ocorre devido à corrente que flui através da resistência série do dispositivo e resistência de carga, fazendo com que a tensão aplicada à camada de avalanche diminua. Isto significa que a APD tem um ganho máximo cujo valor depende da fotocorrente. Quando o APD é operado perto desse ganho máximo, a queda de tensão tende a aumentar devido às componentes de resistência em série, resultando em um fenômeno indesejável em que a fotocorrente de saída não é proporcional à quantidade de luz incidente (HAMAMATSU, 2004).

O ganho APD também tem características dependentes da temperatura. O ganho em certa tensão reversa torna-se pequeno com o aumento das temperaturas. Isto ocorre porque a estrutura do cristal vibra mais intensamente com o aumento da temperatura, e os portadores acelerados estão aptos a colidir com a rede antes de

atingir um nível de energia suficiente para provocar a ionização (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004).

Quando um APD é operado em um ganho de 100, o coeficiente de temperatura da tensão reversa será quase igual ao da tensão de ruptura.

2.9.5 Ruído

O processo de multiplicação no APD contém flutuações estatísticas. Quando a tensão reversa é constante, o ganho torna-se constante, não obstante a ionização individual dos portadores não é uniforme devido a que o ruído de multiplicação é adicionado durante o processo de multiplicação. O ruído de captura (In^2) é representado pela seguinte equação (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004).

$$In^2 = 2q(I_L + I_{DG})BM^2F + 2qI_{DS}B \quad (2.31)$$

q: carga do elétron.

I_L : foto-corrente a $M=1$

I_{DG} : componente da corrente no escuro a ser multiplicada.

I_{DS} : componente da corrente no escuro não multiplicado.

B: largura de banda.

M: relação de multiplicação (ganho)

F: fator de ruído.

O fator de ruído (F) pode ser expresso pela relação de multiplicação (M) e a relação da taxa de ionização dos elétrons-lacunas (k) como é mostrada na equação (2.32). (BURILLO, F. R, 1996; HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004)

$$F = Mk + \left(2 - \frac{1}{M}\right) \left(1 - k\right) \quad (2.32)$$

A equação (2.32) mostra o fator de ruído quando os elétrons são injetados dentro da região de avalanche. Para avaliar o fator de ruído quando as lacunas são injetadas dentro da região de avalanche o parâmetro k na equação (2.32) deve ser substituído por $1/k$. Em ótimas condições para diminuir o ruído, k será igual a zero para injeção de elétrons e infinito para a injeção de lacunas. Os fotodiodos de avalanche

construídos com silício usualmente usam a injeção de elétrons na região de avalanche, porque eles têm a relação de $\alpha_n \gg \alpha_p$.

O fator de ruído pode ser aproximado a $F=M^X$, porque a equação (2.31) do ruído de captura pode ser expresso da forma $I_n^2=2qI_LBM^{2+X}$. O expoente X é referido ao índice de ruído.

APDs geram ruído devido ao processo de multiplicação, e o ruído aumenta à medida que o ganho é maior. Uma vez que o ganho mostra uma dependência com o comprimento de onda, o ruído varia de acordo com o comprimento de onda da luz incidente. Da mesma forma, a fotocorrente gerada pelo sinal da luz também é amplificada pelo ganho. Estes fatos indicam que a melhor relação sinal - ruído (S/N) existe para um valor no ganho certo. O S/N para um APD pode ser calculado pela equação (2.33) (KARAR, 1997; HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004:

$$S / N = \frac{I_L^2 M^2}{2q(I_L + I_{DG})BM^2 F + 2qI_{DS} + \frac{4kTB}{R_L}} \quad (2.33)$$

Onde o primeiro e segundo termo do denominador é o ruído de captura, o terceiro termo é o ruído térmico, k é a constante de *Boltzmann*, T é a temperatura absoluta e R_L a resistência de carga.

Na operação de um APD, o S/N pode ser melhorado mantendo uma resposta a alta velocidade, incrementando o ganho até que o ruído de captura atinja um nível igual ao ruído térmico (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004).

2.9.6 Circuito de conexão

APD pode ser conectado da mesma maneira que um fotodiodo normal, exceto pela necessidade de aplicar sobre este uma alta tensão reversa.

Os APD consomem uma quantidade considerável de energia durante a operação, cujo valor é dado pelo produto “*sinal de entrada x sensibilidade x ganho x tensão inversa*”. Para lidar com isso, um resistor de proteção deve ser adicionado ao circuito

de parcialidade ou um circuito limitador de corrente deve ser usado (HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004).

Um circuito de leitura de baixo ruído geralmente tem alta impedância, portanto, um excesso de tensão superior à tensão de alimentação para o circuito de leitura podem eventualmente danificar o primeiro estágio. Para evitar isso, um circuito de proteção deve ser ligado de modo que a tensão excessiva nas entradas seja desviada para a linha de tensão de alimentação, apresentado na figura 2.34.

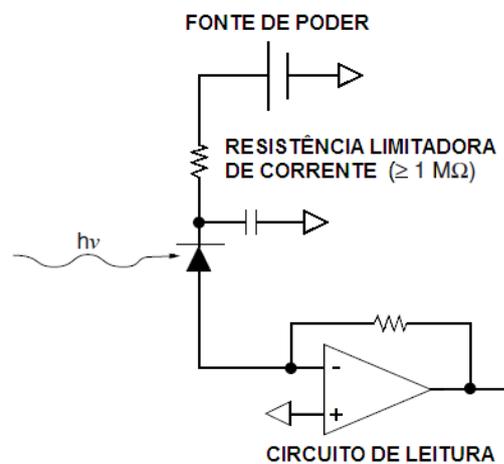


Figura 2.34 - circuito típico de conexão. (Adaptado de HAMAMATSU-TECHNOLOGY, 2004)

3 SISTEMA DE TESTE

Neste capítulo são apresentados as características funcionais dos dispositivos com multiplicação de elétrons por avalanche, a composição e conexão das câmaras escuras, e fonte luminosa que são usados na caracterização.

3.1 EMCCD

O detector usado na caracterização foi o *CCD97*. Este dispositivo é um novo modelo da *e2v Technologies*, e usa um novo circuito amplificador de saída que é capaz de operar com uma saída de baixo ruído, equivalente a um elétron por pixel, a uma taxa de transferência sobre os 11MHz.

O sensor tem dois amplificadores de saída, um de ruído baixo e alta resposta na transferência de dados à saída para a operação normal do CCD, além um amplificador maior de sinal de alto ganho de multiplicação. A operação no modo do alto ganho é controlada e fixada por ajustamento da amplitude da fase de multiplicação, nomeada $R\Phi 2HV$. O diagrama esquemático do *chip* é apresentado na figura 3.1(E2V-TECHNOLOGIES, 2004).

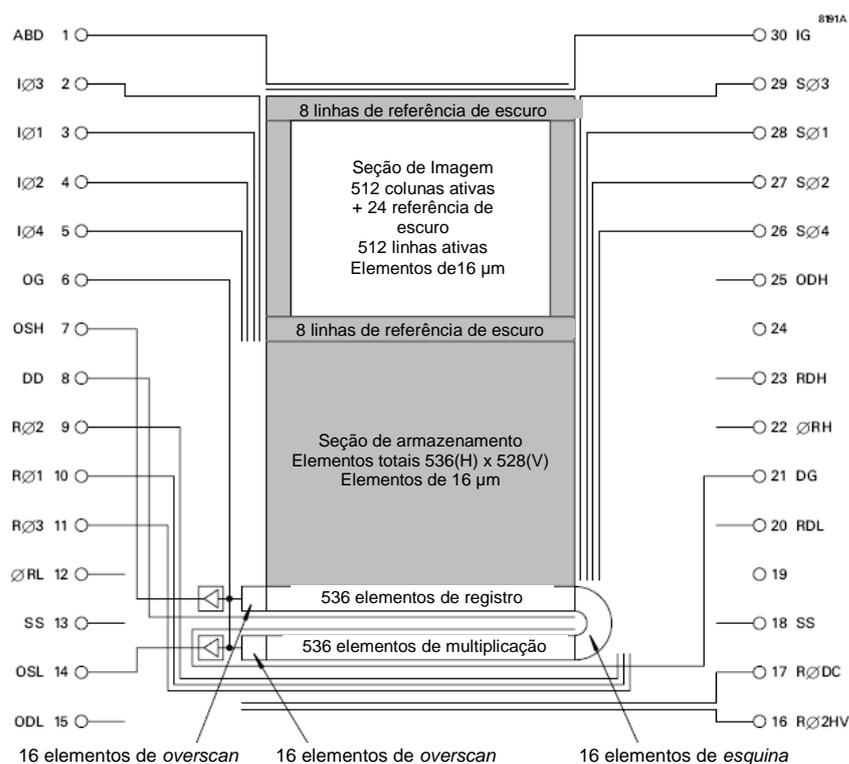


Figura 3.1 - Diagrama esquemático do *chip* CCD97 E2V-TECHNOLOGIES, 2004

O sistema de teste é o conjunto de equipamentos e conexões para o dispositivo EMCCD ou APD. Este sistema facilita e obtém as melhores medições para uma correta caracterização e otimização. O sistema de teste está composto de uma fonte luminosa constante de intensidade variável, uma câmera de teste para a montagem do dispositivo detector, um controlador de temperatura conectado ao detector e uma câmara escura para obter uma iluminação concentrada e enfocada para a câmera de teste.

Para um ótimo funcionamento e esfriamento do EMCCD é necessário aplicar um alto vácuo dentro da câmara de teste, esse vácuo é feito por meio de uma bomba de vácuo mecânica em conjunto de uma bomba turbo molecular para obter valores baixos de pressões, da ordem de $1,33 \times 10^{-8}$ Bar. Além disso, é construída uma câmara escura (*light Box*) para uma ótima aquisição da imagem na caracterização do dispositivo, obter uma maior confiabilidade e precisão nos testes.

3.2 Fotodiodo de avalanche

O fotodiodo de avalanche caracterizado é fabricado pela Advanced Fotonics com número de referência 012-70-62-541 e com diâmetro de região ativa de 0.3 mm. Nas figuras 3.2 e 3.3 são apresentadas algumas especificações físicas e óticas do fotodiodo de avalanche.

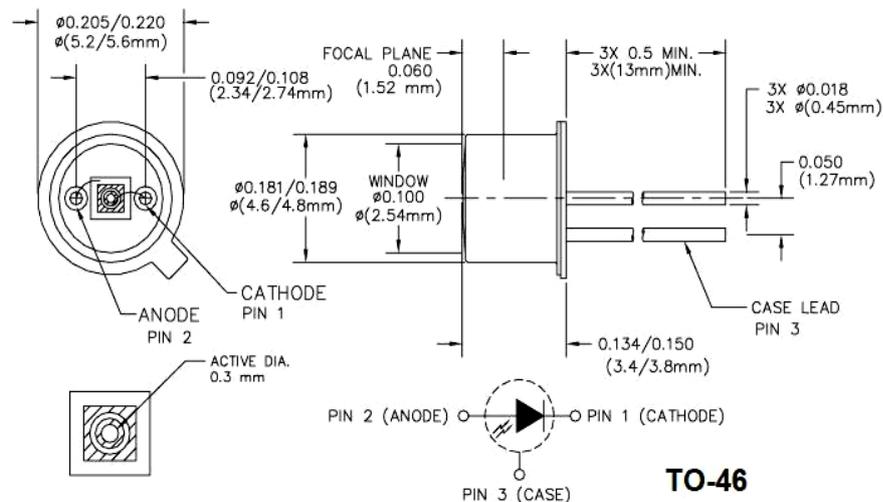


Figura 3.2 - Diagrama das especificações físicas do fotodiodo de avalanche (ADVANCED-PHOTONICS, 2006)

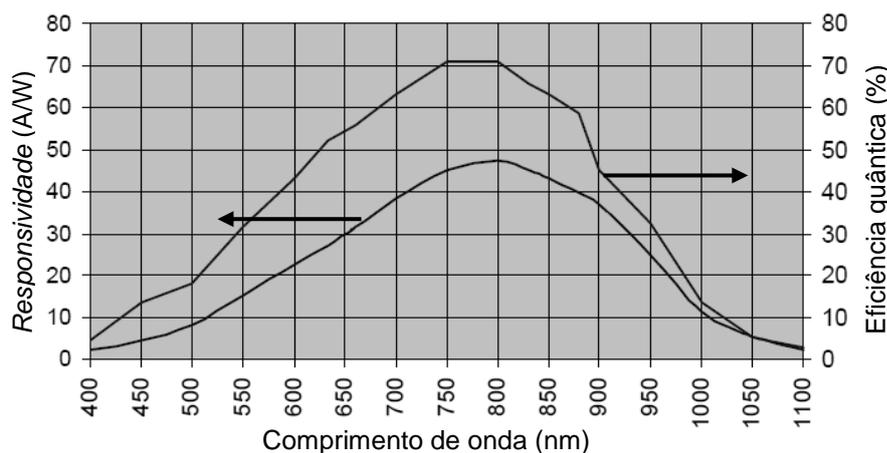


Figura 3.3 - Resposta espectral típica do fotodiodo de avalanche 012-70-62-541 (Adaptado de ADVANCED-PHOTONICS, 2006)

Para realizar as medições na caracterização do fotodiodo de avalanche é necessário criar uma câmara escura para o fotodiodo de avalanche e o diodo emissor de luz a diferentes comprimentos de onda, garantindo que não exista nenhuma interferência de luz incidente do ambiente externo. A montagem desses dispositivos ópticos na câmara escura é mostrada na figura 3.4

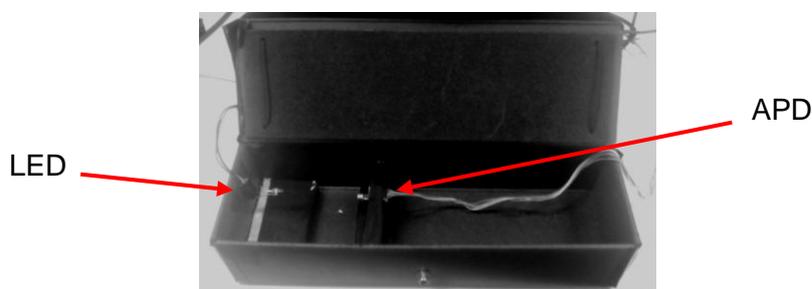


Figura 3.4 - Câmara escura para medições no fotodiodo de avalanche

A distância entre o LED e o fotodiodo é de 6 cm sendo essa distância a utilizada para todas as medições. Esse valor de 6 cm é um aleatório. O primordial é que o fotodiodo de avalanche tenha uma absorção dos fótons emitidos e gerar uma boa fotocorrente para ser medida.

3.3 Fonte luminosa de intensidade constante.

A fonte luminosa tem o princípio de uma fonte convencional de corrente variável. Constituída principalmente por um amplificador operacional de baixo ruído, neste caso o *OP-177*, também possui um regulador de tensão de alta precisão como o *AD587* e um transistor Mosfet *BSS138*. Todos esses dispositivos controlam e variam

a corrente que circula nos *LEDs*. Os *LEDs* geram e emitem a luz de diferentes cores para o detector EMCCD, estes são verde, amarelo e vermelho. Para o fotodiodo de avalanche são: amarelo, verde, azul, ultravioleta, vermelho e infravermelho; localizados no interior da câmara escura do sistema de teste.

O resistor $R1=10k\Omega$ tem a função de controlar a intensidade da luz emitida sobre cada *LED*, variando-se a tensão de referência sobre o amplificador operacional, e $R7=10k\Omega$ controla a corrente máxima que circula em cada *LED*. Na fonte há uma chave sobre a conexão de cada *LED* para controlar o ligamento e as possíveis combinações das cores que serão aplicadas ao dispositivo fotodetector de teste, seja esse *EMCCD* ou *APD*. A Figura 3.5 mostra o circuito desta fonte de corrente.

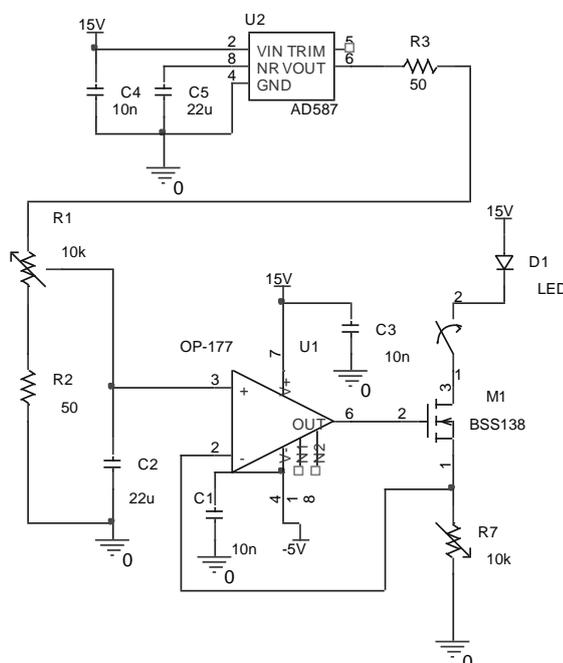


Figura 3.5 - Fonte de corrente variável. Seção somente para um LED

3.4 Câmera do EMCCD com célula Peltier, TESTDEWAR

A câmara para testar o EMCCD é construída em alumínio com proteções nos diferentes acopladores para evitar vazamentos. A câmara possui ainda sensores de temperatura colocados perto do detector EMCCD e da célula Peltier. Também uma placa eletrônica onde é instalado o *chip* EMCCD. Chegam nessa placa os sinais para a temporização e controle da temperatura do EMCCD. A refrigeração da câmara é composta por: um quadro de alumínio e um acoplador térmico construído

em cobre para transferir o calor produzido pelo EMCCD e uma célula Peltier utilizada para extrair o calor gerado pelo EMCCD e refrigerar o dispositivo.

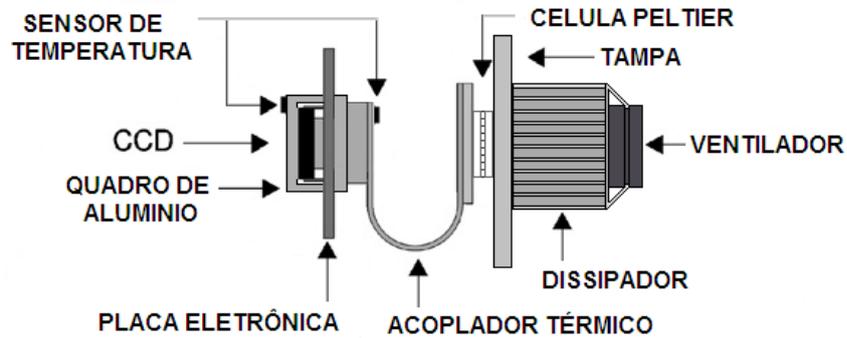


Figura 3.6 - Câmera de teste com célula Peltier

Essa câmara tem um acoplador KF16 para conectar a mangueira instalada em uma bomba de vácuo e extrair todo o ar de dentro da câmara garantindo uma pressão baixa para realizar os testes na caracterização do dispositivo. A câmara é instalada sobre uma câmara escura para ter uma iluminação direcionada para o dispositivo. O desenho desta câmara é apresentado na figura 3.7

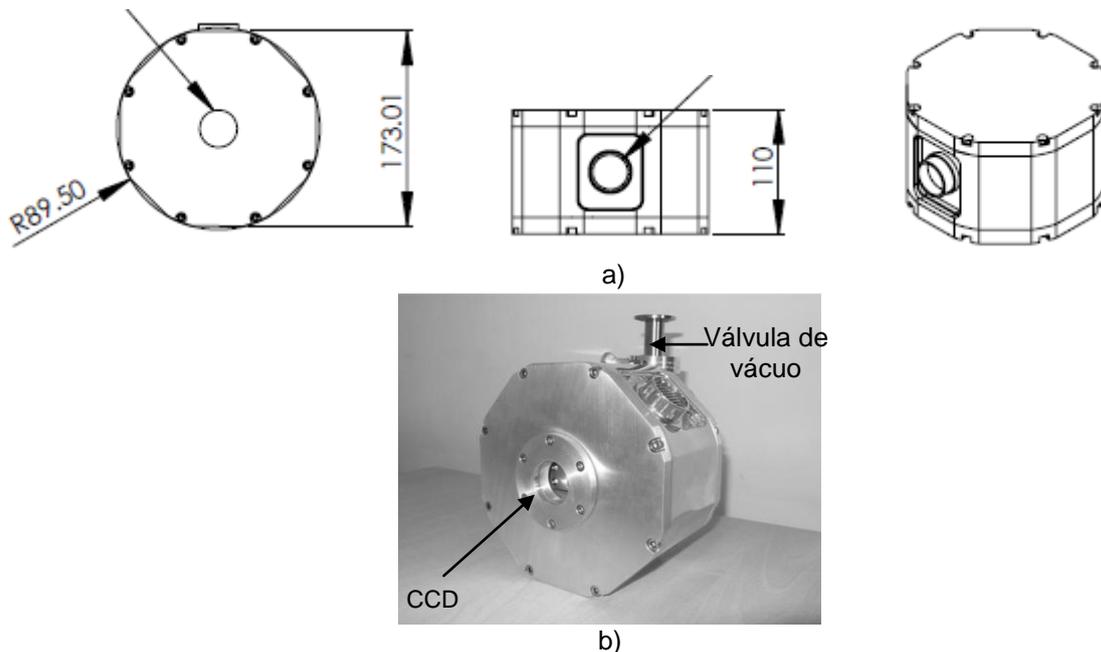


Figura 3.7 – a) Desenho do Testdewar ,b) Fotografia do Desenho do Testdewar

Na parte exterior da câmara estão conectados uma válvula para controlar o fluxo do vácuo na câmara, um dissipador de calor e um ventilador extrator para retirar a alta temperatura dissipada pelo funcionamento do dispositivo EMCCD, um conector de 55 pinos para fazer conexão à placa eletrônica, e, um conector de 6 pinos para a conexão dos sensores. Nas figuras 3.8 e 3.9 são mostradas a placa eletrônica,

sensores de temperatura, acoplador térmico e célula Peltier que compõem a câmera.

O esfriamento é feito por uma célula Peltier a qual a refrigeração não consegue temperaturas muito baixas em comparação com outras câmeras de teste. Com uma célula Peltier idealmente consegue-se temperaturas de até -20°C .

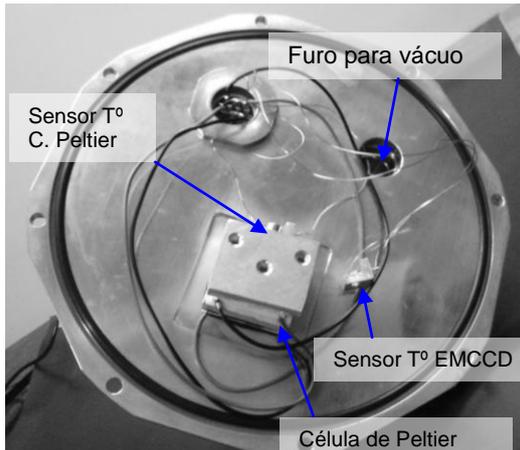


Figura 3.8 - Tampa da câmera.

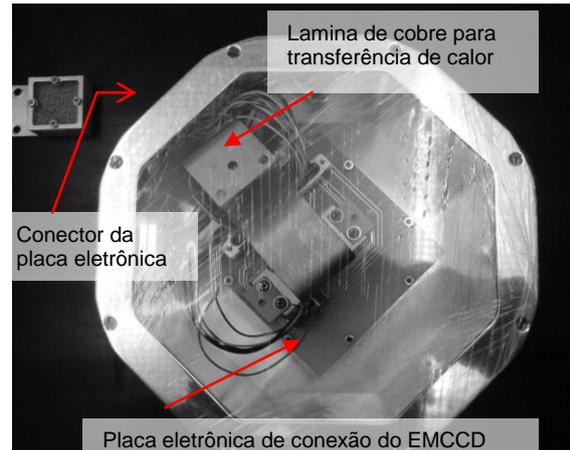


Figura 3.9 - Corpo da câmera do teste

A remoção de temperatura neste tipo de câmera resfriada por Peltier é composta por: uma lâmina de cobre, um dissipador de calor, uma célula Peltier e um ventilador extrator. As conexões desses elementos são mostradas na figura 3.6

3.5 Câmera de teste com dedo frio

Devido a não existência de um acoplamento térmico perfeito para a refrigeração com a célula Peltier foi feita uma modificação no sistema de refrigeração substituindo a célula Peltier por um dedo frio esfriado com nitrogênio líquido mostrado na figura 3.10. Além disso, foi necessário incluir um aquecedor para realizar o controle da temperatura sobre o detector EMCCD.

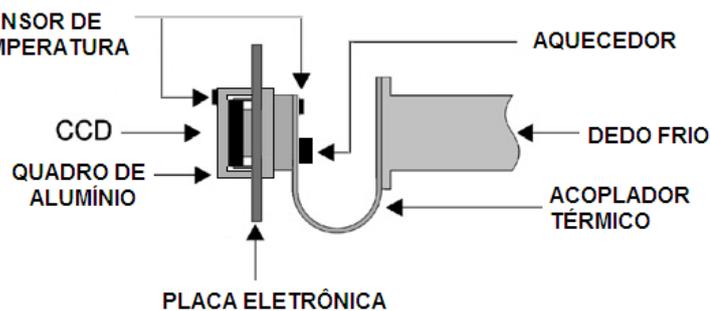


Figura 3.10 - Câmera de teste com dedo frio

Com esta modificação foi possível atingir temperaturas de até -140°C . Essa temperatura é controlada pelo aquecedor e um controlador eletrônico para manter a temperatura constante sobre o dispositivo detector.

A parte exterior da câmera foi modificada. O dissipador e o ventilador foram substituídos por um recipiente para o nitrogênio líquido e um conector dos sensores. Nesse conector foram agregados fios que se ligam ao aquecedor.

Nas figuras 3.11 e 3.12 são apresentados os elementos que constituem a câmera de teste com dedo frio. A conexão eletrônica do EMCCD manteve-se, foi modificado apenas o sistema de remoção de calor. Adaptou-se um acoplador do dedo frio para a superfície dissipadora de calor do CCD e um resistor cuja função é manter uma temperatura de operação constante sobre o detector.

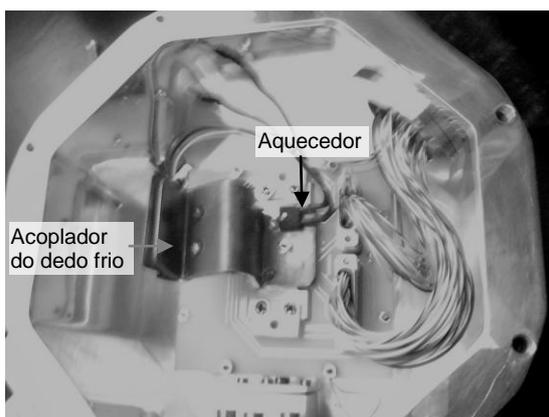


Figura 3.11 - Interior da câmera.

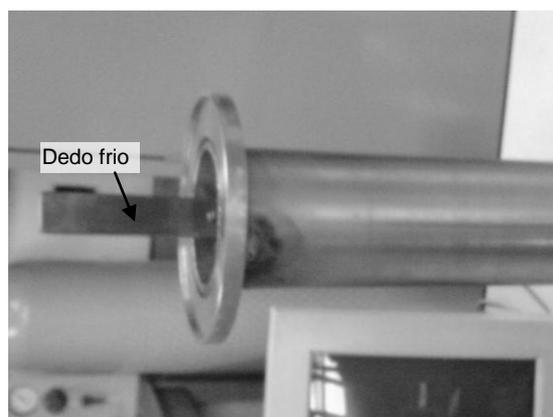


Figura 3.12 Recipiente de nitrogênio líquido e dedo frio

A seção do dedo frio é composta por uma lâmina construída em cobre que transfere o calor gerado pelo dispositivo detector, e por um recipiente para o nitrogênio líquido com uma capacidade aproximada de 1000 cc.

3.6 Câmara escura

A câmara escura (*light Box*) é construída em madeira e feita sob medida, para instalar a câmera de teste do EMCCD. A câmara escura é totalmente escura e preta no interior para que não existam interferências e refrações de luz externa que afetem a confiabilidade e precisão das medições. O desenho com as dimensões da câmara estão na figura 3.13

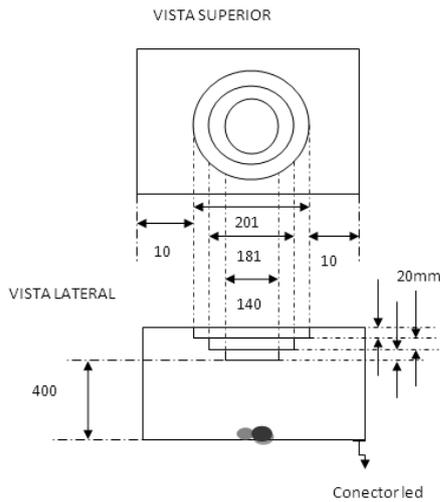


Figura 3.13 - Desenho e fotografia da câmara escura para a câmara do EMCCD para os testes.

Os testes na câmara foram realizados em diferentes condições. Inicialmente é colocado o detector na câmara de teste sobre a câmara escura com a matriz de LEDs desligada. Assim, é possível realizar a medição das propriedades de corrente de escuro (*Dark Current*) e o ruído da leitura. Depois se ligando a matriz dos LEDs com uma intensidade luminosa controlada pode-se medir as propriedades da linearidade e ganho de multiplicação do dispositivo. Dessa forma são encontrados os melhores parâmetros para o desempenho e otimização do dispositivo, e pode-se compará-los com os gráficos fornecidos pelo fabricante.

4 ENSAIOS NO SISTEMA DE TESTE DOS FOTODETECTORES

No sistema de teste para a caracterização e otimização do EMCCD, é necessário fazer testes e medições sobre os elementos que o conformam, garantindo uma estabilidade do funcionamento desses elementos e confiabilidade nos dados adquiridos para a caracterização. A seguir são mostrados todos os ensaios iniciais sobre os componentes do sistema de teste e a montagem dos mesmos.

4.1 Montagem dos componentes

É apresentada a montagem dos componentes que compõem o sistema de teste para o EMCCD. São feitos alguns testes iniciais para a comprovação da estabilidade do funcionamento dos mesmos.

4.1.1 Montagem da fonte de luz constante

Os testes são inicialmente realizados na fonte de corrente com luz variável (Figura 4.1), para verificar a estabilidade da intensidade da luz emitida ao EMCCD. Os testes foram feitos com um sensor óptico e um medidor óptico modelo 1835-C da Newport Corporation, com uma precisão de $\pm 0.0001 \text{ nW/cm}^2$, e em cada cor de LED o dispositivo de medida deve ser calibrado para cada comprimento de onda, obtendo uma medição com maior precisão.

Inicialmente os testes começaram com a ligação do circuito à intensidade da luz máxima para verificar se existia algum aquecimento nos LEDs, porque esse calor pode variar a estabilidade da luminosidade emitida pela fonte a longo tempo de ligação. Uma solução para prevenir um possível aquecimento é adicionar uma lâmina em alumínio preto sobre as superfícies dos LEDs.



Figura 4.1 - Fonte de luz constante.

Depois é medida a intensidade luminosa em unidades de nW/cm^2 sobre cada cor de LED durante duas horas, com intervalos de medida de tempo a cada dez minutos, apresentando uma estabilidade na intensidade luminosa emitida com uma variação depreciable de $0.002nW/cm$. Além disto, a medida da intensidade é feita em relação a cada comprimento de onda equivalente a cada cor do LED. Os valores de comprimento de onda utilizados foram extraídos das folhas de dados do fabricante de semicondutores, e esses dados foram comprovados com um sistema monocromador. Os comprimentos de onda dos LEDs usados neste teste são: Verde (570 nm), amarelo (590 nm) e Vermelho (660 nm), a montagem para esta medição está na figura 4.2.



Figura 4.2 - Montagem para medir a estabilidade da luz constante.

Sendo comprovada a estabilidade da intensidade luminosa, é feita a medida indireta da energia emitida pelos LEDs. Tomando a equação (4.1), é possível encontrar um valor estimativo da energia ($E(t)$) usando a medida integral de potência luminosa ($W(t)$) mostrada pelo dispositivo de medida em um intervalo por unidade de tempo. Os dados obtidos são mostrados nos gráficos 4.3 e 4.4, e são equivalentes à função da energia em relação ao tempo (NEWPORT-CORPORATION, 1993).

$$E(t) = \int_1^2 W(t) \cdot dt \quad (4.1)$$

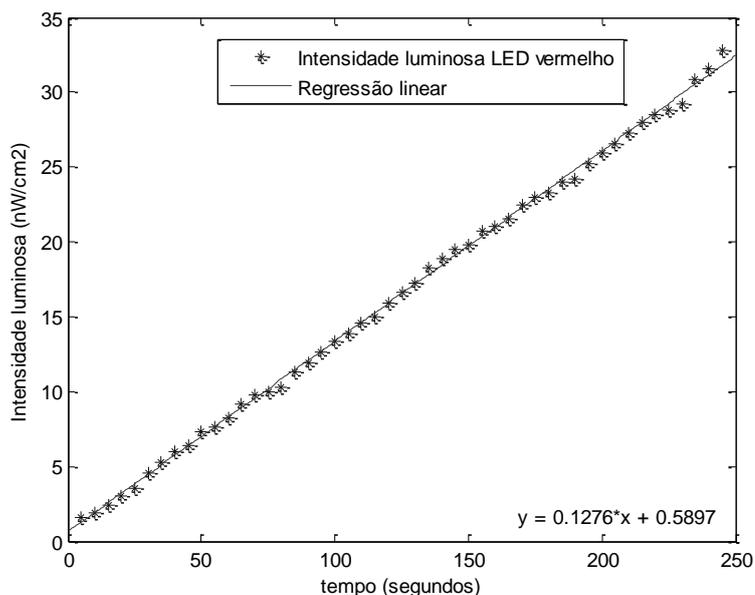


Figura 4.3 - Intensidade luminosa para LED vermelho em função com o tempo.

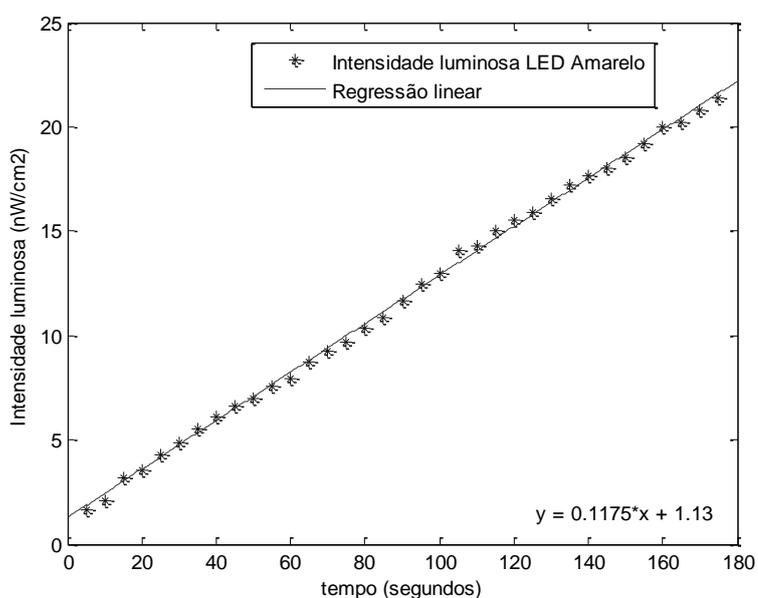


Figura 4.4 - Intensidade luminosa para LED amarelo em função do tempo.

Com as figuras 4.3 e 4.4, é possível comprovar a linearidade da fonte luminosa, já que a emissão de fótons em direção a o EMCCD tem uma relação proporcional com o tempo.

Tomando a equação (4.1):

Para o LED laranja em um tempo de 0 a 245 segundos o valor da energia é:

$$E = 9794,22 \text{ nJ} / \text{cm}^2$$

Para o LED vermelho em um tempo de 0 a 175 segundos o valor de energia é:

$$E = 3976,18 \text{ nJ} / \text{cm}^2$$

No seguinte gráfico é mostrada a variação da corrente dos LEDs em função do movimento do potenciômetro para cada LED, os gráficos apresentam uma mudança aproximadamente linear da corrente com o movimento do potenciômetro.

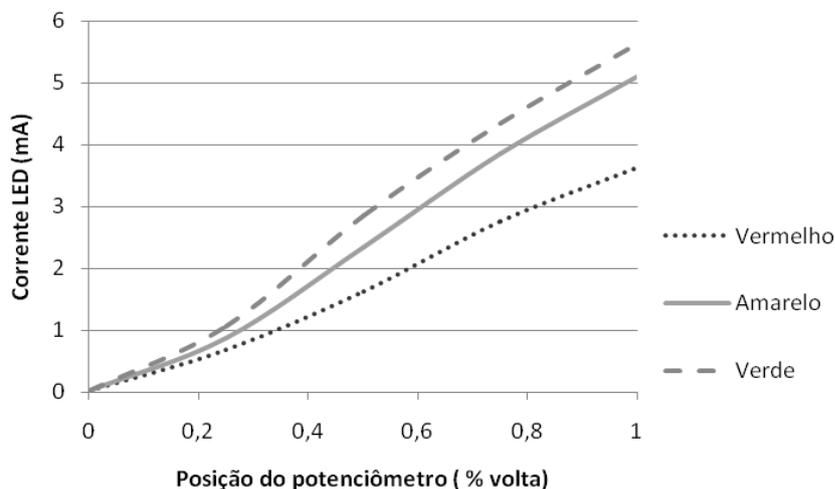


Figura 4.5 - Variação da corrente em função da posição do potenciômetro de controle

Uma melhor maneira de comprovar a linearidade é fazer a medição da tensão de referência aplicada ao circuito conversor de tensão em corrente, e relacioná-la com a corrente entregue a cada LED. A medida da tensão foi feita sobre o potenciômetro R1, e a medida da corrente entre o interruptor e o cátodo do LED (observar figura 3.2). As medidas foram feitas à temperatura constante de 25°C.

O gráfico desta relação é apresentado na figura 4.6, que mostra a relação dos três LEDs e a equação da linha de tendência, verificando a linearidade da fonte de corrente aplicada aos LEDs.

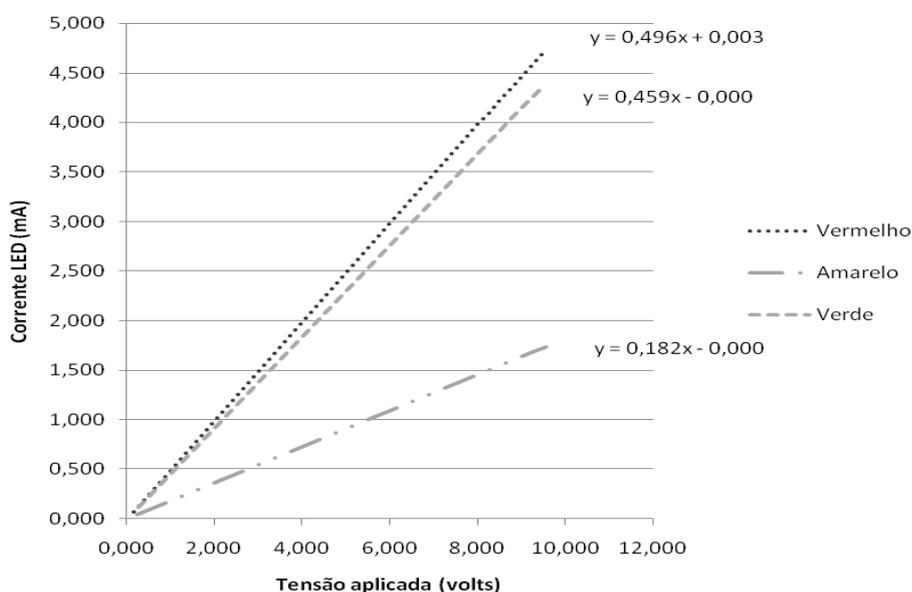


Figura 4.6 - Relação da tensão de referência com a corrente dos LEDs

Na figura 4.7 mostra-se um gráfico onde foi medida a intensidade luminosa sobre cada LED em relação à corrente aplicada. Esta medida é realizada a uma temperatura de 25° C que se manteve constante durante a medição toda. O LED vermelho apresentou uma intensidade luminosa alta (da grandeza de 450nW/cm²) com um valor pequeno de corrente de 4,75mA, caso contrário do verde, que para um valor alto de corrente (de 11,8mA) apresentou um valor baixo de intensidade luminosa (de 89nW/cm²) em relação ao vermelho. Pode-se concluir sobre os LEDs que a um comprimento de onda menor a intensidade luminosa é também menor, e, além disso, é inversamente proporcional ao valor de corrente aplicada.

Uma pequena análise pode ser feita escolhendo-se um valor de corrente, que neste caso foi 4 mA, e coletando-se a medida de intensidade luminosa para cada LED com este valor de corrente. Os valores são comparados na tabela 4.1. Claramente é observada a luminosidade forte do LED vermelho e a fraca do LED verde.

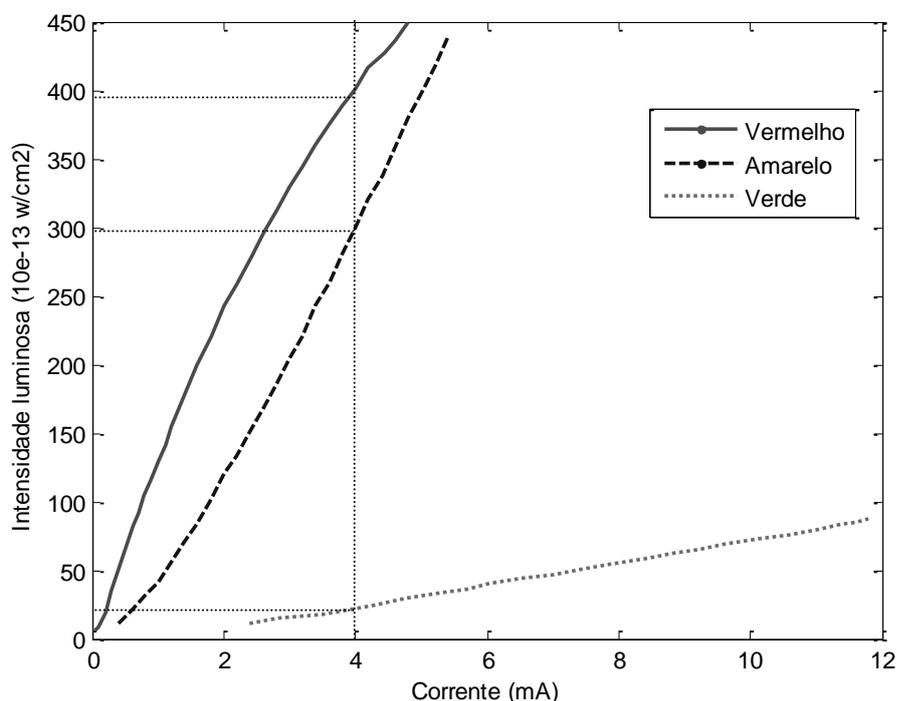


Figura 4.7 - Relação da intensidade luminosa com a corrente de cada LED

Tabela 4.1. Comparação da intensidade luminosa dos LEDs a um valor de corrente de 4mA.

LED	Intensidade Luminosa 10 ⁻¹³ w/cm ²
Vermelho	400
Amarelo	300
Verde	25

Na fonte luminosa a quantidade de fótons emitidos foi medida usando um espectrofotômetro composto por um monocromador da JOBIN YVON modelo HR460 e um CCD de 256 x1024 pixels, esta medida foi feita de forma relativa. A seguir será mostrada uma série de figuras que incluem a contagem de fótons em relação ao comprimento de onda, com um tempo de exposição até que fosse possível adquirir uma medida sem saturação do equipamento monocromador. As figuras 4.8 4.9 e 4,10 com seções (a) até (d) estão diferenciadas para a cor de LED vermelho, amarelo e verde, corrente aplicada e tempo de exposição, e, em cada gráfico há uma tabela com os tempos de exposição medidos facilitando sua compreensão.

Vermelho

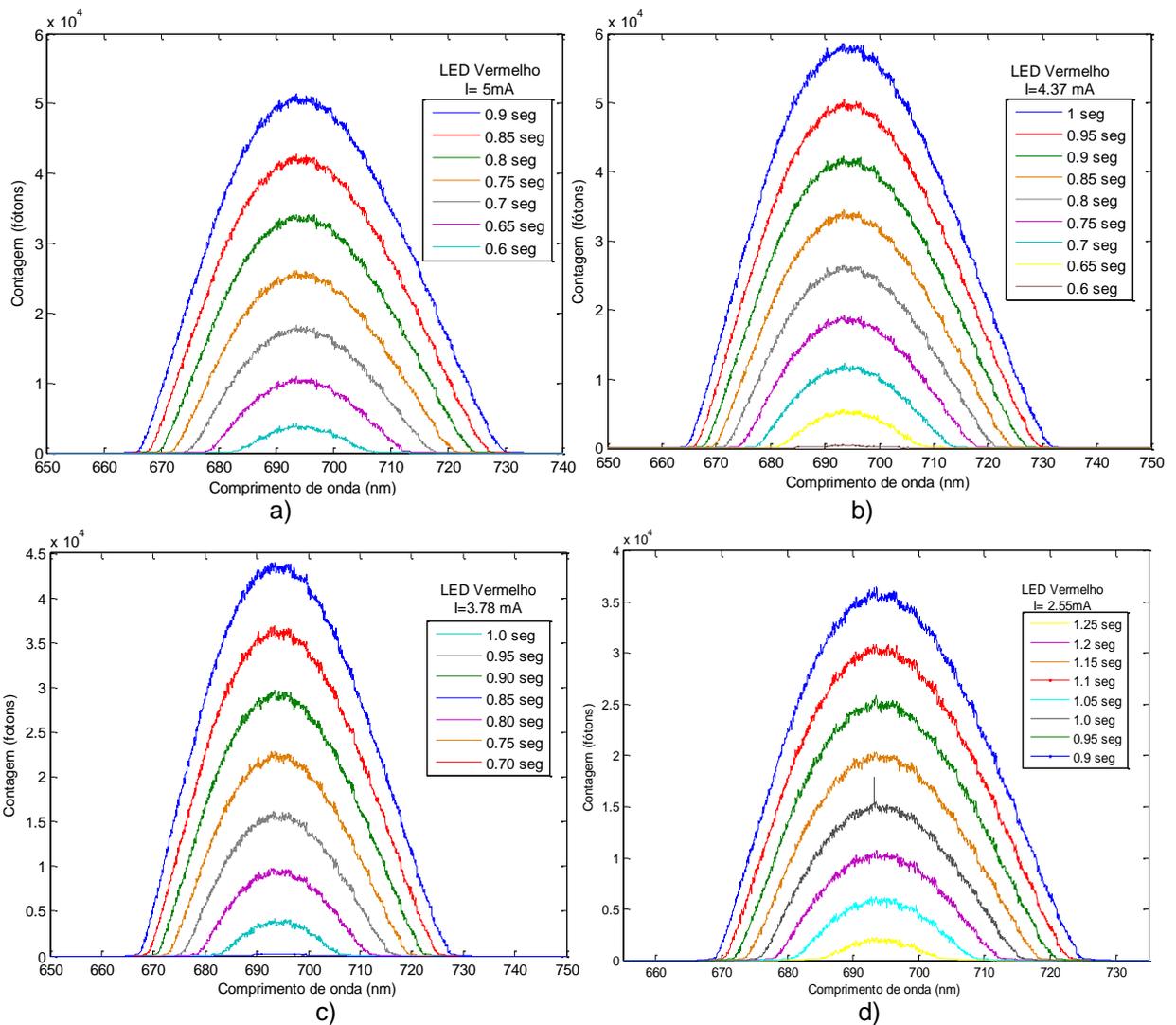


Figura 4.8 - Medida da contagem de fótons em relação ao comprimento de onda e tempo de exposição para o LED vermelho a) para corrente $I=5\text{mA}$, b) para corrente $I= 4.37\text{mA}$, c) para corrente $I=para 3.78\text{mA}$, d) para corrente 2.55mA .

Amarelo

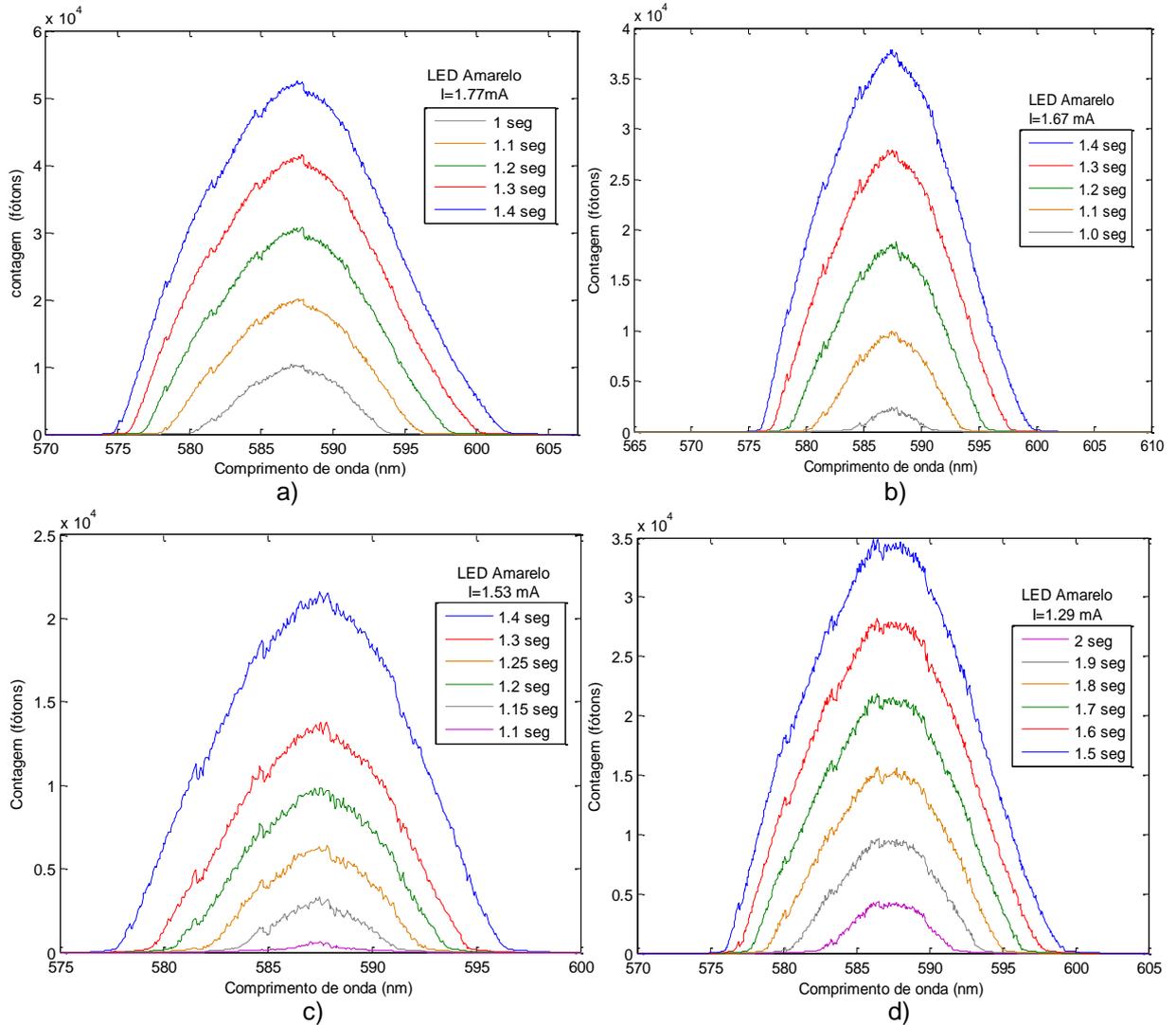
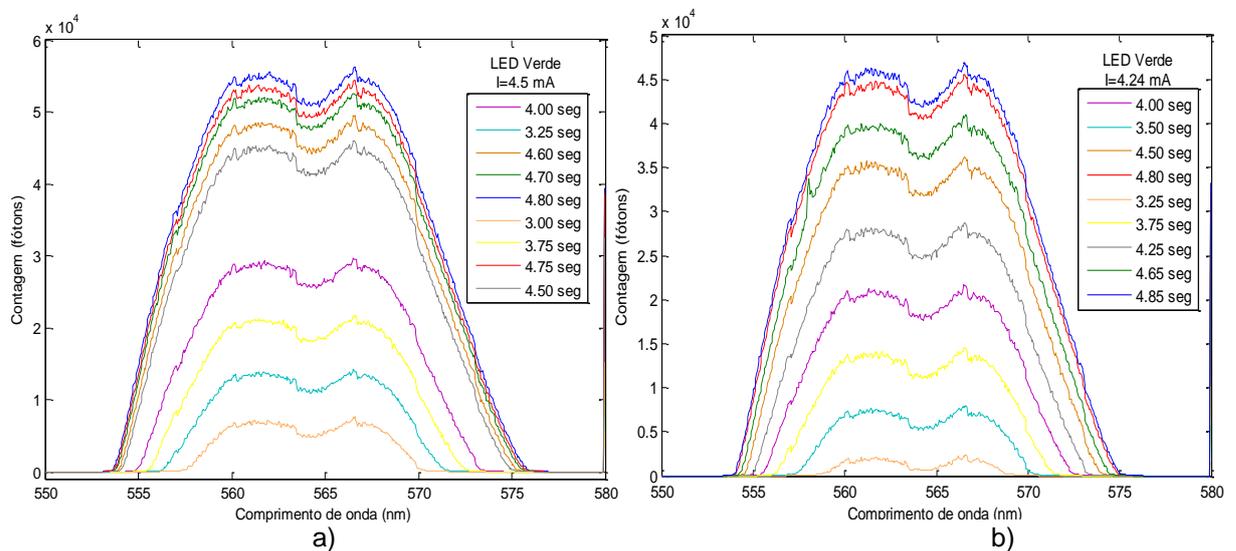


Figura 4.9 - Medida da contagem de fótons em relação ao comprimento de onda e tempo de exposição para o LED amarelo. a) para corrente $I = 1.77 \text{ mA}$, b) para corrente $I = 1.67 \text{ mA}$, c) para corrente $I = 1.53 \text{ mA}$, d) para corrente $I = 1.29 \text{ mA}$.

Verde



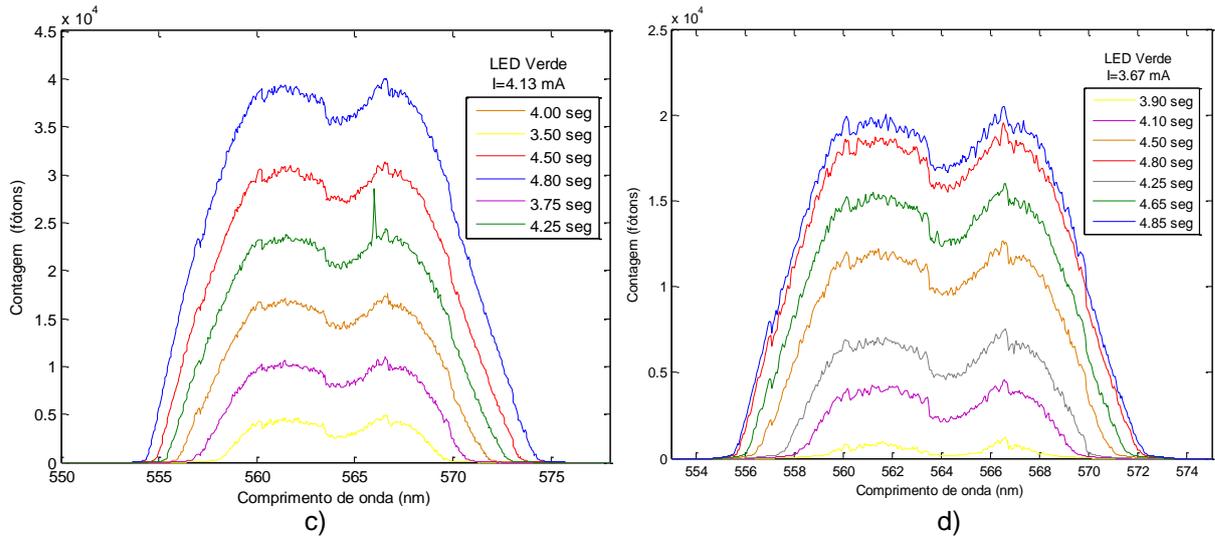


Figura 4.10 - Medida da contagem de fótons em relação ao comprimento de onda e tempo de exposição para o LED verde, a) para corrente $I=4.5\text{mA}$, b) para corrente $I= 4.25\text{mA}$, c) para corrente $I=para 4.13\text{mA}$, d) para corrente 3.67mA .

Para encontrar uma relação entre a contagem de fótons e a corrente de cada LED, foram usados os gráficos obtidos com ajuda do monocromador a um valor de tempo de exposição comum e com diferentes valores de corrente aplicada gerando as figuras 4.11, 4.14, 4.17, 4.20 e 4.23.

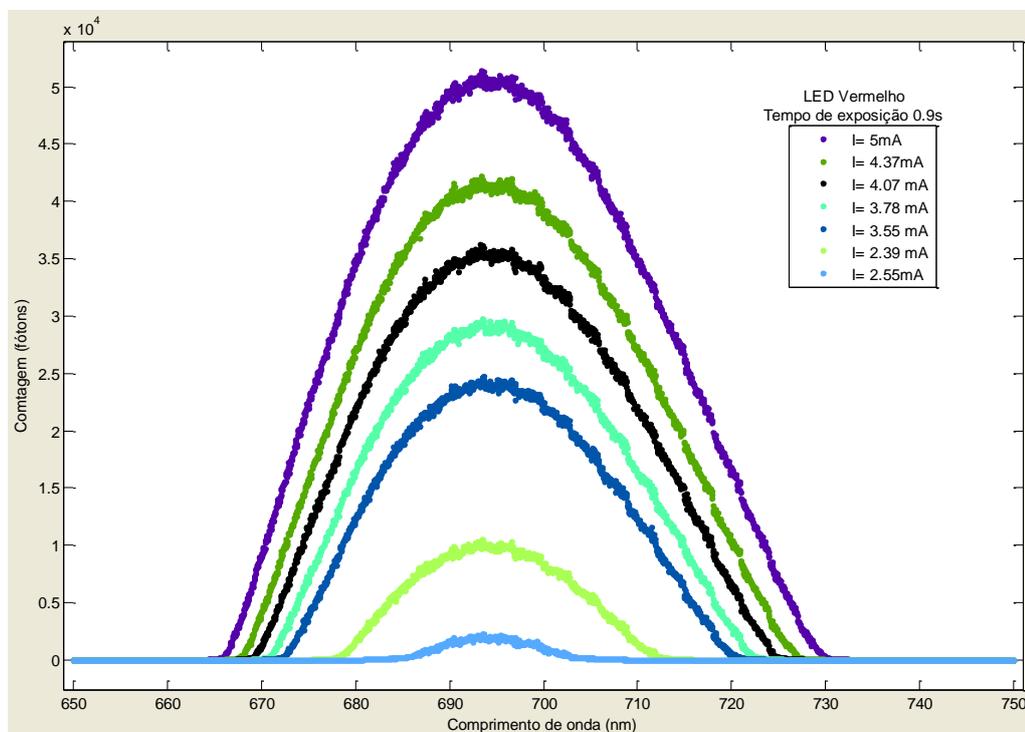


Figura 4.11 - Gráficos do LED vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 0.9 s.

Tomando as figuras nomeadas anteriormente é feito uma regressão gaussiana e obtêm-se gráficos que facilitam a análise dos dados, mostrados nas figuras 4.12, 4.15, 4.18, 4.21 e 4.24.

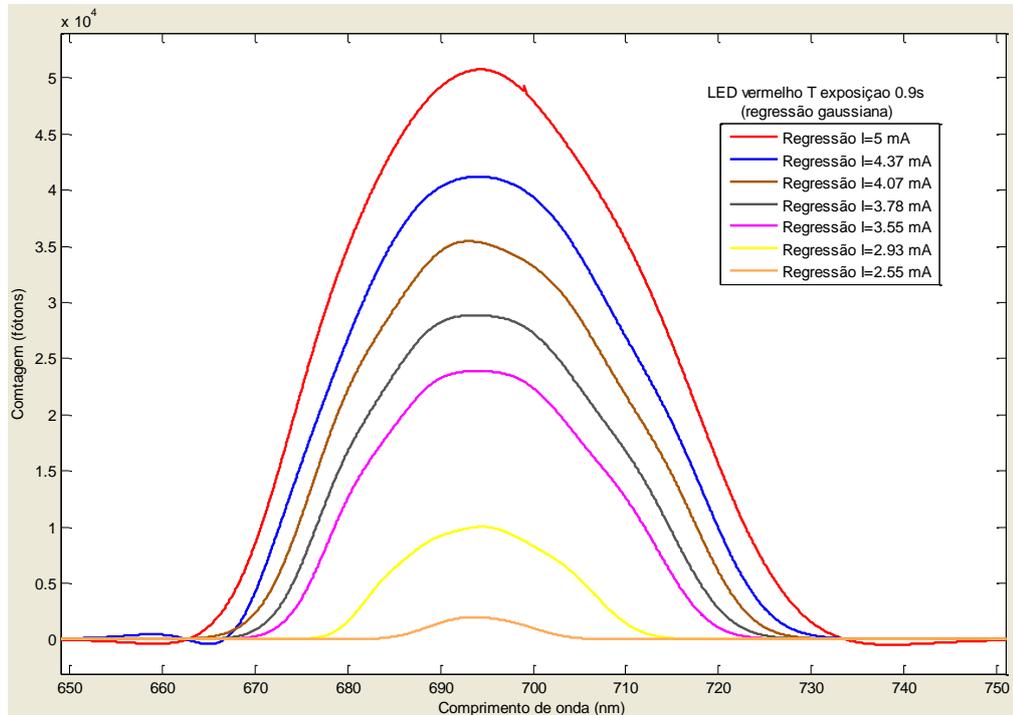


Figura 4.12 - Gráficos com regressão gaussiana do LED vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda.

Tomando os valores máximos dos gráficos das figuras com regressão gaussiana, referente à da contagem de fótons a um mesmo comprimento de onda (que no caso do LED vermelho foi 694 nm), foi gerada a relação da contagem de fótons em relação à corrente do LED, (ver figura 4.13).

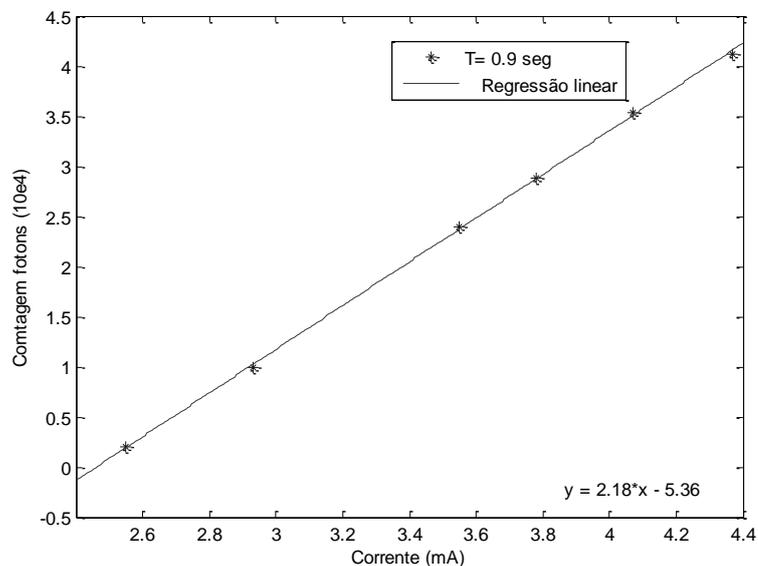


Figura 4.13 - Relação da contagem de fótons em função da corrente para o LED vermelho com um tempo de exposição de 0,9 s.

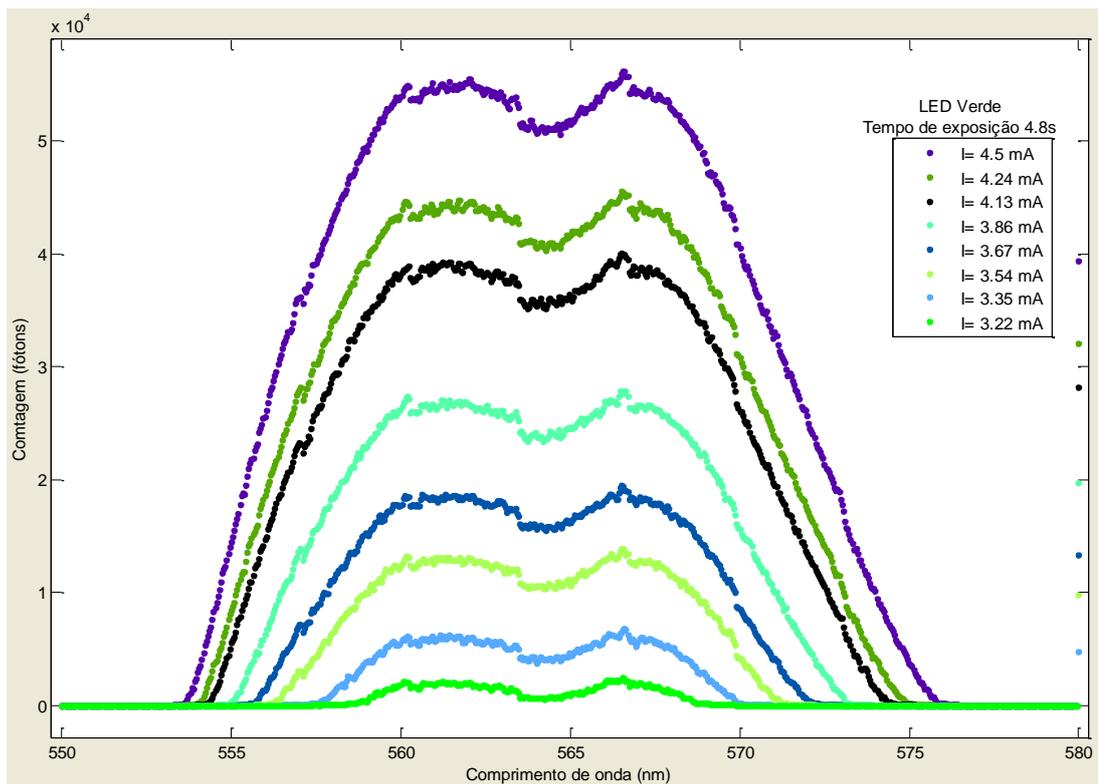


Figura 4.14 - Gráficos do LED verde da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 4.8 s.

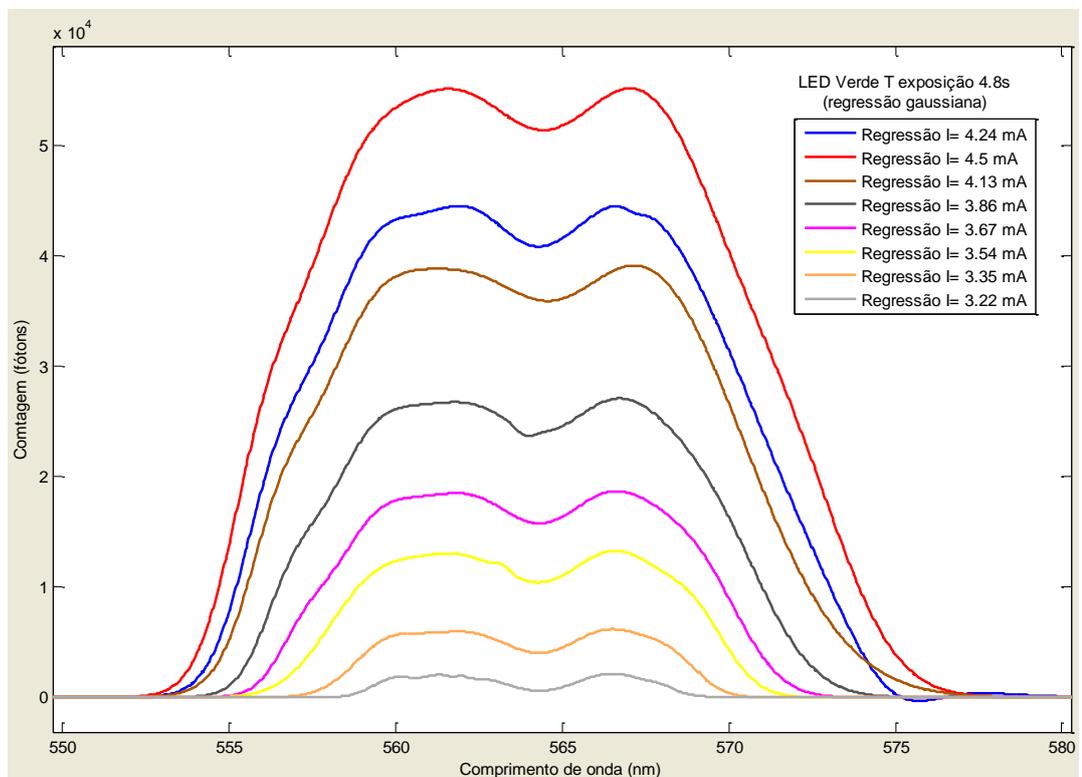


Figura 4.15 - Gráficos com regressão gaussiana do LED verde da contagem de fótons em função do comprimento de onda.

O LED verde apresenta dois comprimentos de onda fundamentais, 562 e 567 nm, mas foi utilizado apenas o valor 562nm. Os valores máximos nos dois comprimentos de onda são aproximadamente iguais.

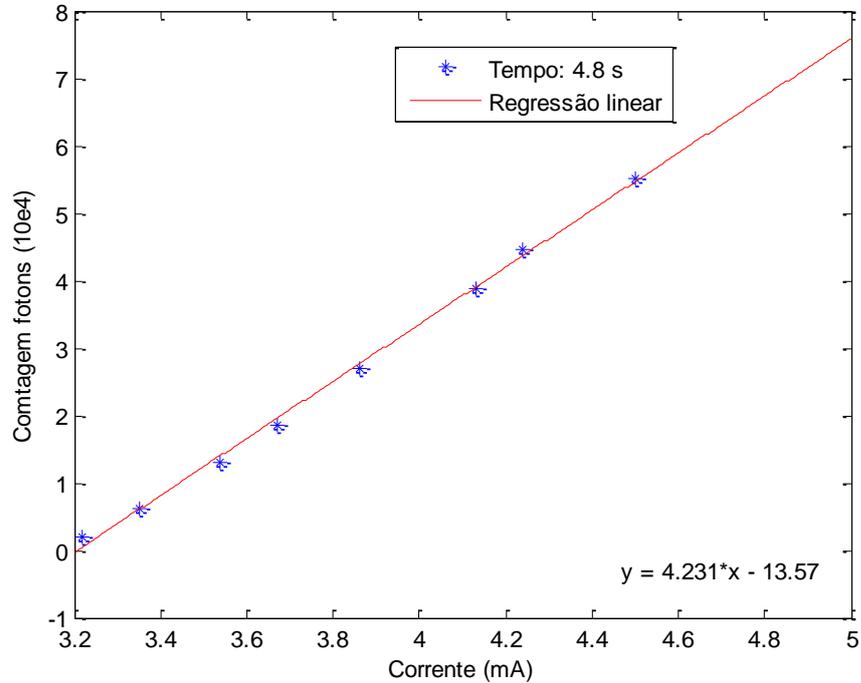


Figura 4.16 - Relação contagem de fótons em função da corrente para o LED verde com tempo de exposição de 4.8 segundos.

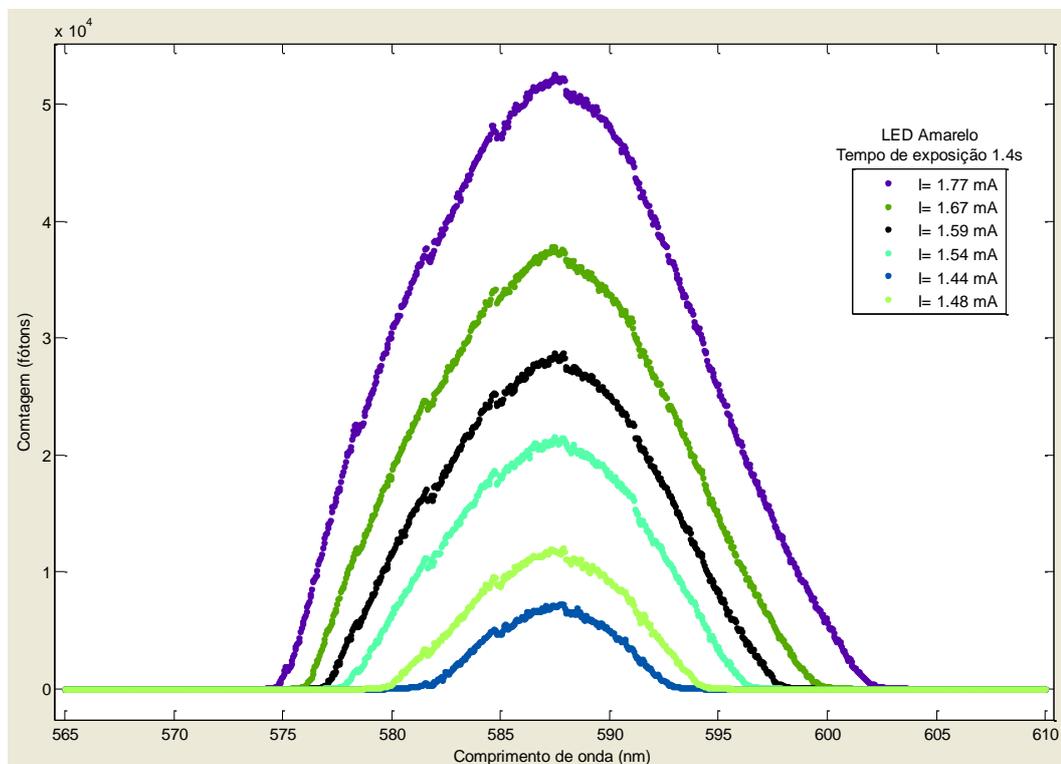


Figura 4.17 - Gráficos do LED amarelo da contagem de fótons em função do Comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 1.4 s.

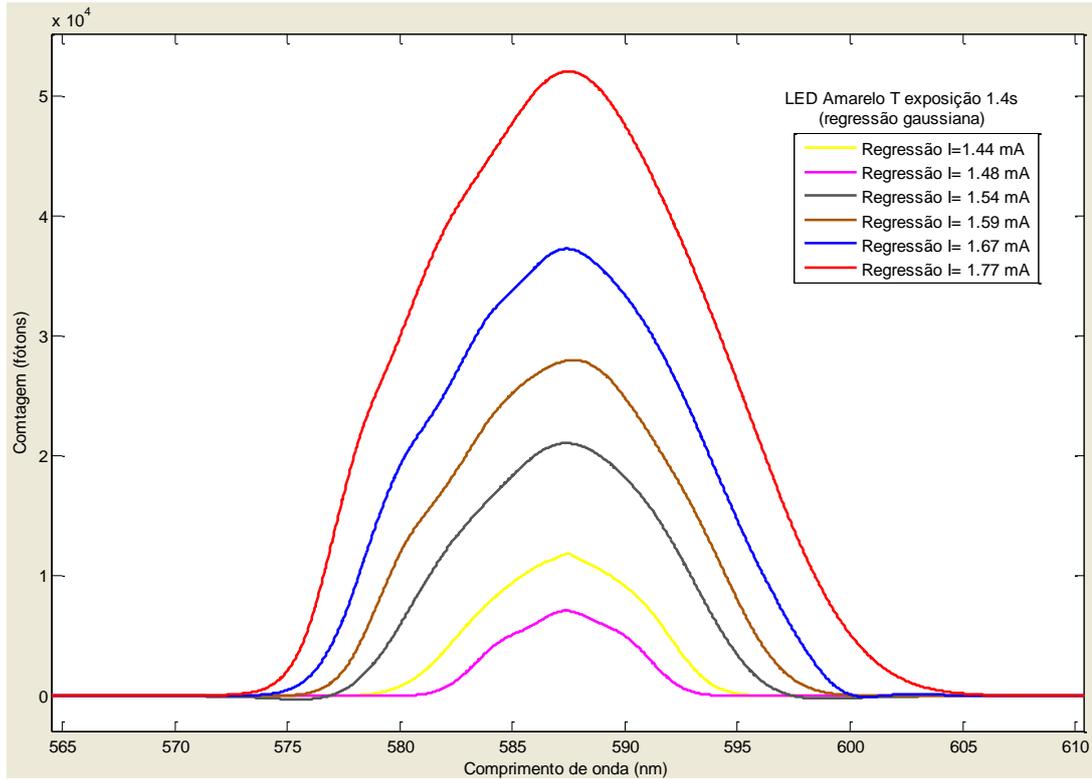


Figura 4.18 - Gráficos com regressão gaussiana do LED amarelo da contagem de fótons em função do comprimento de onda.

Para o LED amarelo foi usado o comprimento de onda de 587nm que apresento os valores máximos na contagem, gerando a figura 4.19 com uma resposta linear.

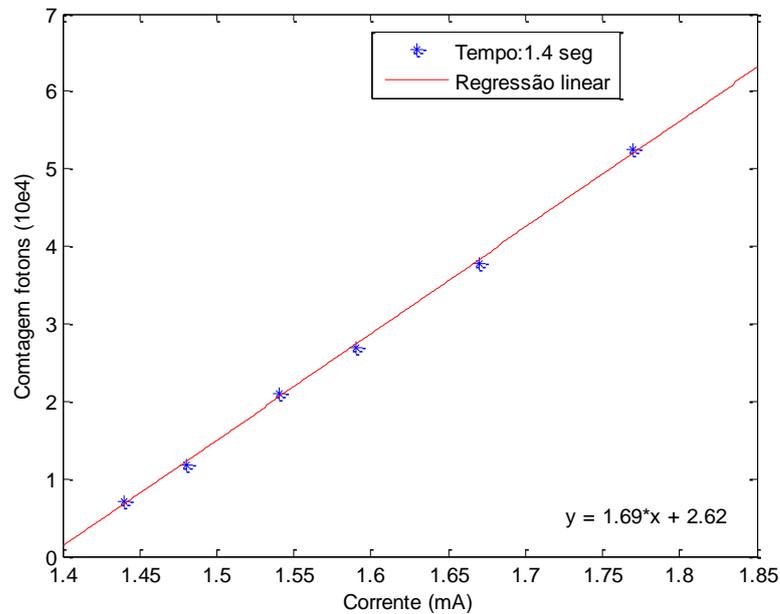


Figura 4.19 - Relação contagem de fótons em função da corrente para o LED amarelo com um tempo de exposição de 1,4 s.

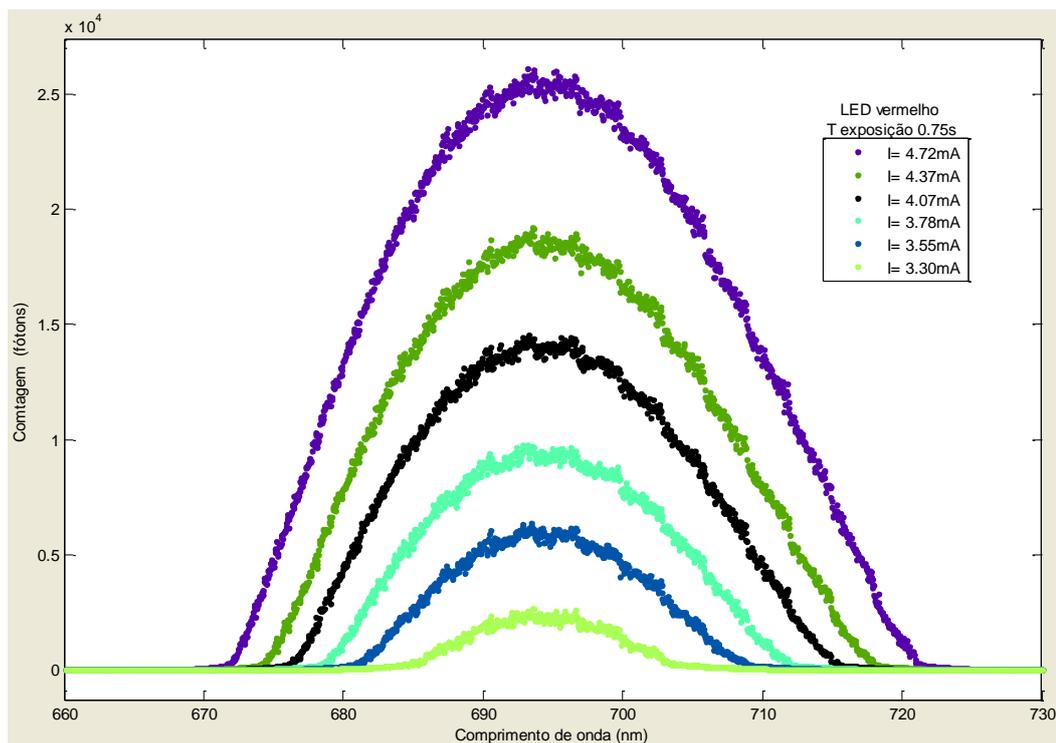


Figura 4.20 - Gráficos do LED vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 0.75 s.

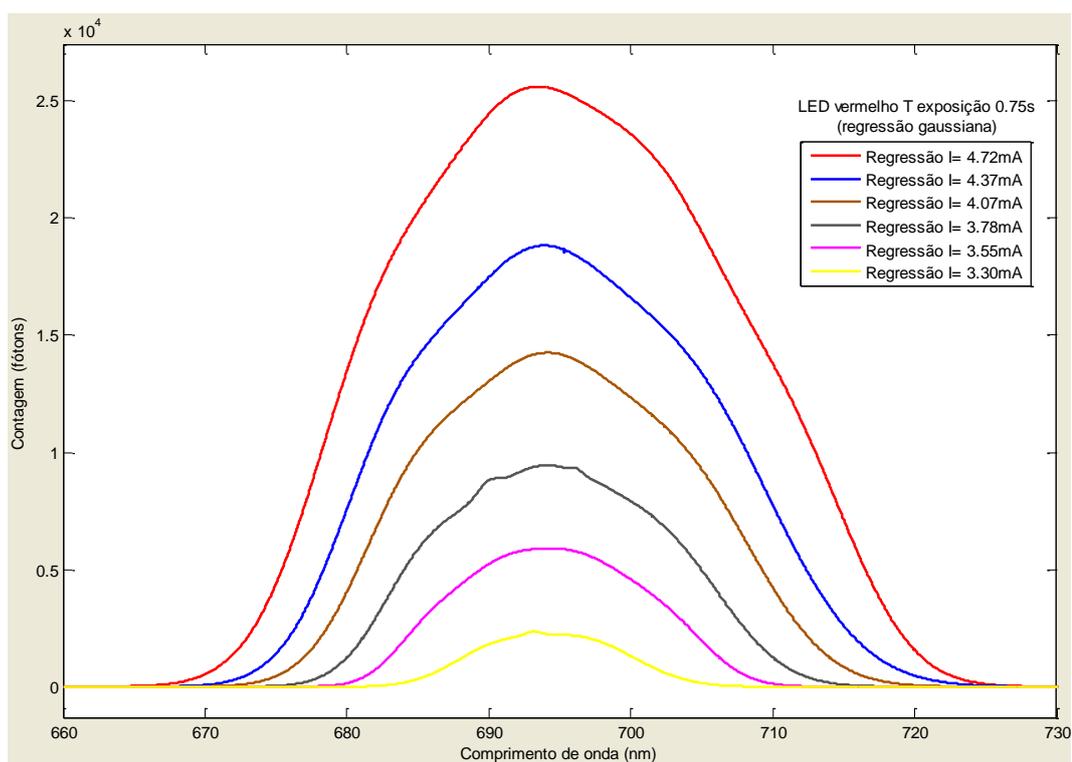


Figura 4.21 - Gráficos com regressão gaussiana do LED vermelho da contagem de fótons em função do comprimento de onda.

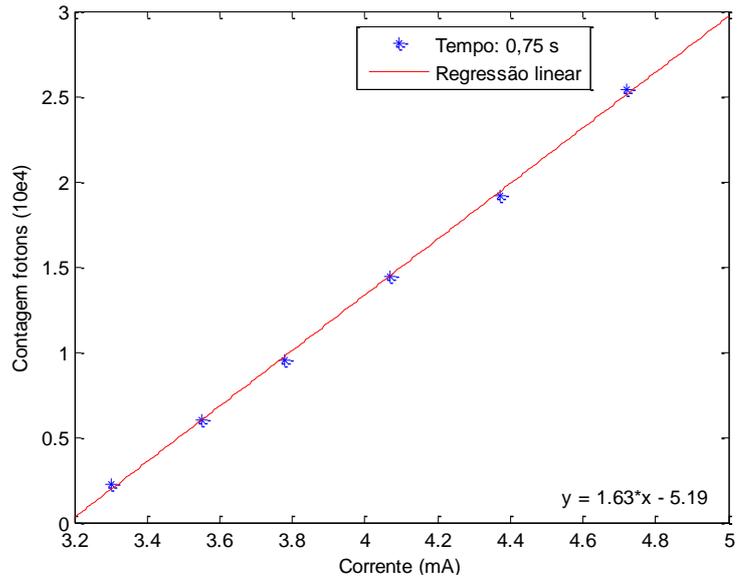


Figura 4.22 - Relação da contagem de fótons em função da corrente para o LED vermelho 0.75 s.

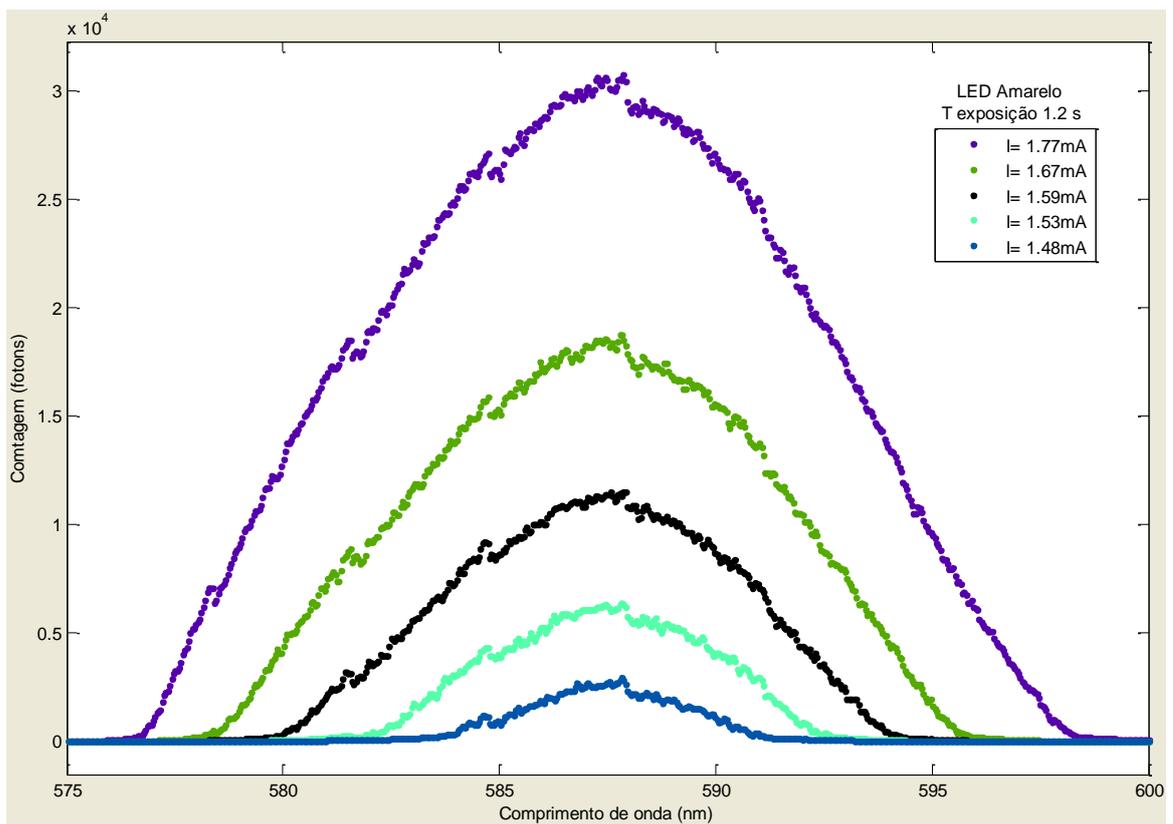


Figura 4.23 - Gráficos do LED amarelo da contagem de fótons em função do comprimento de onda com valores de corrente aplicada diferentes e tempo de exposição 1.2 s.

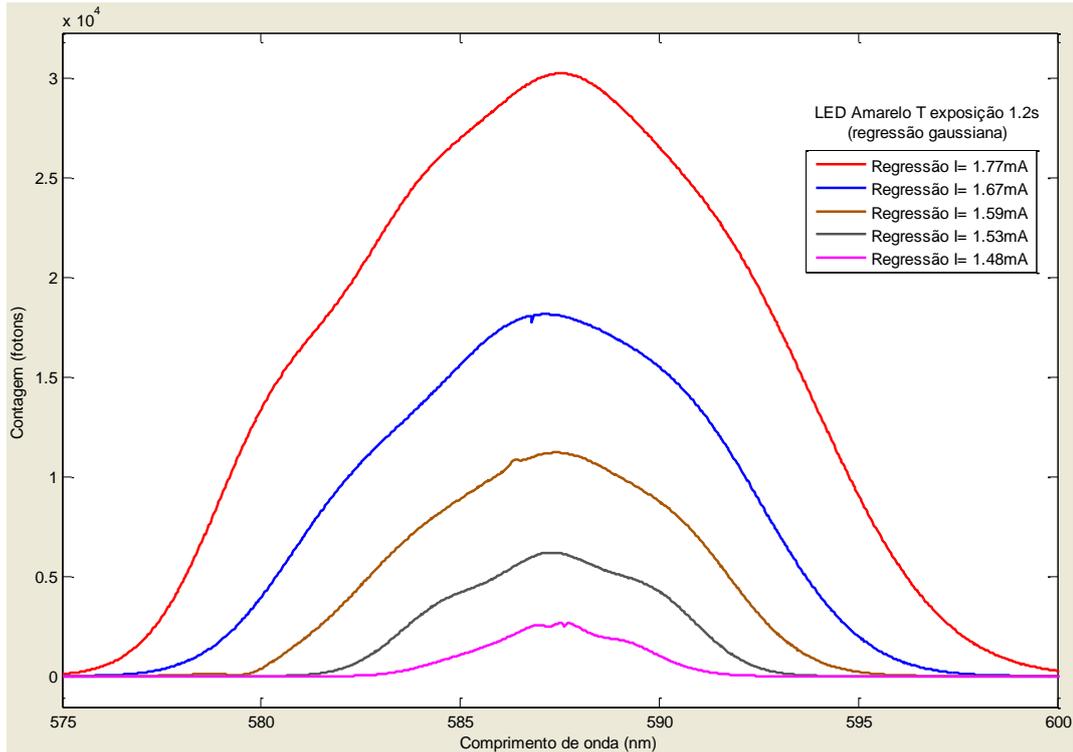


Figura 4.24 - Gráficos com regressão gaussiana do LED amarelo da contagem de fótons em função do comprimento de onda.

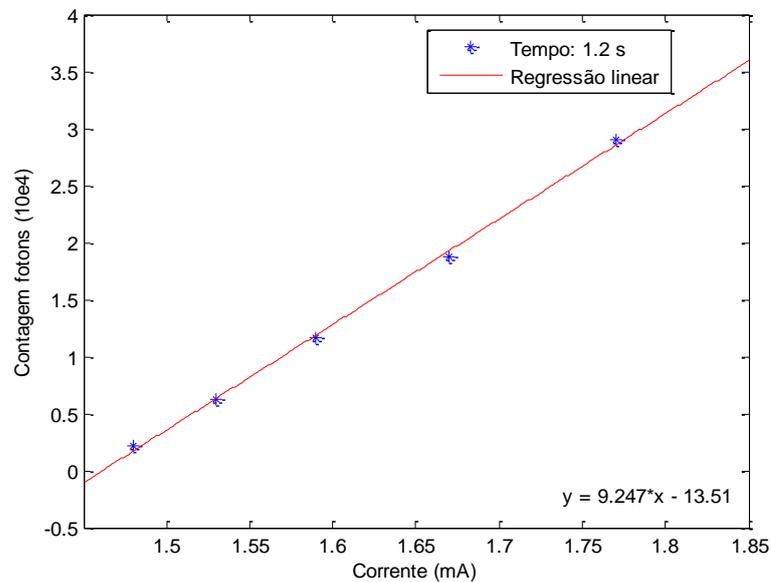


Figura 4.25 - Relação da contagem de fótons em função da corrente para o LED amarelo 1.2 s

As figuras anteriores mostram uma relação da corrente com a contagem de fótons sobre cada cor de LED. Pode-se encontrar um valor estimado da contagem de fótons para cada valor de corrente aplicada. Cada figura de relação da contagem de fótons com a corrente aplicada foi feita para um tempo de exposição específico, e foi apresentada uma linha de tendência linear.

Para a cor vermelha a máxima contagem de fótons ocorreu no comprimento de onda de 694 nm, cujas equações características são “ $Y=2.18 X - 5.36$ ”, com tempo de exposição de 0.9 s, e “ $1.63 X - 5.19$ ”, durante um tempo de exposição de 0.75 s, onde Y é a contagem de fótons e X é a corrente aplicada permitindo estimar um valor de fótons emitidos conhecendo o valor de corrente aplicada sobre o LED.

Para o LED de cor amarelo a máxima contagem de fótons foi no comprimento de onda de 587 nm, e as equações que relacionam com a corrente aplicada são “ $Y=13.7 X - 19.1$ ”, para um tempo de exposição de 1.4 s, e “ $9.247 X - 13.51$ ”, com tempo de exposição de 1.2 s.

Para a cor verde a máxima contagem de fótons aconteceu em dois comprimentos de onda, 562 nm e 567 nm. E os dois comprimentos de onda apresentam valores similares de contagem de fótons. Para realizar o cálculo da relação foi usado o comprimento de 562 nm, a equação resultante foi “ $Y= 4.231 X - 13.57$ ” com um tempo de exposição de 4.8 segundos.

4.1.2 Montagem do EMCCD na câmera

Para a montagem de um dispositivo detector EMCCD dentro da câmera deve-se ter em conta algumas recomendações:

- Deve ser feito em uma “sala limpa”.
- Usar proteção contra descargas da eletricidade estática, tais como: luvas anti-estáticas, manta anti estática com conexão a terra e pulseira anti estática com conexão a terra.
- Touca para o cabelo e máscara, para evitar que alguma partícula caia sobre o detector.

Para desmontar a câmera deve-se colocá-la na posição horizontal mostrada na figura 4.26, com a janela na posição lateral, e o ventilador na posição inferior para facilitar a extração da placa eletrônica de conexão do EMCCD e não quebrar os fios dos sensores de temperatura instalados no interior.

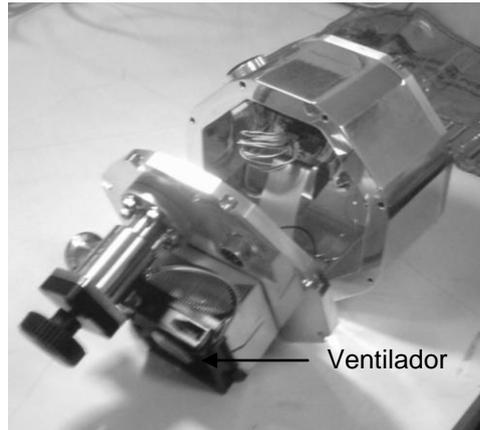


Figura 4.26 - Posição inicial da câmara para desarmar.

O primeiro passo é retirar a tampa extraíndo seus parafusos alternadamente, para que a tampa se solte de forma uniforme e paralela ao corpo principal da câmara. A seguir são desconectados os fios dos sensores de temperatura sobre as células Peltier e o EMCCD e, finalmente, retira-se a lâmina de cobre utilizada para a remoção do calor do dispositivo EMCCD (figura 4.27).

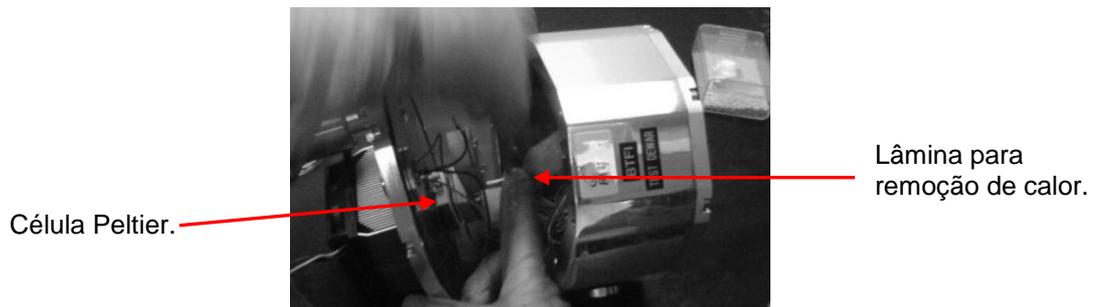


Figura 4.27 - Extração da tampa do *testdewar*.

O seguinte passo é retirar a placa eletrônica e colocar uma esponja condutora no conector de 55 pinos da câmara, para obter uma proteção antiestática no detector. Depois é feita a substituição do modelo mecânico do CCD97 pelo EMCCD verdadeiro, com proteções de eletricidade estática, como mostrado na figura 4.28.

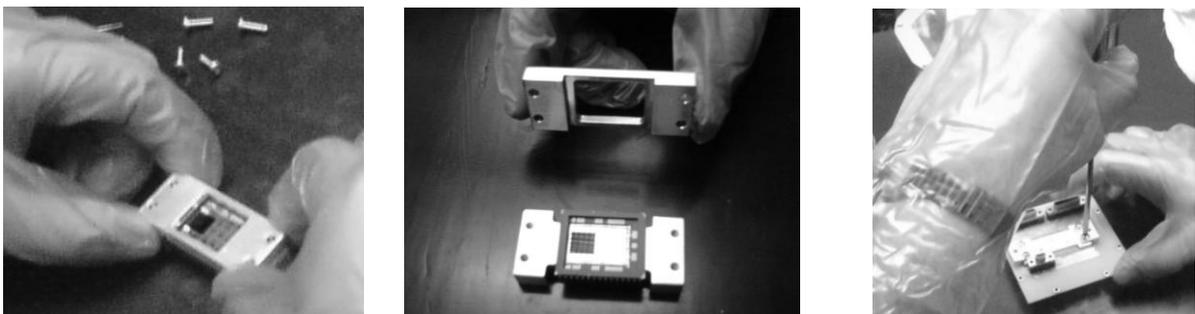


Figura 4.28 - Montagem do EMCCD na base e a placa eletrônica.

A placa eletrônica é recolocada na câmara cuidadosamente, conectando os sensores sobre a base de alumínio do detector e da célula Peltier. Depois é colocada a tampa sobre o corpo da câmara, de forma que o *O-ring* fique em uma posição certa, para evitar um possível vazamento ao aplicar o vácuo na câmara de teste. Deve-se verificar a correta posição do EMCCD, olhando pela janela da câmara, onde o dispositivo deve ficar livre na seção de imagem (figura 4.29).



Figura 4.29 - Vista do EMCCD montado na câmara.

Para a montagem da câmara de teste com o sistema de refrigeração que utiliza nitrogênio líquido, foi necessário fazer modificações sobre a tampa da câmara de teste, para acoplar o depósito para o nitrogênio líquido. No interior da câmara só foi modificada a posição de um dos sensores, que anteriormente estava perto da célula Peltier e agora ficou perto do encaixe do dedo frio.

O ajuste da tampa da câmara de teste com refrigeração de nitrogênio líquido tem o mesmo procedimento: ajustar de forma alternada os parafusos para obter um encaixe perfeito e evitar vazamentos. Depois é adicionado o encaixe do depósito para o nitrogênio líquido (figura 4.30).



Figura 4.30 - câmara de teste com nitrogênio líquido

A instalação do depósito do nitrogênio líquido sobre a tampa da câmara de teste deve ser feita de uma forma cuidadosa. O *O-ring* deve ficar bem instalado em sua respectiva guia na parte superior da tampa. Introduz-se o dedo frio na tampa da

câmera com cuidado, até conseguir um encaixe perfeito com a placa eletrônica do EMCCD (figura 4.31). A fixação do depósito de nitrogênio líquido é de forma similar à tampa da câmera, apertando os parafusos de forma alternada.

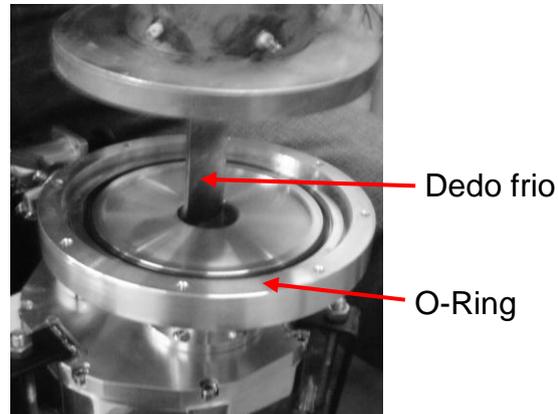


Figura 4.31 - Acople do dedo frio na câmera de teste.

Na figura 4.32 é observado o sistema de testes com refrigeração utilizando nitrogênio líquido e figura 4.33 com refrigeração com célula Peltier:

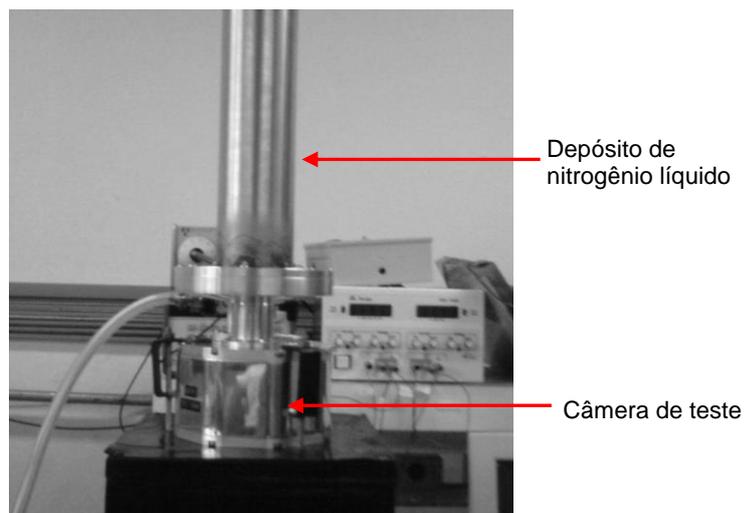


Figura 4.32 - montagem do sistema de teste refrigerado com nitrogênio líquido

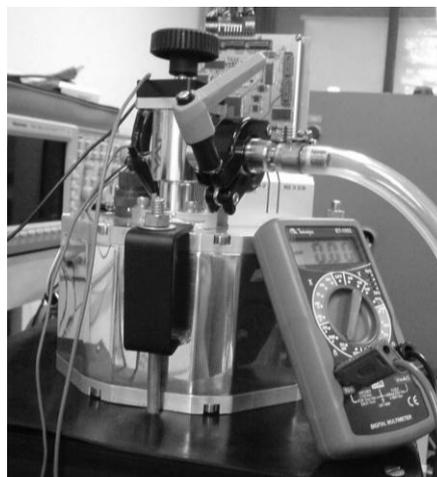


Figura 4.33 - Montagem da câmera de teste refrigerada com célula Peltier.

4.1.2.1 Diagrama da montagem do sistema de teste do EMCCD

Na figura 4.34 é mostrado o diagrama de blocos dos componentes que compõem o sistema de teste. O sistema de teste está composto principalmente por uma câmera de teste (*Testdewar*), onde as conexões eletrônicas dos sensores e o fotodetector são alojados: um sistema de refrigeração para o dispositivo EMCCD, e por uma placa eletrônica controladora, composta principalmente por um FPGA e um conversor analógico digital, encarregados de enviar a seqüência dos sinais e as tensões para o funcionamento do EMCCD na aquisição das imagens, e do processamento digital dos dados equivalentes a uma imagem que serão enviados a um computador.

Existe um controlador eletrônico para a célula Peltier ou para um aquecedor, caso o sistema de refrigeração seja com nitrogênio líquido. Este controlador tem a função de monitorar as temperaturas sobre o dispositivo EMCCD. Variando-se a corrente aplicada na célula Peltier ou aquecedor (caso do nitrogênio líquido) é possível obter um valor de temperatura ótimo e constante para a operação do EMCCD. Nos testes iniciais com célula de Peltier obteve-se no dispositivo EMCCD uma temperatura de 0°C, ao passo que com o sistema de refrigeração com nitrogênio líquido é possível obter temperaturas de até -140° C sobre o detector.

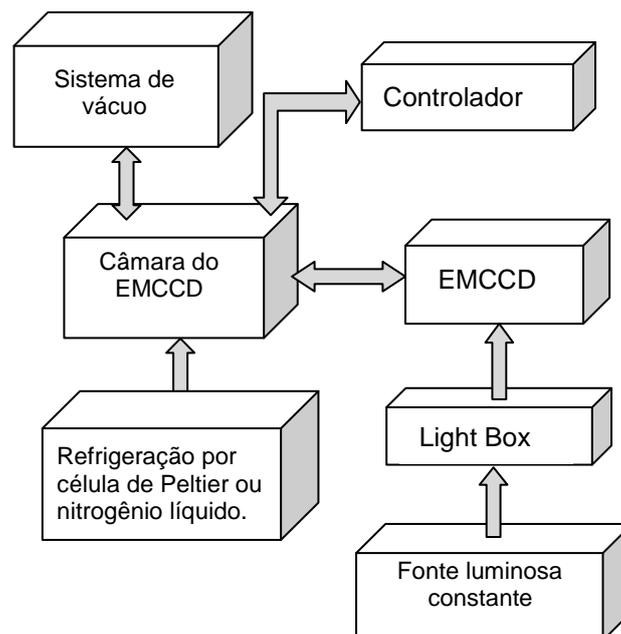


Figura 4.34 - Diagrama de blocos da montagem do sistema de teste para o EMCCD.

O sistema de vácuo está conformado por uma bomba mecânica em conjunto a uma bomba turbo-molecular conseguindo pressões de $1,33 \times 10^{-8}$ bar. O light Box é uma câmara escura encarregada de alojar os LEDs para iluminar a câmara de teste e garantir um bom isolamento da luz, para que não haja interferência com a luz controlada enviada pela fonte luminosa. Esta fonte envia uma luz em diferentes cores de forma controlada e constante, permitindo a otimização e caracterização do EMCCD. Na figura 4.35 é mostrada também a montagem física desse sistema de teste.

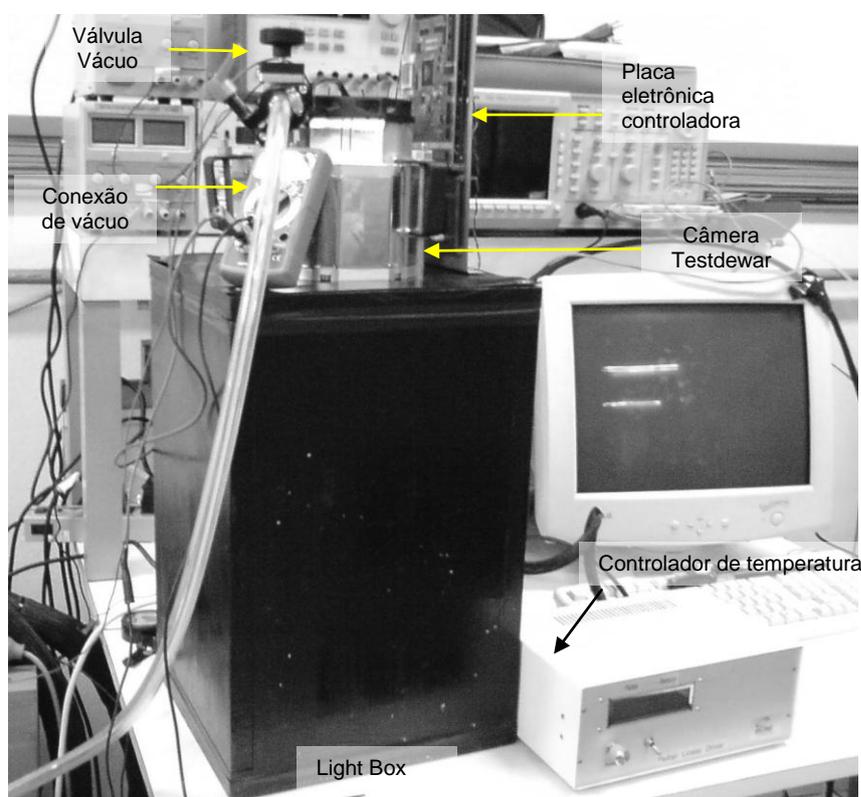


Figura 4.35 - Montagem do sistema de teste para o EMCCD.

4.1.3 Montagem do sistema de teste para o fotodiodo de avalanche

O sistema de teste do fotodiodo de avalanche é composto por uma fonte de alta tensão DC polarizando reversamente o APD, um picoamperímetro da KEITHLEY modelo 410A para a medição da fotocorrente gerada, um voltímetro da HP modelo 34401A medindo a tensão aplicada ao fotodetector de avalanche, e uma câmara escura onde o fotodiodo de avalanche é iluminado sem interferência. Na figura 4.36 é mostrada a montagem do sistema completo.



Figura 4.36 - Montagem do sistema de teste para o fotodiodo de avalanche.

Para a iluminação do fotodiodo de avalanche é conectada a mesma fonte luminosa constante usada na caracterização do EMCCD. Neste caso a fonte tem seis comprimentos de ondas diferentes, correspondentes às cores ultravioleta, azul, verde, amarelo, vermelho e infravermelho.

4.1.3.1 Diagrama de blocos

No diagrama da figura 4.37 é abordada a estrutura do sistema de teste para o fotodiodo de avalanche

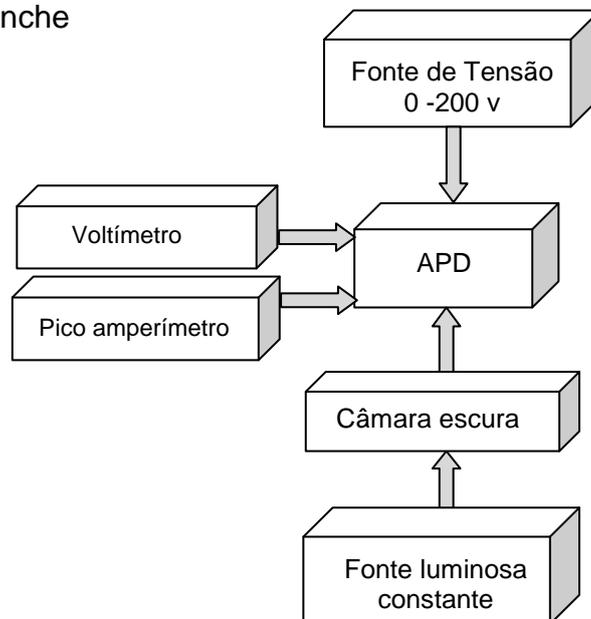


Figura 4.37 - Diagrama de blocos do sistema de teste para o fotodiodo de avalanche

Na figura 4.37 são mostradas as conexões feitas no fotodiodo de avalanche. Uma fonte luminosa constante controla a intensidade luminosa dos LEDs. Estes estão instalados dentro da câmara escura, a qual tem a função de criar um ambiente completamente hermético para o fotodiodo no momento da caracterização para que não exista interferência de luz externa no fotodiodo, o que faria variar o valor da fotocorrente gerada pelo dispositivo detector. O voltímetro tem a função de medir a tensão reversa aplicada no fotodiodo de avalanche e o pico-amperímetro mede a fotocorrente gerada à aplicação de uma intensidade luminosa. A fonte de tensão é contínua e ajustável na faixa de 0 a 200 volts, sendo aplicada ao fotodiodo de avalanche em polarização reversa.

5 CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE MULTIPLICAÇÃO DE ELÉTRONS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Descrevem-se neste capítulo os resultados experimentais no processo da caracterização do fotodiodo de avalanche e do EMCCD para serem comparados com dados do fabricante. Na abordagem inicial é apresentada a análise dos dados para encontrar as propriedades do APD, em seguida apresenta-se a análise dos dados adquiridos para a caracterização do EMCCD.

Os dados de caracterização de um fotodiodo de avalanche foram inclusos neste trabalho porque apresenta o mesmo comportamento de um EMCCD a uma menor escala. Ambos têm uma variação do fator de multiplicação em função da tensão de polarização, uma alta eficiência quântica, e ainda possuem uma alta sensibilidade aos sinais ultrafracos.

Esses ensaios foram realizados para se obter um dispositivo de comparação com o EMCCD. Não foi possível realizar uma completa caracterização desse dispositivo, pois a parte eletrônica do controle não estava bem sincronizada gerando uma dificuldade na aquisição de imagens a varias condições de frequência da leitura e controle na fase de alta tensão para a multiplicação dos elétrons.

5.1 Caracterização do fotodiodo de avalanche

O fotodiodo de avalanche caracterizado é fabricado pela Advanced Fotonics e possui uma região ativa de 0.3 mm.

O fotodiodo de avalanche é polarizado reversamente e o circuito básico para sua polarização é apresentado na figura 5.1. Esse circuito é composto de uma fonte de tensão variável na faixa de 0 a 210 Volts DC (V_{s1}), um capacitor para diminuir os ruídos que influenciam nas medições ($C1$), e resistores com a função de limitar a corrente que circula sobre o fotodiodo de avalanche. Nas medições para a caracterização dos dispositivos são utilizados resistores de valores de $1M\Omega$, $100K\Omega$, $1K\Omega$ para $R2$.

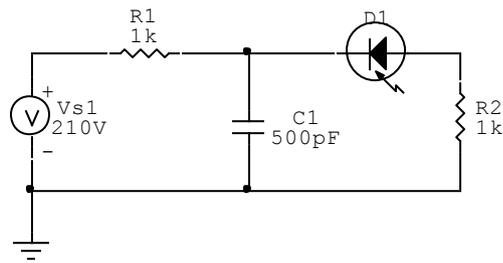


Figura 5.1 - Circuito de polarização para o fotodiodo de avalanche

A fonte luminosa usada para caracterizar o fotodiodo tem emissão de seis diferentes comprimentos de onda: infravermelho (940nm), vermelho (694nm), amarelo (587nm), verde (562nm), azul (468nm) e ultravioleta (400nm). No item 4.1.1 do capítulo 4 essa fonte foi caracterizada.

Quando o fotodiodo de avalanche é operado em uma tensão de polarização alta (centenas de volts) gera-se um ganho máximo. Assim a queda da tensão sobre o resistor de carga incrementa na proporção ao valor em ohms dessa resistência de carga. Um fenômeno indesejável ocorre: onde a fotocorrente da saída já não é proporcional á quantidade da luz incidente, depende apenas dos resistores em serie com a carga e da estrutura interna do fotodiodo de avalanche. Na figura 5.2 é apresentado o comportamento desse fenômeno com dois diferentes valores de resistência: 100K Ω e 1M Ω .

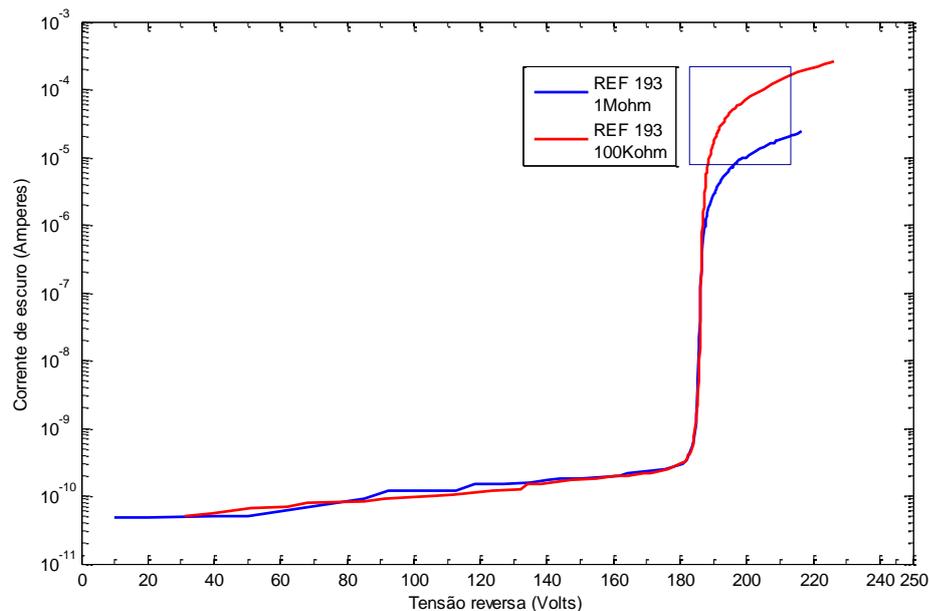


Figura 5.2- Corrente no escuro em função da tensão aplicada.

Nos seguintes gráficos é mostrada somente a seção onde a fotocorrente não depende da quantidade da luz incidida, dependendo apenas do resistor da carga.

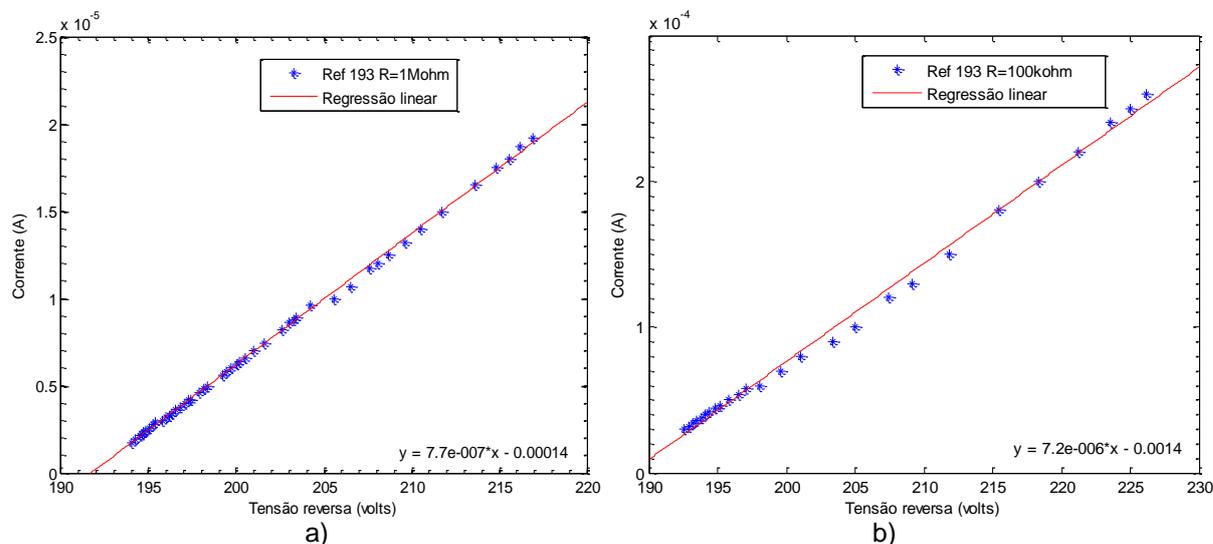


Figura 5.3 - Representação gráfica do fenômeno da fotocorrente com dependência somente do resistor série a) resistor de 1Mohm, b) resistor de 100kohm.

Um método experimental para a obtenção de um valor equivalente do resistor série é tomar-se o declive da equação da linha de tendência:

$$\text{Para } R=1\text{M}\Omega \quad R = \frac{1}{7.7 \times 10^{-7}} = 1298.701 \approx 1.29 \times 10^6$$

$$\text{Para } R=100\text{K}\Omega \quad R = \frac{1}{7.2 \times 10^{-6}} = 138.888 \approx 138 \times 10^3$$

Os resultados obtidos mostram valores aproximados do resistor conectado em série ao APD e comprovam a não dependência com nenhuma luz incidente.

5.1.1 Medições das características primordiais do fotodiodo de avalanche

A seguir são apresentados os procedimentos e os resultados obtidos nas medições dos parâmetros primordiais na caracterização de um fotodiodo de avalanche.

No processo de medição são usados dois fotodiodos de avalanche da mesma referência **012-70-62-541**. Os fotodiodos na análise são denominados por dois números de seqüência, o 155 e 193; esses números são usados para diferenciar os fotodiodos na tomada e análise dos dados.

No processo da caracterização são medidos os parâmetros primordiais no fotodiodo de avalanche, esses são: responsividade, eficiência quântica, fator de multiplicação em função da tensão de polarização, e corrente no escuro em função da tensão de polarização.

A responsividade intrínseca (R_{i0}) da corrente do fotodiodo de avalanche é definida como:

$$R_{i0} = \eta \cdot \frac{q\lambda}{hc} \quad (5.1)$$

Onde:

q carga do elétron

λ comprimento de onda

h constante de Planck

c velocidade da luz no vácuo

η eficiência quântica.

A responsividade total (R) da corrente do fotodiodo de avalanche em modo do alto ganho cumpre com a seguinte função:

$$R = R_{i0} \cdot M \quad (5.2)$$

Onde:

R_{i0} responsividade intrínseca

M fator de multiplicação.

Ao incidir-se uma radiação luminosa constante, com um comprimento de onda dentro da faixa sensível do silício, e uma tensão de reverso aplicado ao fotodiodo, o dispositivo gera uma fotocorrente. Onde o fotodiodo de avalanche comporta-se como um diodo PIN a baixas tensões de polarização. Caso se mantenha a mesma intensidade luminosa e se incremente a tensão de reverso (V_B) produz-se no interior do semiconductor o fenômeno da geração de elétrons-lacunas secundários aumentando-se a fotocorrente I_F em um fator M . Nessas condições satisfaz-se a seguinte expressão:

$$I_F(\lambda, V_B) = M(V_B) \cdot R_{i0}(\lambda) \cdot P_L \quad (5.3)$$

Onde

R_{i0} responsividade intrínseca

I_F Fotocorrente gerada

M fator de multiplicação

P_L potência luminosa

5.1.1.1 Medição da Responsividade

Nos fotodiodo de avalanche a responsividade é medida aplicando uma tensão de polarização de reverso baixa garantindo que o fotodiodo tenha um valor de ganho unitário. A tensão de polarização está entre -10 a -20 volts DC. Nesses valores de tensão é medida a fotocorrente gerada pelo dispositivo e essa medida é feita para seis diferentes comprimentos de onda. A tabela 5.1, lista esses comprimentos de onda com seus respectivos valores de potência luminosa emitidos para o fotodetector.

Tabela 5.1- Comprimentos de onda com seu respectivo valor de potência luminosa emitida.

Cor	Comprimento de onda λ (nm)	Potência luminosa 1 P_L (nW)	Potência luminosa 2 P_L (nW)
Ultravioleta	400	365	1100
Azul	468	182.1	415.2
Verde	562	0.26	0.28
Amarelo	587	0.78	1.68
Vermelho	694	1.45	1.91
Infravermelho	940	5.89	19.16

Supondo o valor de fator de multiplicação $M=1$, da equação (5.3) o valor da responsividade intrínseca é:

$$R_{i0}(\lambda) = \frac{I_F(\lambda, V_B)}{M(V_B) \cdot P_L} \quad (5.4)$$

A responsividade intrínseca para o fotodiodo de avalanche com referência 193 e 155 é calculada para os dois valores de potência luminosa com diferentes comprimentos de onda. Estes são listados na tabela 5.2

Tabela 5.2- Responsividade intrínseca experimental para os fotodiodos ref 193 e 155.

Cor	Comprimento de onda λ (nm)	Responsividade (A/W) P1		Responsividade (A/W) P2	
		155	193	155	193
Ultravioleta	400	0.027	0.028	0.029	0.028
Azul	468	0.054	0.06	0.055	0.066
Verde	562	0.165	0.153	0.171	0.164
Amarelo	587	0.217	0.192	0.22	0.209
Vermelho	694	0.35	0.344	0.353	0.356
Infravermelho	940	0.237	0.232	0.244	0.234

O valor da responsividade no fotodiodo de avalanche não apresentou nenhuma dependência com a potência luminosa porque o valor da responsividade

permaneceu constante a dois valores de potência luminosa emitidas ao fotodiodo, mais existiu variação da responsividade intrínseca em relação ao comprimento de onda onde o valor de responsividade menor foi para o ultravioleta com 0.027A/W e maior para o vermelho com 0.35 A/W.

5.1.1.2 Medição da eficiência quântica

Com os valores obtidos da responsividade pode-se calcular a eficiência quântica do fotodiodo de avalanche para todos os comprimentos de onda emitidos pela fonte luminosa. Tomando da equação (5.1) obteve-se a relação para calcular a eficiência quântica:

$$\eta = R_{i0} \cdot \frac{hc}{q\lambda} \quad (5.5)$$

Usando a equação (5.5) foi calculada a eficiência quântica para os fotodiodos de avalanche referência 193 e 155 com duas potências luminosas, a eficiência quântica é listada na tabela 5.3:

Tabela 5.3- Eficiência quântica experimental para os fotodiodos ref 193 e 155

Cor	Comprimento de onda λ (nm)	Eficiência Quântica (%) P1		Eficiência Quântica (%) P2	
		155	193	155	193
Ultravioleta	400	8.49	8.7	8.74	8.9
Azul	468	14.5	15.9	14.6	17.5
Verde	562	36.4	33.5	37.8	36.2
Amarelo	587	45.8	40.5	46.4	44.1
Vermelho	694	62.5	61.4	63.1	63.6
Infravermelho	940	31.26	30.7	32.2	30.8

Como a eficiência quântica depende da responsividade do fotodiodo apresenta o mesmo comportamento, um valor constante variando a potência luminosa emitida e valor menor de 8.49% ao comprimento de onda do ultravioleta e maior ao vermelho com 62.5%.

A seguir são apresentados são apresentados os valores da responsividade e a eficiência quântica obtidos pelos gráficos fornecidos pelo fabricante:

Tabela 5.4.- Responsividade e eficiência quântica do fotodiodo de avalanche referência 012-70-62-541 com fator de multiplicação $M=1$

Cor	Comprimento de onda λ (nm)	Responsividade (A/W)	Eficiência Quântica (%)
Ultravioleta	400	0.023	8
Azul	468	0.055	16
Verde	562	0.170	35
Amarelo	587	0.220	41
Vermelho	694	0.370	62
Infravermelho	940	0.250	34

5.1.1.3 Porcentagem de incerteza

Na tabela 5.5 são mostradas as porcentagens de incerteza dos valores experimentais com os dados adquiridos pelos gráficos da folha de dados do fotodiodo de avalanche caracterizado.

Tabela 5.5 - Incerteza dos valores da eficiência quântica experimentais.

Cor	Comprimento de onda λ (nm)	Eficiência Quântica (%) P1		Eficiência Quântica (%) P2	
		155	193	155	193
Ultravioleta	400	6.12	7.30	9.25	11.2
Azul	468	9.37	6.25	8.75	9.37
Verde	562	4.57	4.28	8.00	3.42
Amarelo	587	11.7	1.21	11.17	7.56
Vermelho	694	0.80	0.96	1.77	2.58
Infravermelho	940	8.06	5.80	5.29	9.40

Com esses valores de eficiência quântica obtidos e a extrapolação com os dados do fabricante pode-se gerar o gráfico de eficiência quântica em relação ao comprimento de onda para as duas referências dos APDs com dois valores de potência luminosa. Esses gráficos são mostrados nas figuras 5.4 e 5.5.

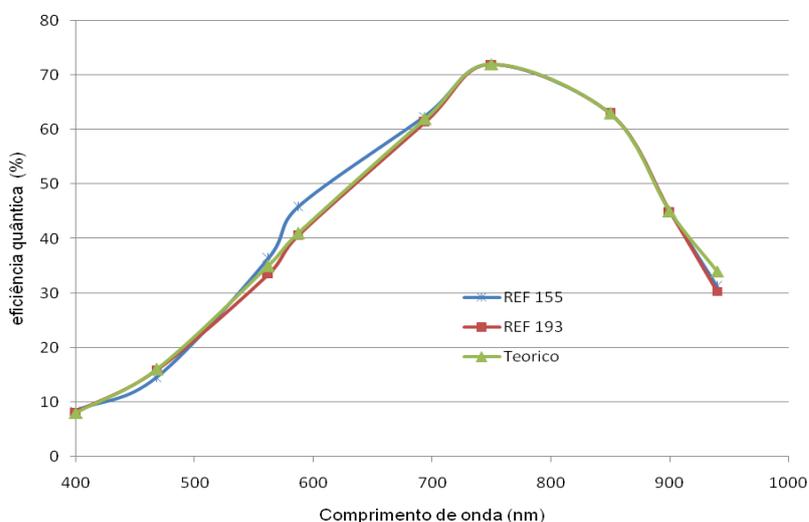


Figura 5.4 - Eficiência quântica experimental dos fotodiodos de avalanche em relação ao comprimento de onda com fator de multiplicação $M=1$ com potência luminosa 1.

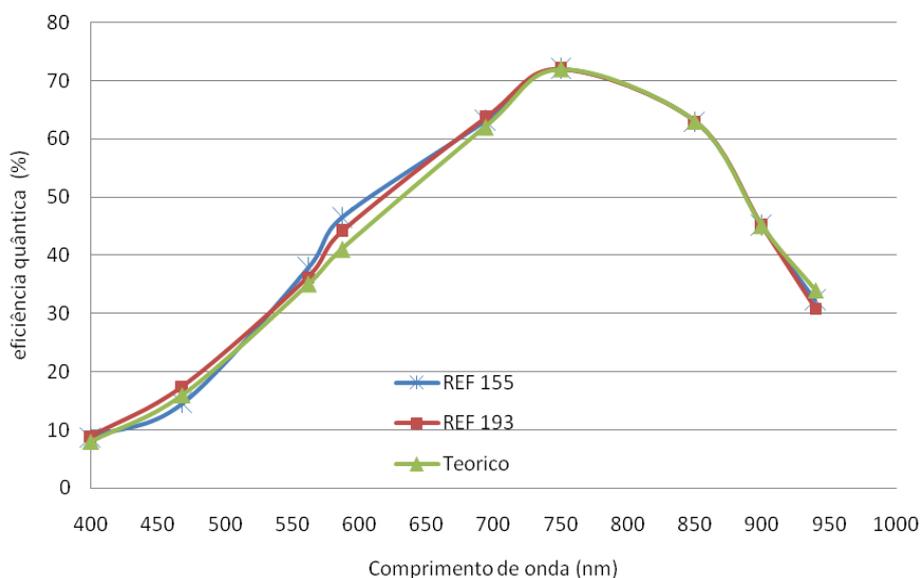


Figura 5.5 – Eficiência quântica experimental dos fotodiodos de avalanche em relação ao comprimento de onda com fator de multiplicação $M=1$ com potência luminosa 2.

Nas figuras 5.4 e 5.5 podem ser observadas as eficiência quântica para dois valores diferentes de potência luminosa não existindo nenhuma variação. Além disso, os valores de eficiência quântica obtidos pelas medições estão próximos dos valores entregados pelo fabricante com uma porcentagem de incerteza pequena, onde esses valores estão na faixa de 0,8% até 11% de variação.

Tabela 5.6 - Resumo das características dos fotodetectores com potência 1

Cor	Comprimento de onda λ (nm)	Potência (nW)	Responsividade (A/W)		Eficiência Quântica (%)	
			155	193	155	193
Ultravioleta	400	365	0.027	0.028	8.49	8.7
Azul	468	182.1	0.054	0.06	14.5	15.9
Verde	562	0.26	0.165	0.153	36.4	33.5
Amarelo	587	0.78	0.217	0.192	45.8	40.5
Vermelho	694	1.45	0.35	0.344	62.5	61.4
Infravermelho	940	5.89	0.237	0.232	31.26	30.7

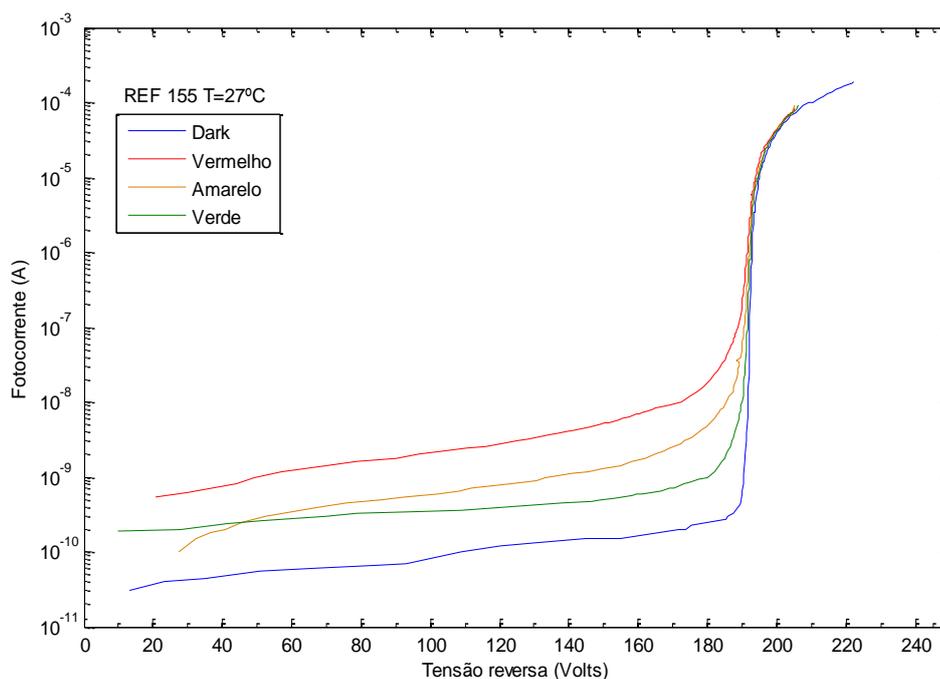
Nas tabelas 5.6 e 5.7 é listado um resumo das propriedades de responsividade e eficiência quântica de cada fotodiodo de avalanche para cada comprimento de onda utilizado nas medições. Onde é observada a variação dos valores de eficiência quântica e responsividade entre as duas referências de APD ainda com as mesmas condições de medida.

Tabela 5.7- Resumo das características dos fotodetectores com potência 2

Cor	Comprimento de onda λ (nm)	Potência (nW)	Responsividade (A/W)		Eficiência Quântica (%)	
			155	193	155	193
Ultravioleta	400	1100	0.029	0.028	8.74	8.9
Azul	468	415.2	0.055	0.066	14.6	17.5
Verde	562	0.28	0.171	0.164	37.8	36.2
Amarelo	587	1.68	0.22	0.209	46.4	44.1
Vermelho	694	1.91	0.353	0.356	63.1	63.6
Infravermelho	940	19.16	0.244	0.234	32.2	30.8

5.1.1.4 Fenômeno de Avalanche

Para ser observado o fenômeno de avalanche e encontrar um valor aproximado do ganho das cargas no fotodiodo de avalanche é necessário obter gráficos do comportamento da fotocorrente em relação à tensão da polarização em diferentes comprimentos de onda. Esses gráficos são apresentados nas figuras 5.6 e 5.7 para as duas referências dos fotodiodos.

**Figura 5.6** - Valores da foto corrente com diferentes comprimentos de onda para ref 155

As figuras 5.6 e 5.7 descrevem como são as variações das fotocorrentes geradas em função do comprimento de onda. Observa-se uma variação maior para a cor vermelha e menor para a cor verde. Comprovando-se assim a relação com a eficiência quântica, ou seja, quanto maior a eficiência quântica maior é a fotocorrente gerada. Além disso, está incluída a corrente originada pela junção PN do fotodiodo, denominada corrente no escuro.

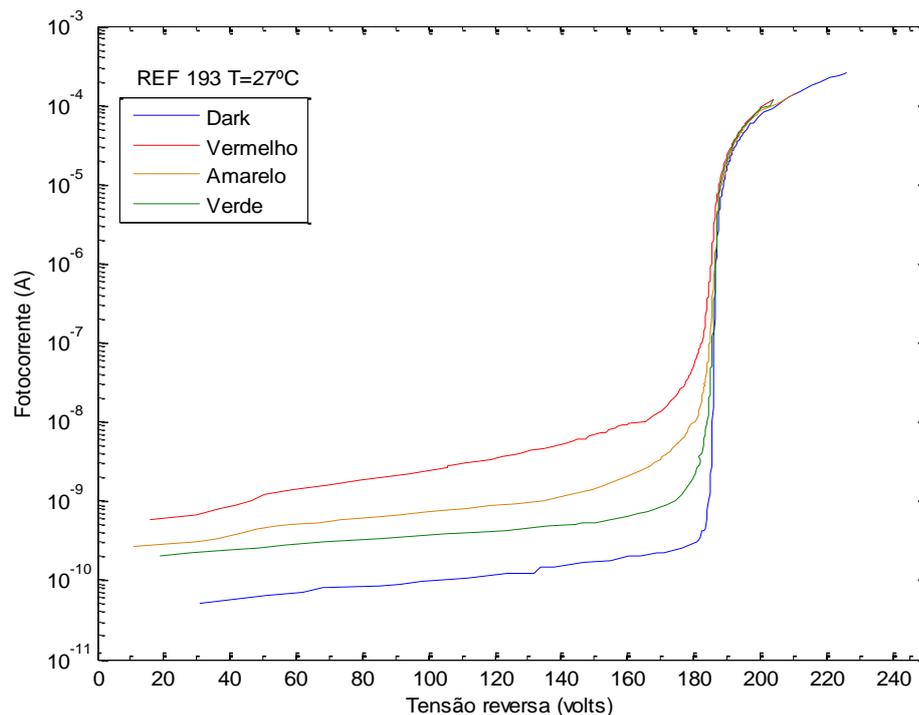
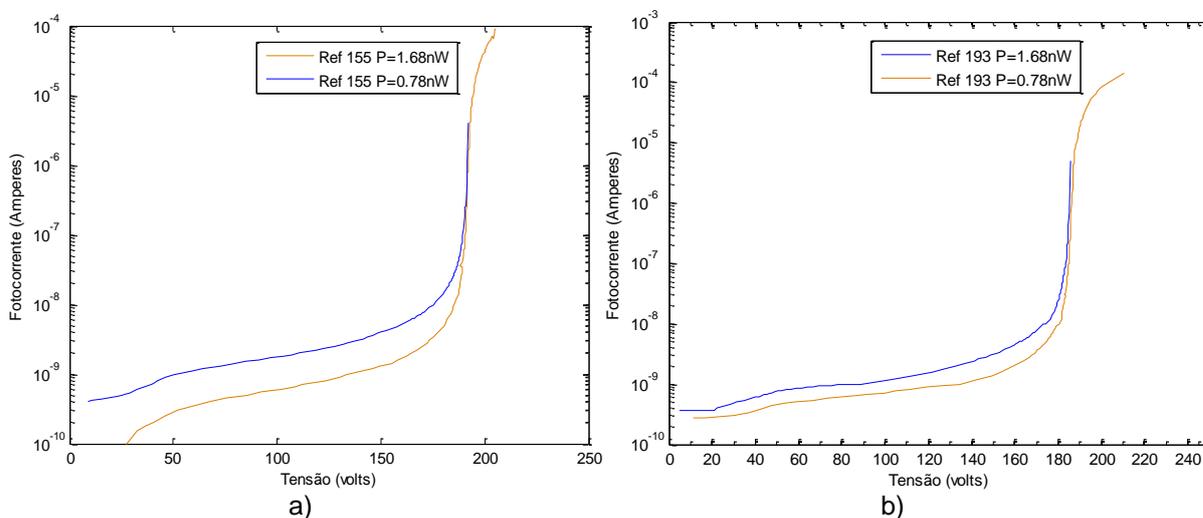


Figura 5.7- Valores da foto-corrente com diferentes comprimentos de onda para ref 155

Pode-se ainda obter das figuras anteriores é possível obter uma tensão de *breakdown* para cada referência do fotodiodo de avalanche, esse valor de tensão é obtido onde o fotodiodo de avalanche tem um incremento rápido da fotocorrente, as tensões são: Para a REF 155: $V_B = 192$ Volts e para a REF 193: $V_B = 187$ Volts.

Nos gráficos da figura 5.8 é apresentada a resposta da fotocorrente em cada fotodiodo de avalanche a duas potências luminosas diferentes. Além disso, nesses gráficos é possível detalhar a variação da fotocorrente em relação à potência luminosa emitida.



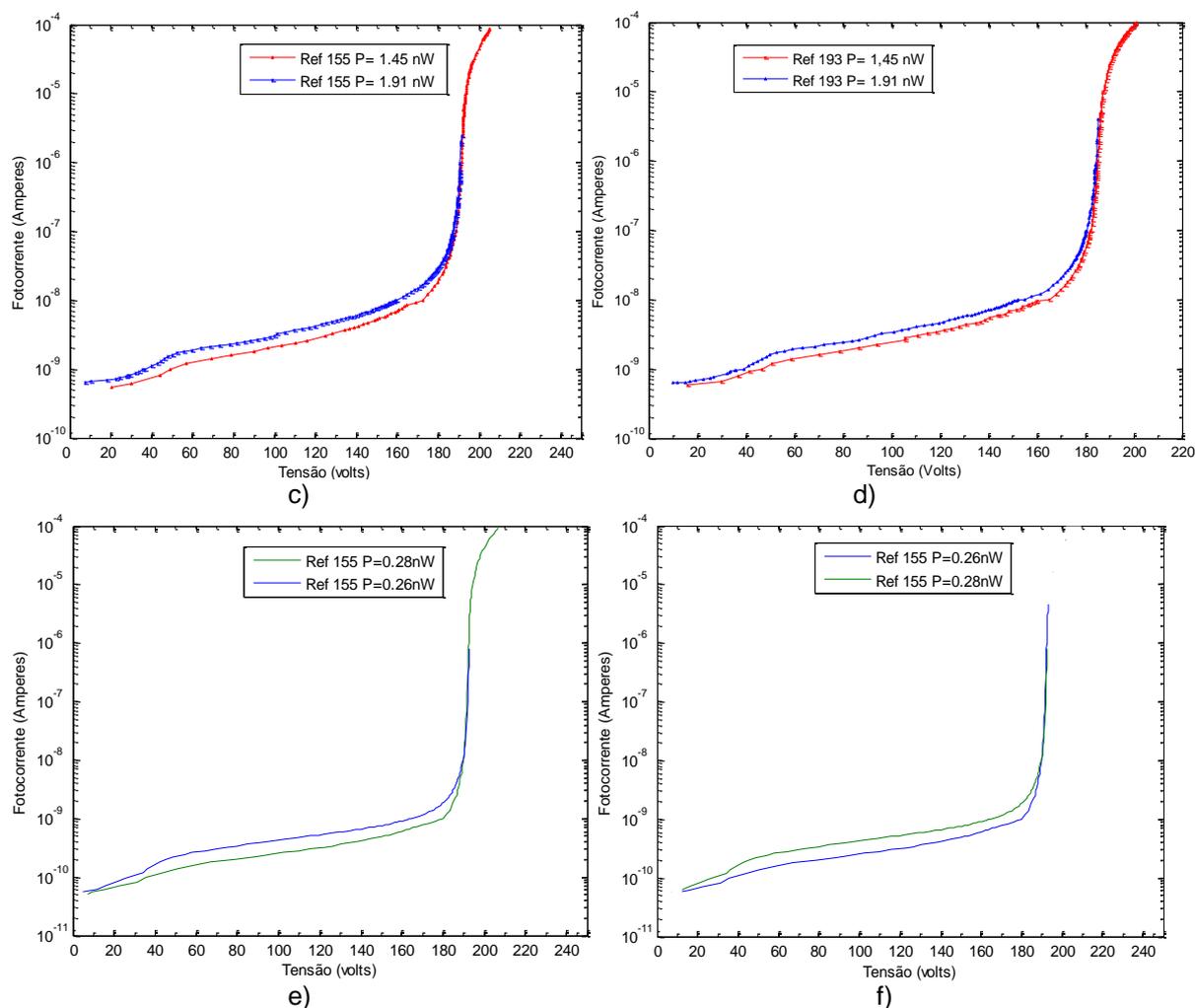


Figura 5.8 - Resposta do fotodiodo de avalanche com duas potências a) cor amarelo ref. 155, b) cor amarelo ref. 193, c) cor vermelho ref. 155, d) cor vermelho ref. 193, e) cor verde ref. 193, f) cor verde ref. 193.

Na figura 5.8 verificou-se a variação proporcional da fotocorrente em função da potência luminosa incidente, e como a fotocorrente gerada varia em cada referência de fotodiodo de avalanche estando nas mesmas condições. Isso ocorre porque os dois fotodiodos apresentam uma eficiência quântica e responsividade diferentes. Tomando um valor de exemplo para o LED vermelho, temos

Para Ref 193: com P1 IF= 2.6×10^{-9} A, com P2 IF= 3.7×10^{-9} A.

Para Ref 155: com P1 IF= 2×10^{-9} A, com P2 IF= 3×10^{-9} A.

5.1.1.5 Medição do fator de multiplicação

O ganho, M , determina o fator de amplificação para a fotocorrente primária produzida no APD pela luz incidente. Esse ganho está em função da polarização de

reverso do dispositivo fotodetector. O objetivo desta seção é obter as características de resposta do ganho em função da tensão reversa (M - V) de cada fotodiodo de avalanche para uma temperatura ambiente e seis diferentes comprimentos de onda.

Uma forma de calcular o fator de multiplicação é tomando-se a equações (5.1 e 5.2) para cada comprimento de onda nas duas referências do fotodiodo de avalanche.

$$M(V_B) = \frac{I_F(\lambda, V_B)}{R_{i0}(\lambda) \cdot P_L} \quad (5.6)$$

Nas figuras 5.9 e 5.10 são apresentadas as variações do ganho em relação à tensão de polarização para os seis comprimentos de onda.

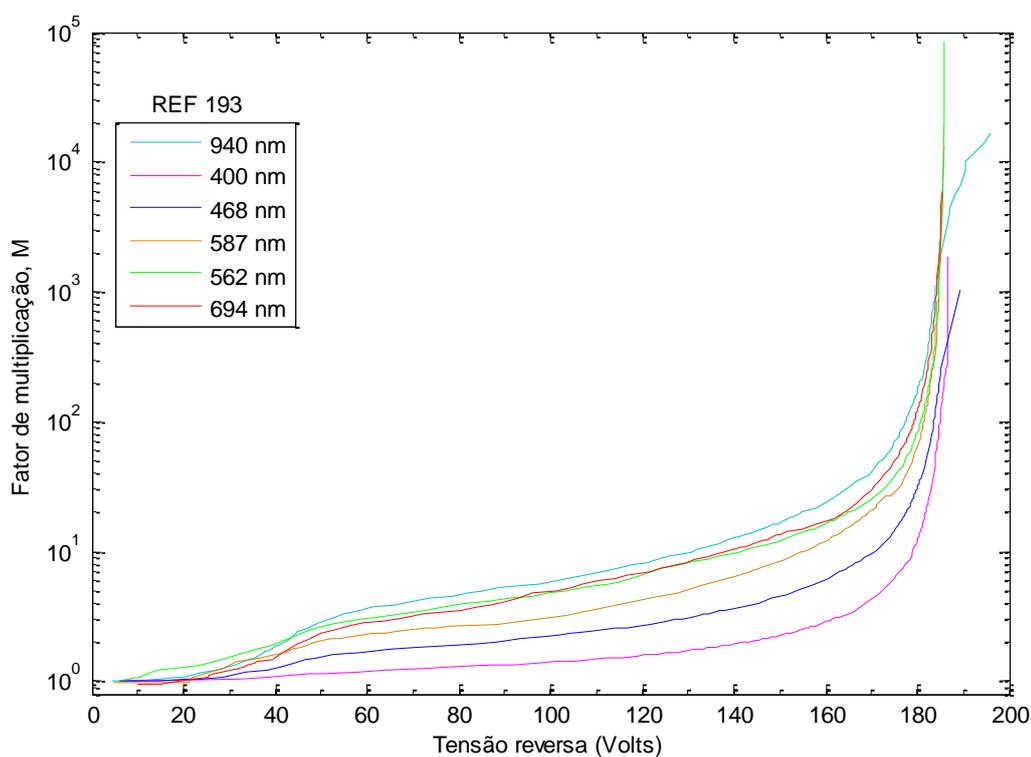


Figura 5.9 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 193 com potência luminosa 2

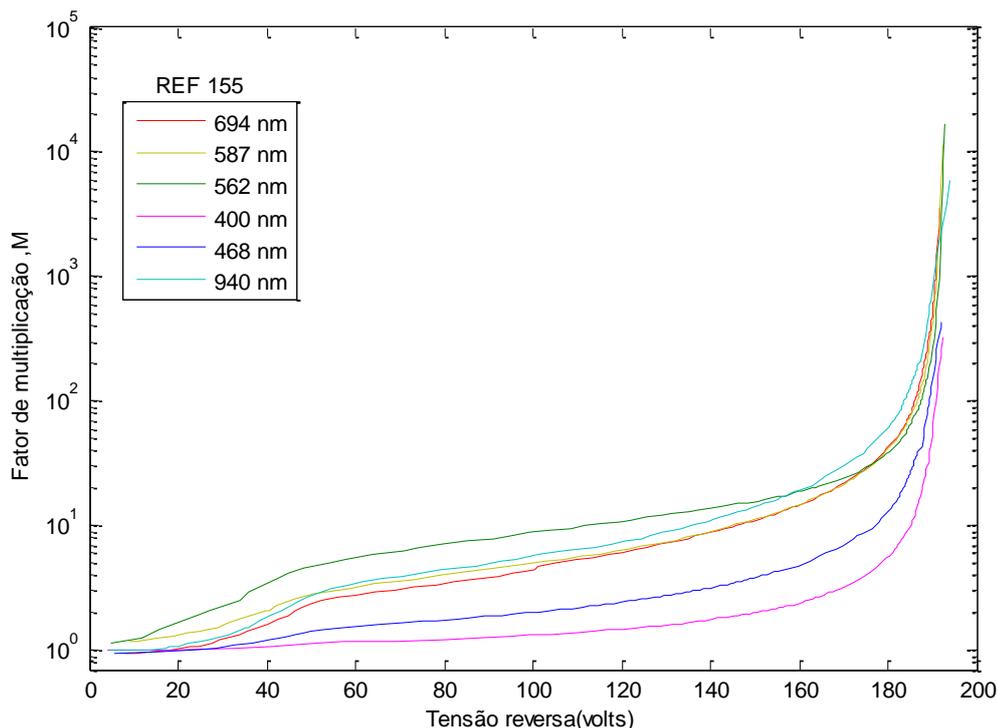


Figura 5.10 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 155 com potência luminosa 2

Outra forma de se encontrar o fator de multiplicação do fotodiodo de avalanche é medir a fotocorrente com um valor baixo de polarização reversa. Onde o fator de multiplicação obtido com essa fotocorrente é unitário e relacioná-lo com os valores de fotocorrente em polarização de reverso alto, condição onde há presença do ganho. Pode-se ainda definir o fator de multiplicação é a relação da responsividade com ganho e sem ganho, e cumpre com a seguinte relação (figura 5.11, 5.12):

$$M = \frac{I_{F,M}}{I_{F,1}} \quad (5.7)$$

Procedimento:

O procedimento básico da medida é iluminar a área ativa do fotodiodo de avalanche, mantendo essa iluminação constante a um comprimento de onda fixo (694nm, 587nm, 562nm, 400nm, 468nm e 940nm) e medir a corrente no APD produzida pela luz nas seguintes condições:

- Sem ganho, com suficiente tensão de *bias* (aproximadamente $V_R = -15$ Volts) e
- Com ganho, com varias tensões de *bias* V_R

Com essas duas medidas o ganho para uma tensão de bias pode ser calculado usando-se a equação (5.7). As polarizações aplicadas são de -10 V no mínimo e -200 V como valor máximo. Quando a máxima tensão é aplicada deve-se tomar cuidado de não exceder a máxima potência de dissipação do dispositivo, o qual é (20 mW). Este limite é expresso por:

$$P = V_R \cdot I_{ph} \quad (5.8)$$

Onde

V_R tensão reversa aplicada

I_{ph} fotocorrente gerada.

Os valores máximos aplicados aos fotodiodos foram: $P = 200 \cdot 9 \times 10^{-5} = 18mW$

Os valores de ganho apresentam uma variação em relação aos dados técnicos do fabricante. Uma conclusão para esta variação é que a temperatura ambiente deve também ser garantida dentro da junção semicondutora do fotodiodo no momento da medição.

Há duas formas para garantir condições de temperatura ambiente na junção: o esfriamento do fotodiodo de avalanche ou a aplicação de um nível baixo de potência luminosa para manter uma variação de temperatura depreciável na junção.

Resultados:

No grupo dos gráficos das figuras 5.11 e 5.12, o resultado difere do esperado de acordo com as especificações do dispositivo. As medições com uma potência ótica diferente devem produzir só uma curva e essa deve passar em $M=100$ com uma tensão de operação de 160 V. Também pode ser comentado que o fator de multiplicação diminui de acordo com o incremento da temperatura gerado pelo consumo de energia elétrica na junção PN e a geração da corrente no escuro.

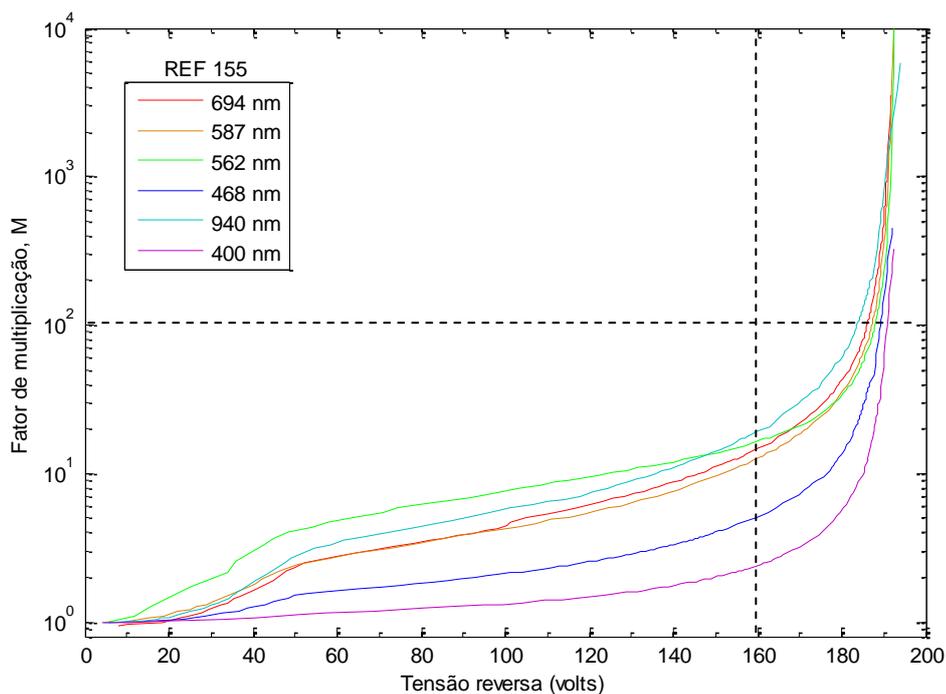


Figura 5.11 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 155 com potência luminosa 2. Método experimental

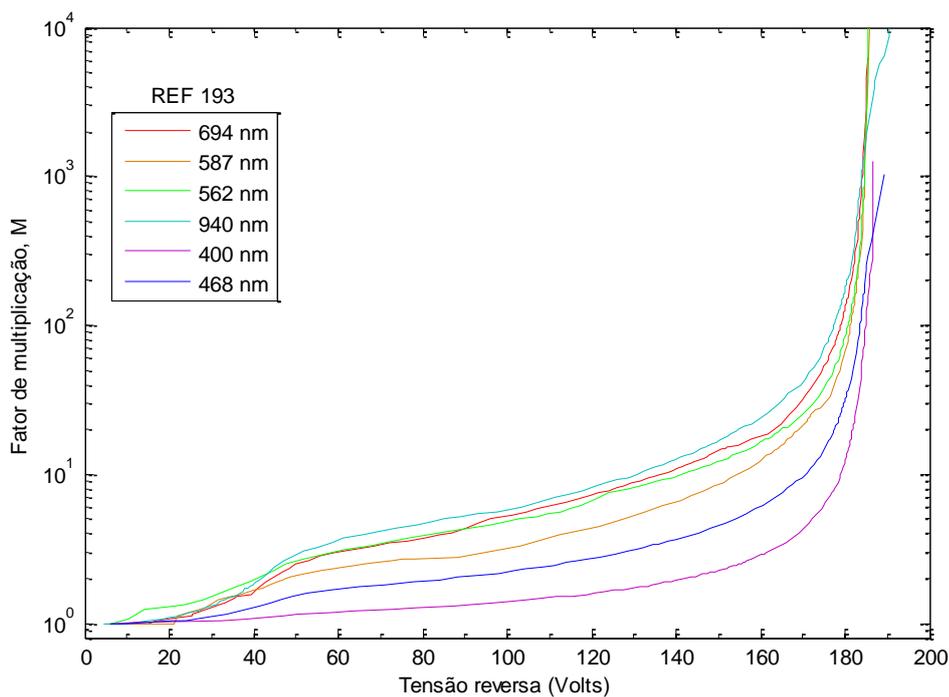


Figura 5.12 - Fator de multiplicação em relação à tensão de polarização para o fotodetector 193 com potência luminosa 2. Método experimental

O comportamento de fenômeno de avalanche é possível observar nos gráficos das figuras 5.11 e 5.12, ao comparar um ponto do valor de ganho em função à tensão reversa ficou distante do experimental, mais uma vantagem destes gráficos é que o ganho das cargas corresponde a um valor real de mediada para essa referencia de fotodiodo de avalanche.

5.1.1.6 Corrente no escuro

A corrente no escuro está presente no fotodiodo de avalanche está composta pela corrente de dispersão da superfície I_{DS} fluente através da interface entre a junção PN e a camada de oxido de silício e a corrente interna I_{DG} gerada dentro do substrato de Si. A corrente no escuro total (I_D) é mostrada na equação (2.30).

Procedimento

Primeiro é medida a corrente no escuro a diferentes valores de polarização reversa sobre cada fotodiodo de avalanche. Assim observa-se o comportamento da multiplicação dessa corrente no fotodiodo. Na figura 5.13 é mostrado esse comportamento do fenômeno de avalanche na corrente no escuro em relação à tensão de polarização de reverso aplicada.

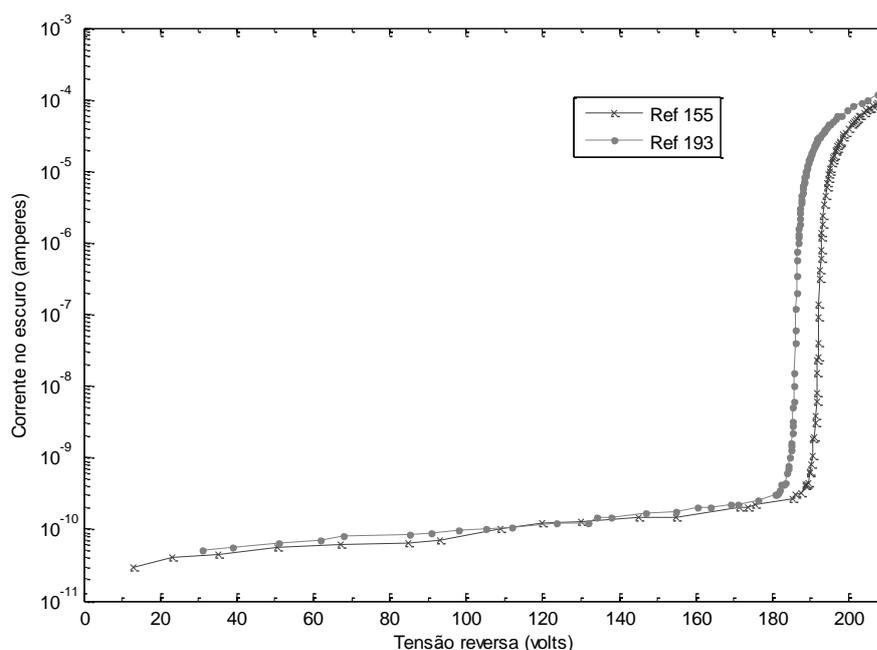


Figura 5.13 - Corrente no escuro $T=27^{\circ}\text{C}$

A figura 5.13 mostra que a corrente no escuro tem o mesmo comportamento que uma fotocorrente gerada por uma intensidade luminosa aplicada. Portanto essa corrente também vai ser multiplicada a altas tensões elétricas reversas. Calcula-se o valor do ganho para cada valor da tensão de reverso aplicada para obter uma relação do ganho em corrente no escuro em função da fotocorrente gerada na condição sem luz. Este processo é feito para as duas referências de fotodiodo.

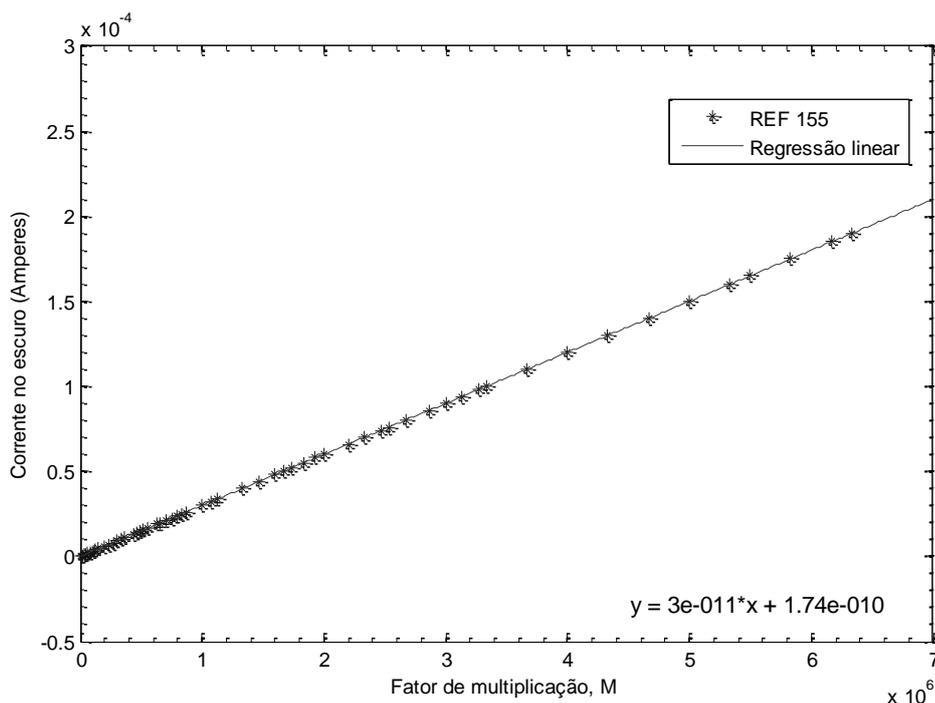


Figura 5.14 - Corrente no escuro em relação com o fator de multiplicação para o fotodiodo de ref. 155

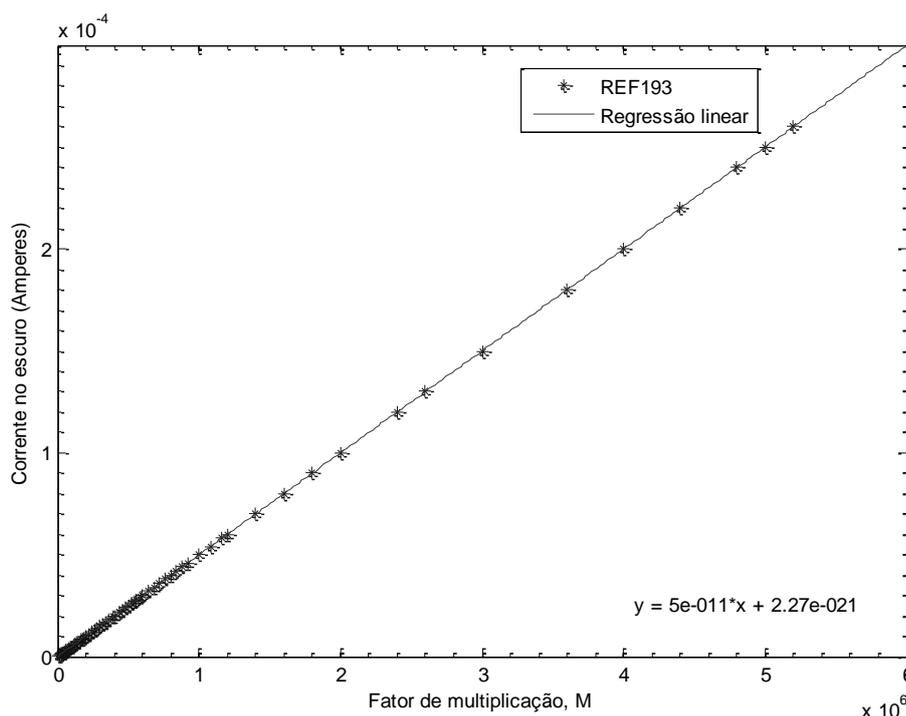


Figura 5.15 - Corrente no escuro em relação com o fator de multiplicação para o fotodiodo de ref. 193

Com os gráficos das figuras 5.14 e 5.15 é possível encontrar os valores das componentes da corrente no escuro gerada no meio da junção PN e do óxido de silício dentro do substrato de silício nos dois fotodiodos de avalanche. Tomando o gráfico e fazendo um ajuste linear, obtém-se uma equação relacionada com a equação (2.30) que corresponde à corrente total no escuro.

Para ref. 155

$$I_D = 1.74 \times 10^{-10} + M \cdot 3 \times 10^{-11}$$

$$I_{DS} = 1.74 \times 10^{-10}$$

$$I_{DG} = 3 \times 10^{-11} \text{ A}$$

Para ref. 193

$$I_D = 2.27 \times 10^{-21} + M \cdot 5 \times 10^{-11}$$

$$I_{DS} = 2.27 \times 10^{-21}$$

$$I_{DG} = 5 \times 10^{-11} \text{ A}$$

Segundo os dados do fabricante o valor típico de corrente no escuro é 2nA ou um valor máximo de 10nA. O valor de corrente no escuro medido para um ganho de 100 foi de 5nA para o APD 193 e 3nA para o APD 155 e esses valores estão dentro dos dados esperados porque coincidem com os valores fornecidos pelo fabricante. Esses valores de corrente obtidos devem ser subtraídos da fotocorrente gerada por luz para ter um valor de sinal correto equivalente à intensidade luminosa incidida.

5.1.1.7 Fator de ruído

O fator de ruído pode se encontrar pela equação da densidade de ruído espectral do fotodiodo de avalanche, de acordo com a equação (5.9)

$$I_n^2 = 2 \cdot q \cdot (I_{DS} + I_{DG} \cdot F(M) \cdot M^2) \quad (5.9)$$

Onde

q: carga do elétron

IDG: componente da corrente no escuro multiplicada.

IDS: componente da corrente no escuro sem multiplicar.

M: fator de multiplicação

F: fator de ruído.

Tomando-se a equação (5.9) pode se calcular o valor de F para um valor de fator de multiplicação M e densidade de corrente de ruído espectral I_n conhecido. Partindo das especificações do fabricante do fotodiodo de avalanche, para um valor de ganho de $M=100$; $I_n= 0.12 \text{ pA/Hz}^{1/2}$, temos:

$$F = \frac{I_n^2 - 2 \cdot q \cdot I_{DS}}{2 \cdot q \cdot I_{DG} \cdot M^2} \quad (5.10)$$

$$F = \frac{(0.12 \times 10^{-12})^2 - 2 \cdot 1.602 \times 10^{-19} \cdot 1.74 \times 10^{-10}}{2 \cdot 1.602 \times 10^{-19} \cdot 3 \times 10^{-11} \cdot 100^2} = 0.0895 \quad \text{ref 155}$$

$$F = \frac{(0.12 \times 10^{-12})^2 - 2 \cdot 1.602 \times 10^{-19} \cdot 2.27 \times 10^{-21}}{2 \cdot 1.602 \times 10^{-19} \cdot 5 \times 10^{-11} \cdot 100^2} = 0.0898 \quad \text{ref 193}$$

$$F = M \cdot k + \left(2 - \frac{1}{M}\right) \cdot 1 - k \quad (5.11)$$

Tomando da equação (5.11) pode se encontrar o valor de k com $M= 100$ e $F= 0.089$
 k para a referência 155 e um valor de ganho de 100 é -0.018
 k para a referência 193 e um valor de ganho de 100 é -0.0176

Os valores do fator de ruído são baixos, mais a densidade de ruído espectral não foi medida. Foi usado um valor estimado do fabricante, porém para calcular o fator de ionização k não foi obtido um valor certo. O valor encontrado é negativo, mais este valor está coerente se comparado com PERKINELMER-INC (2000) e HAMAMATSU (2004) porque tem a mesma magnitude.

5.1.1.8 Conexão do fotodiodo em polarização direta

Também foi realizada uma pequena análise em polarização direta. O fotodiodo de avalanche é polarizado diretamente por meio do gerador de curvas ou analisador de parâmetros para semicondutores da marca HP modelo 4150A. A conexão é feita para as duas referências de APD 155 e 193. A resposta da foto corrente em função da polarização direta é mostrada nas figuras 5.17 e 5.18.

No fotodetector existe uma corrente de saturação I_S . Essa corrente pode ser medida partindo da consideração de I_F em função da tensão quando o fotodetector está em polarização direta. I_S é diretamente proporcional à área ativa do fotodetector por essa razão varia significativamente de dispositivo para dispositivo.

A Corrente de joelho (*Knee Current*), (I_K) é o ponto onde começa o fenômeno da avalanche, e esta pode ser encontrada pela interseção das assíntotas de baixa corrente e alta corrente do gráfico do I_F em função da tensão de reverso (GETREU, 1976), esta corrente é mostrada na figura 5.16.

A figura 5.17 mostra a variação da fotocorrente em função da tensão em polarização direta ou relação ao qV_B/kT . A assíntota da baixa corrente pode ser aproximada na equação (5.12) por:

$$I_F = I_S \cdot \left(e^{\frac{qV_K}{kT}} \right) \quad (5.12)$$

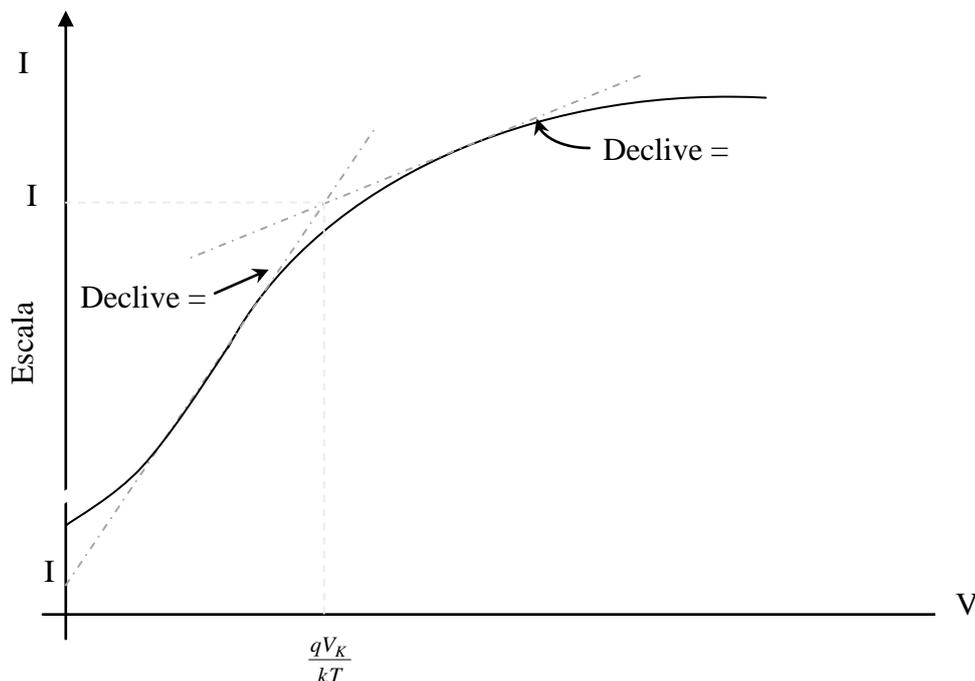


Figura 5.16 - Método gráfico para encontrar a corrente de joelho. Resposta do fotodiodo com polarização direta (Adaptado de GETREU, 1976)

A assíntota de alta corrente é mostrada pela equação (5.13) a seguir:

$$I_K = \sqrt{\frac{Q_N \cdot I_S}{\tau} \left(e^{\frac{qV_K}{2kT}} \right)} \quad (5.13)$$

As interseções dessas duas assíntotas definem a corrente e a tensão de joelho (I_K e V_K). Nessa condição a corrente de joelho é definida na equação (5.14), como:

$$I_K = I_S \cdot \left(e^{\frac{qV_K}{kT}} \right) \quad (5.14)$$

E, resolvendo-se as equações (5.13) e (5.14), obtém-se:

$$I_K = \frac{Q_N}{\tau} \quad (5.15)$$

Um método preciso para se obter I_S é a partir do gráfico da fotocorrente pela tensão de polarização direta, extrapolando-se a curva na parte do valor de baixa corrente, mostrado na figura 5.17, (GETREU, 1976).

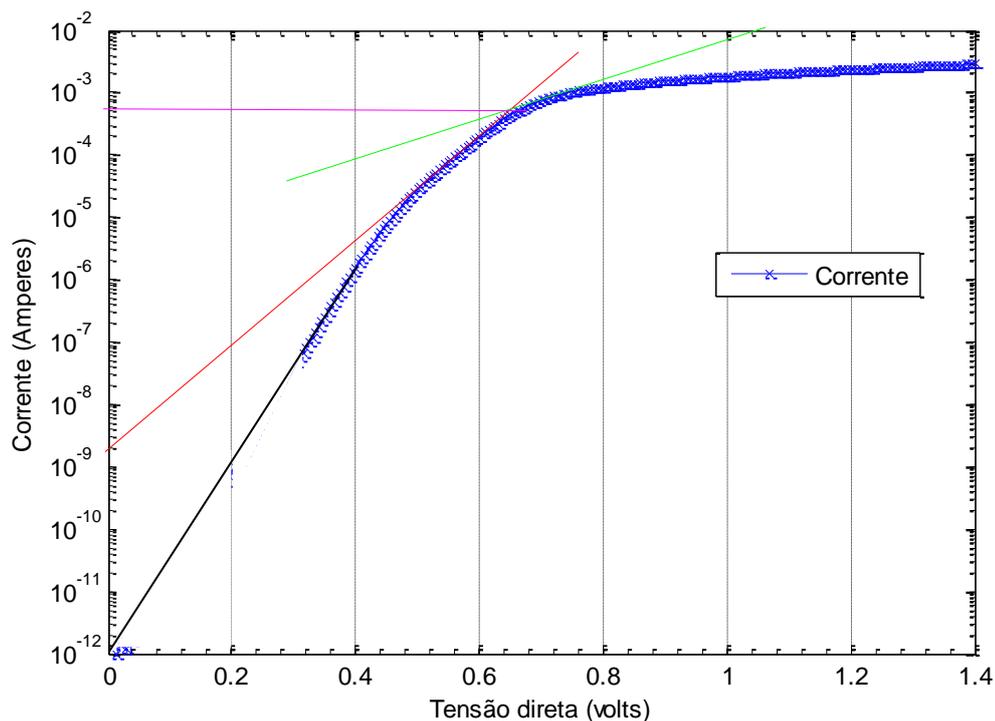


Figura 5.17 - Resposta do fotodiodo de avalanche ref 193 em polarização direta

Para comprovar a correta posição das assíntotas, realiza-se a regressão linear para encontrar uma equação característica e compara-se o declive das duas assíntotas de baixa e alta corrente, onde uma deve ter a metade do declive da outra. Essas curvas são mostradas nas figuras 5.18 para cada referência do fotodetector de avalanche.

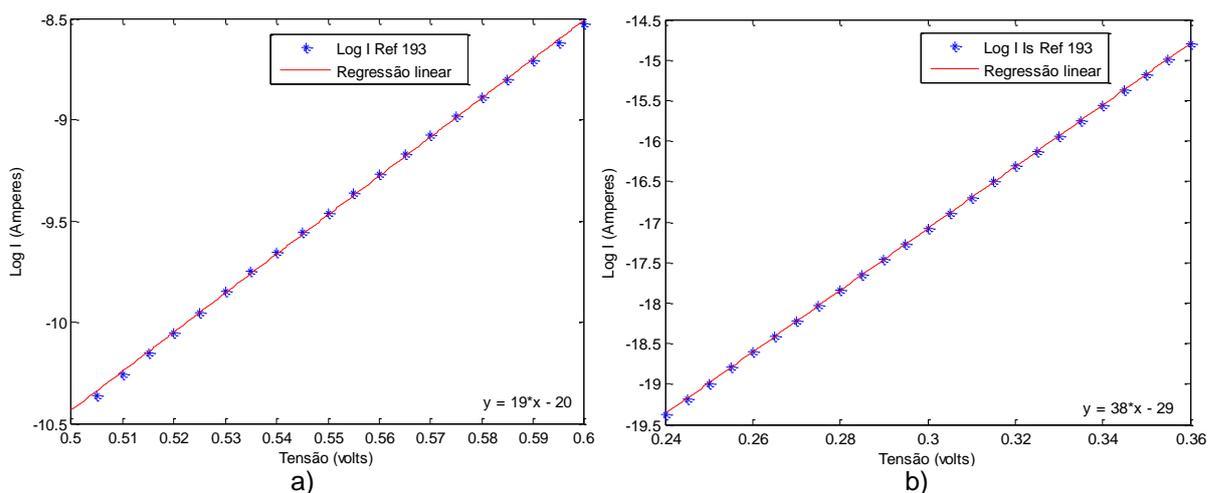


Figura 5.18 - Assíntotas indicando em a) corrente de alta injeção e b) corrente de baixa injeção para o fotodiodo de avalanche 193

Equações das assíntotas para o fotodiodo de avalanche referência 193

$$Y = 19 \cdot x - 20$$

$$Y = 38 \cdot x - 29$$

Da intersecção das assíntotas é encontrada a corrente de saturação (I_S) e a corrente de joelho (I_K) para o fotodiodo 193

$$I_K = 0.15 \times 10^{-5} \text{ A}$$

$$I_S = 3.5 \times 10^{-13} \text{ A}$$

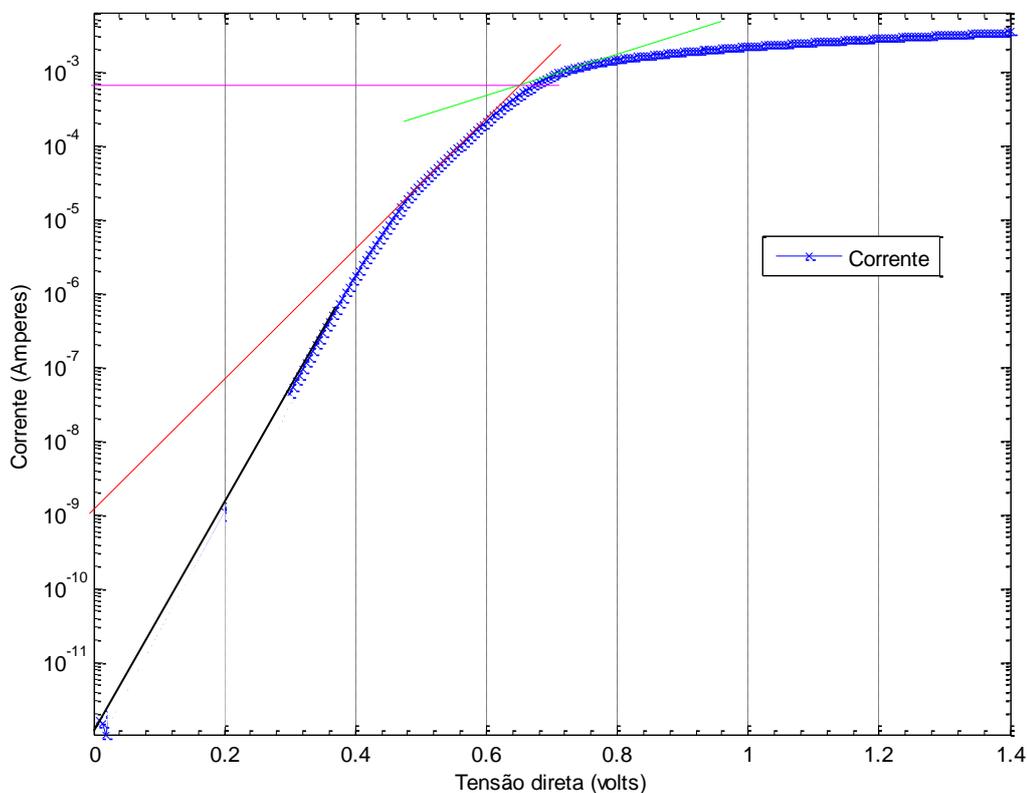


Figura 5.19 - Resposta do fotodiodo de avalanche ref 155 em polarização direta

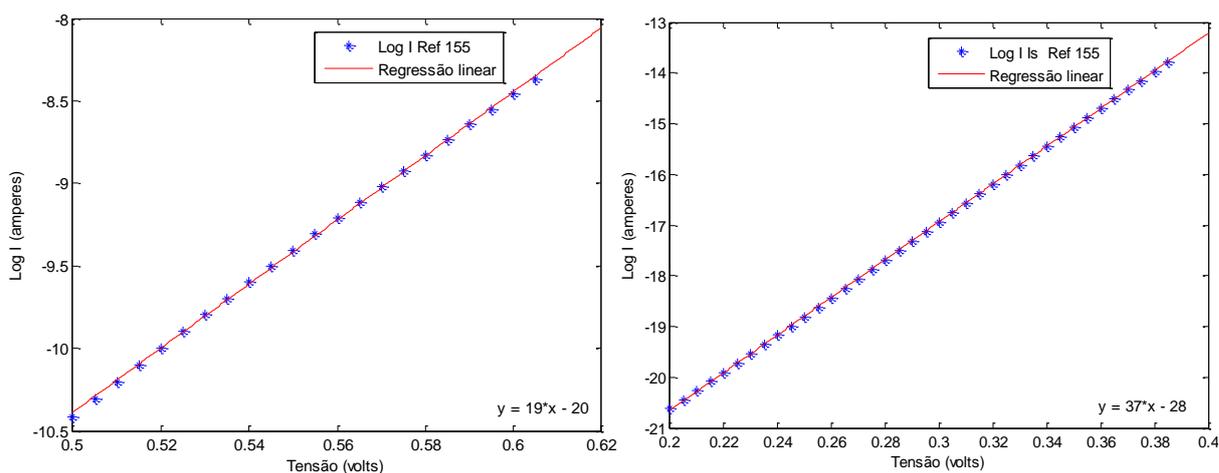


Figura 5.20 - assíntotas indicando a corrente de alta e baixa injeção para o fotodiodo de avalanche 155

Equações das assíntotas para o fotodiodo de avalanche referência 155 (figura 5.20)

$$Y = 19 \cdot x - 20$$

$$Y = 37 \cdot x - 28$$

Da intersecção das assíntotas da figura 5.19 é encontrada a corrente de saturação (I_S) e a corrente de joelho (I_K) para o fotodiodo 155

$$I_K = 0.5 \times 10^{-5} \text{ A} \quad I_S = 8 \times 10^{-13} \text{ A}$$

Os resultados da corrente de joelho não têm nenhuma referência de algum valor pelo fabricante. A única verificação feita foi os declives nas correntes de alta e baixa injeção. A corrente de alta injeção deve ser o dobro da corrente de baixa injeção. Isso foi feito para as duas referências de fotodiodo de avalanche.

5.2 Medições com fotodetector EMCCD

A seguir, são mostrados os resultados obtidos nos testes com EMCCD. Devido às limitações no funcionamento completo do dispositivo, foi possível obter apenas características como: a variação da tensão em função aos fótons incididos, ganho estimado do sistema, corrente no escuro e sua dependência com a temperatura, estimativa do ruído de leitura e linearidade do dispositivo.

As condições para obter essas características foram um tempo de exposição variável até 12 segundos, frequência de leitura de 1MHz e 10MHz, uma tensão constante na alta fase do EMCCD de 30 volts e uma temperatura de esfriamento variável desde a temperatura ambiente até -100°C .

5.2.1 Sinal elétrico na saída do EMCCD sem amplificação.

A representação da variação da tensão em função à quantidade de corrente aplicada no LED vermelho, amarelo e verde está nas figuras 5.21 até 5.23. Esses gráficos foram adquiridos à temperatura -100°C e tempo de exposição de 0.75 s.

Para realizar a medição da tensão equivalente do pixel, deve-se tomar o sinal elétrico e tomar uma tensão de referência equivalente onde é encontrada depois do pico R3 quando a tensão se torna constante com valor perto do zero. O valor máximo da tensão equivalente ao pixel está antes do R3. A tensão equivalente à informação adquirida pelo pixel é a diferença entre a tensão de referência e o valor máximo do sinal do pixel, como se pode notar na figura 5.21.

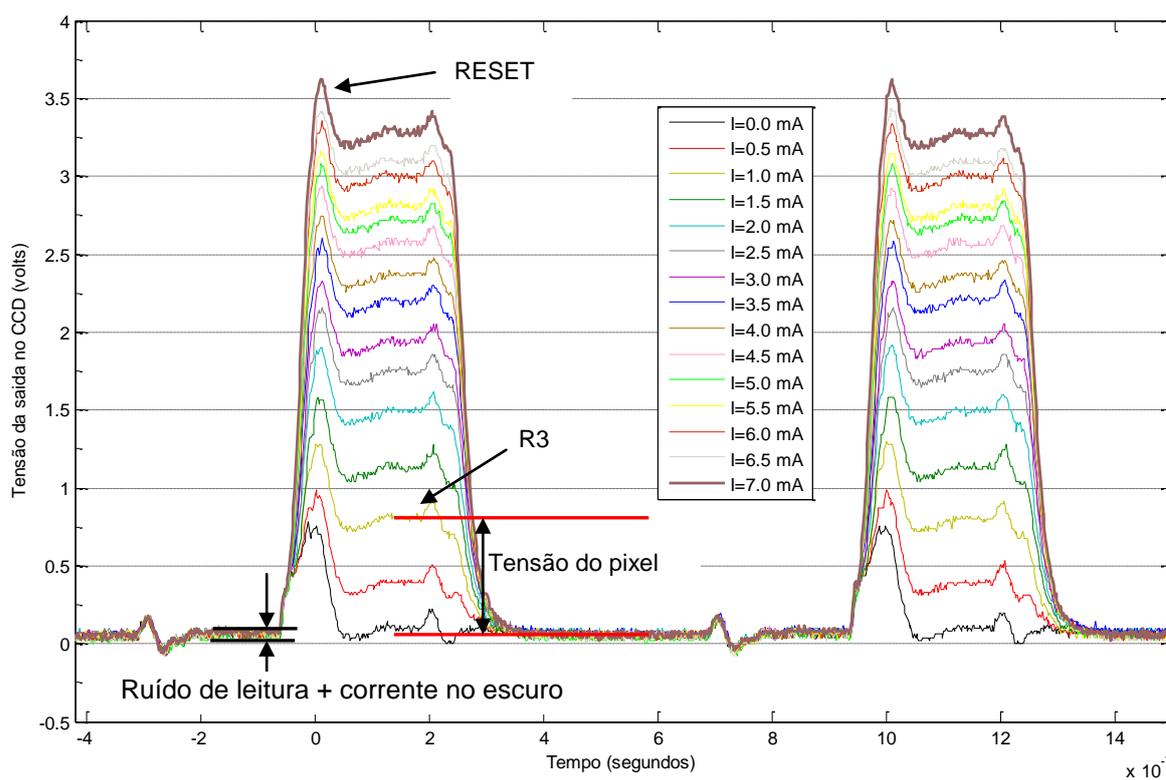


Figura 5.21 - Tensões de saída no EMCCD para o LED vermelho para diferentes valores de corrente

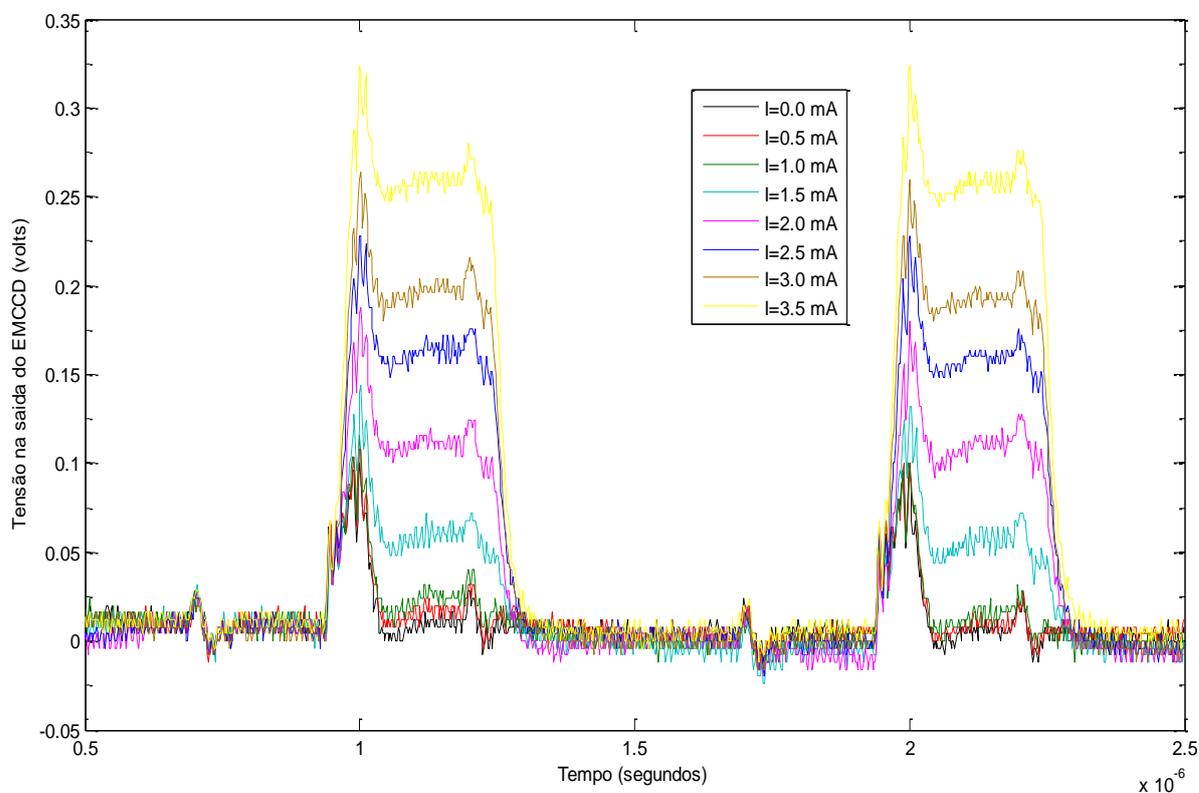


Figura 5.22 - Tensões de saída no EMCCD para o LED amarelo para diferentes valores de corrente

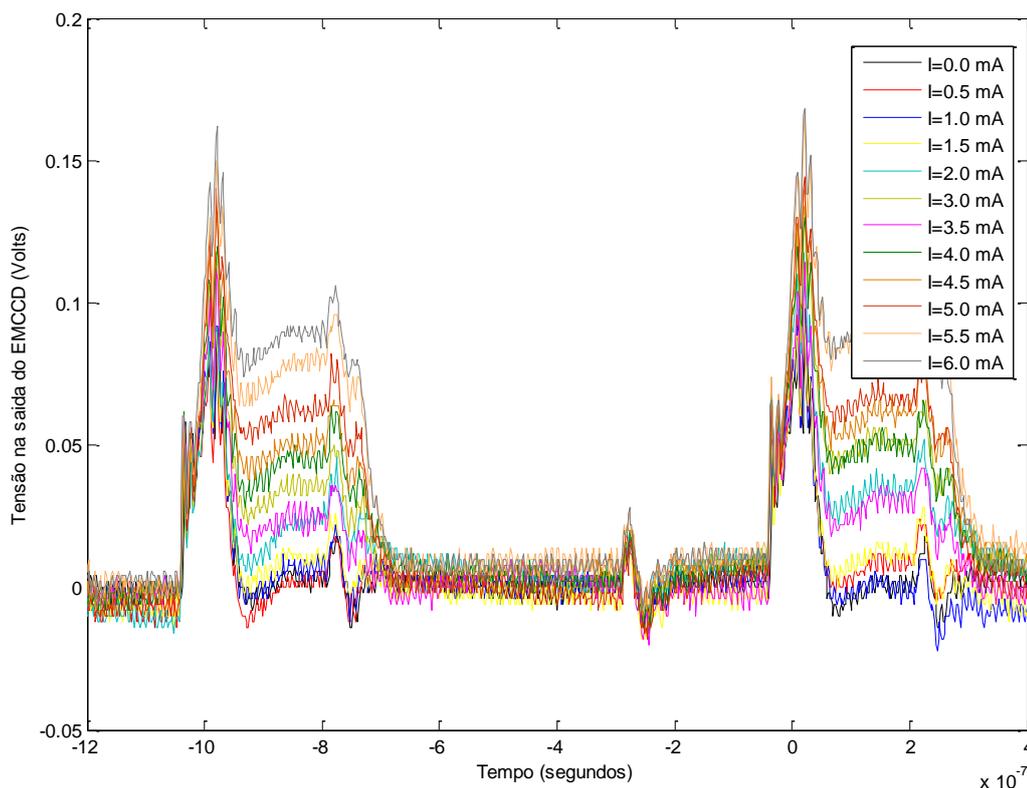


Figura 5.23 - Tensões de saída no CCD para o LED verde para diferentes valores de corrente

Com esse gráfico é possível fazer uma análise da variação da tensão para cada cor do LED. A figura 5.24 mostra a variação da tensão da saída do EMCCD em relação à corrente em cada LED.

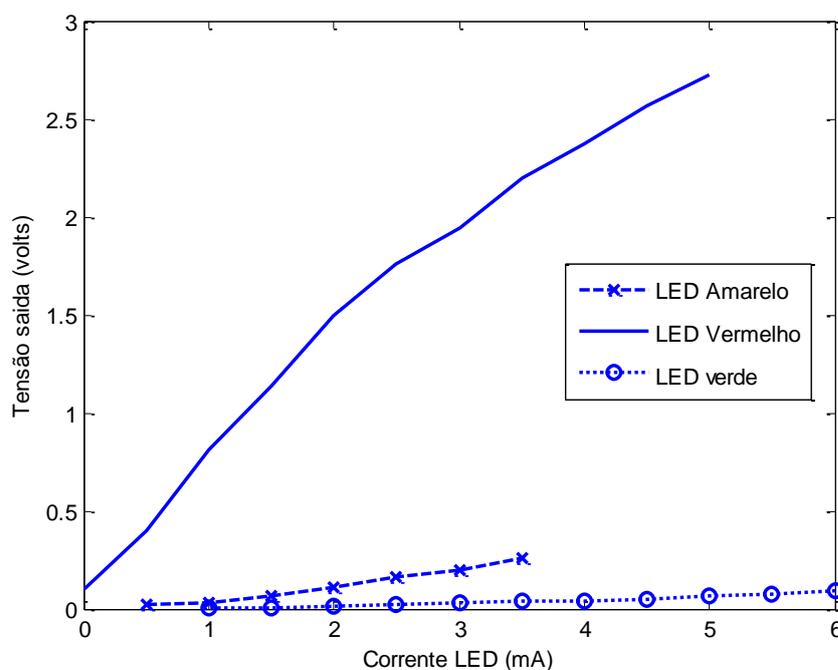


Figura 5.24 - Tensões de saída no CCD para cada cor do LED

As figuras 5.25 e 5.26 indicam uma relação entre a variação de tensão da saída do EMCCD e a quantidade de fótons incididos.

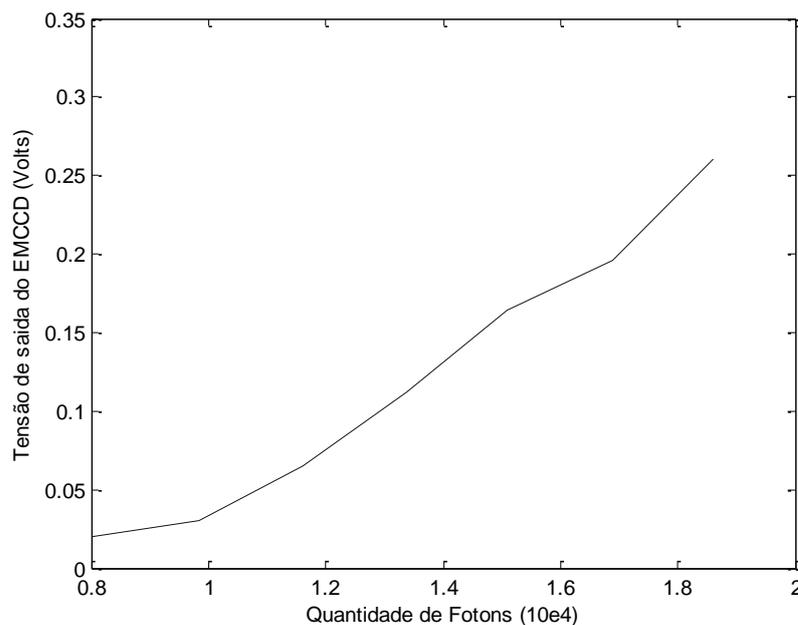


Figura 5.25 - Variação da tensão de saída do EMCCD em função da quantidade de fótons incidentes para o LED amarelo

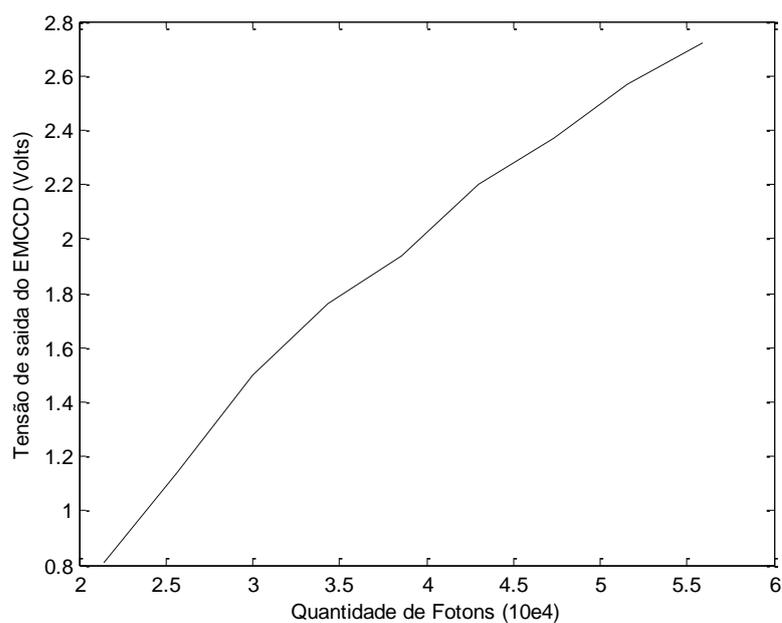


Figura 5.26 - Variação da tensão de saída do EMCCD em função à quantidade de fótons incidentes para o LED vermelho

As figuras 5.25 e 5.26 mostram a relação da tensão na saída do EMCCD a diferentes potências luminosas, expressas em quantidade de fótons coletados, em um tempo de exposição de 750ms. Observa-se a diferença entre a cor amarela e vermelha, onde a resposta é mais fraca para a cor amarela, porque há uma captura de fótons menor no mesmo tempo de exposição devido á potência luminosa emitida conseguida pelo LED.

5.2.2 Linearidade

O procedimento para determinar a linearidade do EMCCD é aumentar-se o tempo de exposição dos quadros planos (*flat Field*) até conseguir a saturação do dispositivo. No caso dos testes realizados não foi possível conseguir a saturação do EMCCD porque a placa eletrônica não tinha uma sincronização para captura de imagens a tempos de exposição maiores que 12 segundos.

O tempo de exposição se expressa como t , tomando uma série de quadros planos com exposições de duração de 12, 10.8, 8.4, 7.2, 6.0, 4.8, 3.6, 2.4, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15, 0.075 em segundos, logo, são usadas as séries das exposições tomadas e calcula-se a média aritmética dos ADUs por pixel. Fazer-se a representação gráfica dos valores em ADU das médias aritméticas dos quadros em função do tempo de exposição em segundos, (listada na Tabela 5.8.). Essa representação é mostrada na figura 5.27.

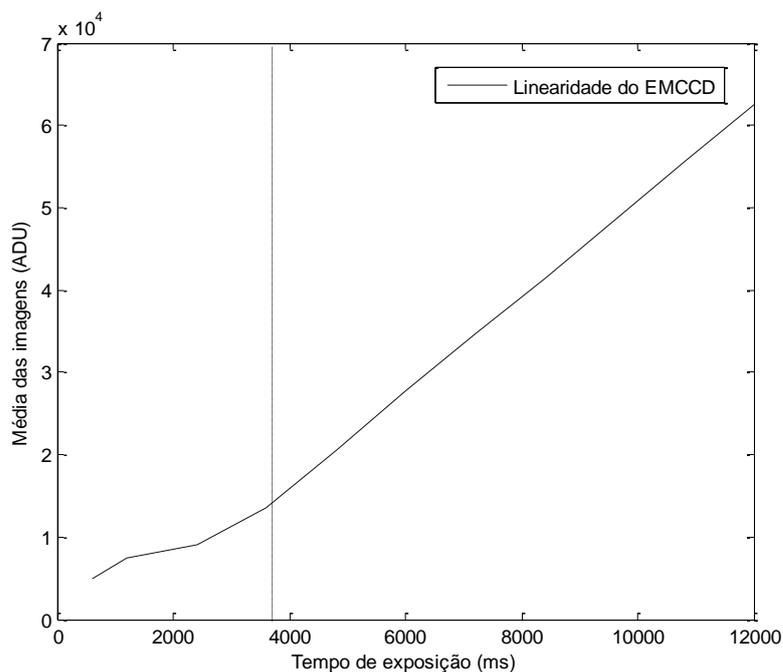


Figura 5.27 - linearidade do EMCCD

Tabela 5.8- média das imagens para diferentes valores de tempo de exposição

Tempo de exposição (ms)	Média da contagem (ADU)	Tempo de exposição (ms)	Média da contagem (ADU)
12000	62539	4800	20480
10800	55506	3600	13490
8400	41284	2400	9049
7200	34662	1200	7323
6000	27783	600	4921

A figura 5.27 mostra uma resposta linear do EMCCD na faixa dos 3800ms até 12000ms de tempo de exposição. Para tempos de exposição abaixo de 3800 ms apresentou uma variação no comportamento linear pela ausência do obturador e falta de sincronia na placa eletrônica. Capturando mais fótons ou captura de imagens incompletas variando o declive da resposta do dispositivo apresentando respostas não lineares.

5.2.3 Ganho

O ganho é calculado tomando o procedimento descrito no capítulo 2 na seção 2.4 onde se usa imagens planas e imagens *bias*. Serão denominados os valores médios de cada quadro *bias* \bar{B}_1 \bar{B}_2 e \bar{F}_1 \bar{F}_2 correspondem ao os valores das imagens planas. Tomando a equação (2.24) é calculado o valor de ganho do sistema para a cor vermelha e um tempo de exposição de 750ms. Esses ganhos calculados estão na tabela 5.9:

Tabela 5.9 Ganho e ruído de leitura na saída amplificada do EMCCD com um valor constante na fase de alta tensão.

Intensidade luminosa (nW)	Ganho (e- per ADU)	Ruído de leitura (e-)
0.150	1.28	33.52
0.200	1.26	32.90
0.250	1.22	31.80
0.300	1.38	36.08
0.340	1.40	36.58
0.375	1.60	41.92
0.400	1.62	42.46
0.430	1.63	42.57
0.470	1.63	42.64
0.500	1.72	44.99
0.540	1.74	45.58
0.580	1.85	48.25
0.620	1.88	49.22
0.670	1.94	50.63

Neste caso o ganho foi calculado para uma tensão de alta fase com um valor constante, um comprimento de onda equivalente à cor vermelha e várias intensidades luminosas (Figura 5.28). Observa-se a relação na resposta do ganho com o valor da intensidade luminosa aplicada, onde pode surgir alguma amplificação, pois o ganho é calculado a partir de imagens tomadas na saída amplificada do EMCCD. Mais esse ganho não é controlado porque somente foi aplicada uma tensão constante na fase que origina a multiplicação de elétrons no

registro de saída. Dessa forma o funcionamento do sistema se equivale ao de um CCD convencional.

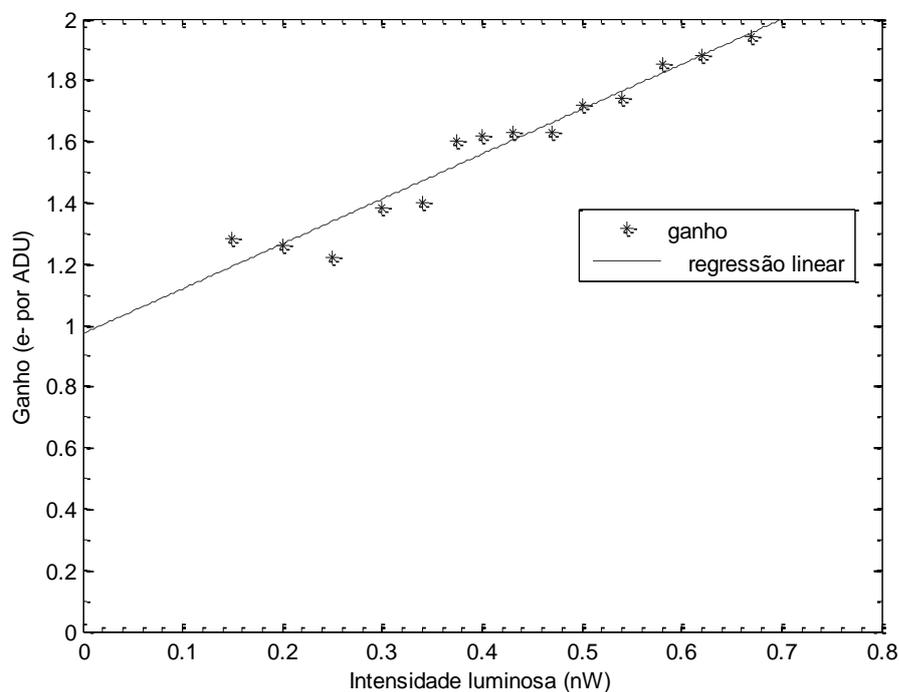


Figura 5.28 - Ganho do EMCCD na saída amplificada em função a intensidade luminosa aplicada com uma tensão constante

Os valores de ganho do sistema estão conforme a literatura (HOWELL, 2006) onde há valores comuns de 0.8 a 1 elétron per ADU. No caso do EMCCD caracterizado são necessários aproximadamente 1.55 elétrons para gerar um ADU. O ruído de leitura especificado pelo fabricante é 37 elétrons mais é aclarado que esse valor é estimado pelo leiaute do dispositivo. O ruído de leitura médio medido foi da ordem de 41,9 e⁻ rms, valor de ruído de leitura aceitável por estar perto do valor do fabricante. Uma vez que o valor fornecido pelo fabricante é inferido e não experimental, torna-se difícil fazer uma comparação. Vale lembrar ainda que o sistema eletrônico de controle também acrescenta ruído de leitura na imagem.

5.2.4 Corrente no escuro

Foram capturadas 10 imagens com um tempo de exposição de 5 segundos para diferentes valores de temperatura. Foi obtida a média de cada grupo de dez imagens nas mesmas condições de temperatura. Os valores dessa temperatura eram variáveis de 0°C até -100°C. A Figura 5.29 mostra essa variação da corrente.

A medida da corrente de escuro obtida das imagens em condições escuras é em unidades de ADU, e pelo geral para ser comparada com os dados do fabricante deve ser convertida a $e^- / \text{pixel} / \text{segundo}$, essas unidades são obtidas pela equação (5.16), e os dados listados estão na tabela 5.10

$$\bar{D} = \frac{\text{gain} \cdot \bar{D}_{ADU}}{t} \quad (5.16)$$

Tabela 5.10 Valores de corrente de escuro com diferentes temperaturas

Temperatura °C	Media Quadros escuro (ADU)	Corrente escuro (e-/pixel/s)
0	617,7	62,8
-20	443,8	45.11
-40	283,0	28.77
-60	153,2	15.57
-80	97,27	9.88
-100	2,3	0.23

O comportamento da corrente de escuro é como manifesta a e2V-TECHNOLOGIES (2004), diminui quando é garantida uma temperatura baixa sobre o dispositivo detector, neste caso a temperatura menor conseguida foi -100°C com um valor de corrente de escuro de $0.23 \text{ e-}/\text{pixel}/\text{s}$, conclui-se a melhor solução de diminuir a corrente no escuro é somente diminuir a temperatura de operação do EMCCD.

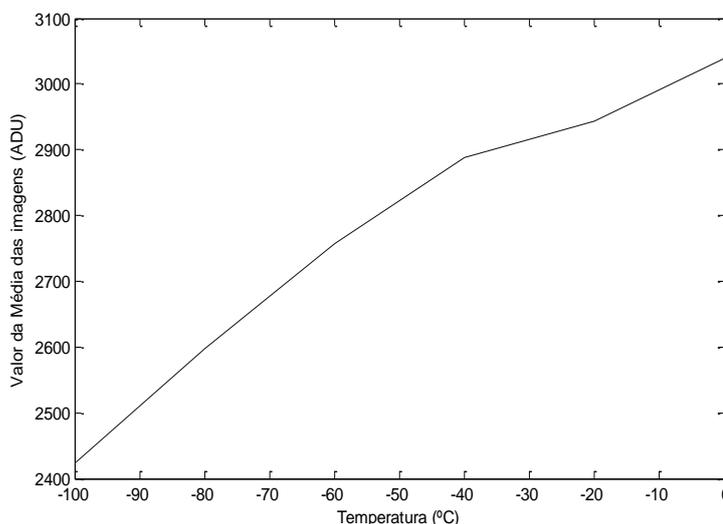


Figura 5.29 - corrente no escuro em ADUs em função da temperatura do dispositivo EMCCD

A figura 5.30 mostra a corrente no escuro do EMCCD em unidades de $e^-/\text{pixel}/\text{s}$, dados calculados com a equação 5.16.

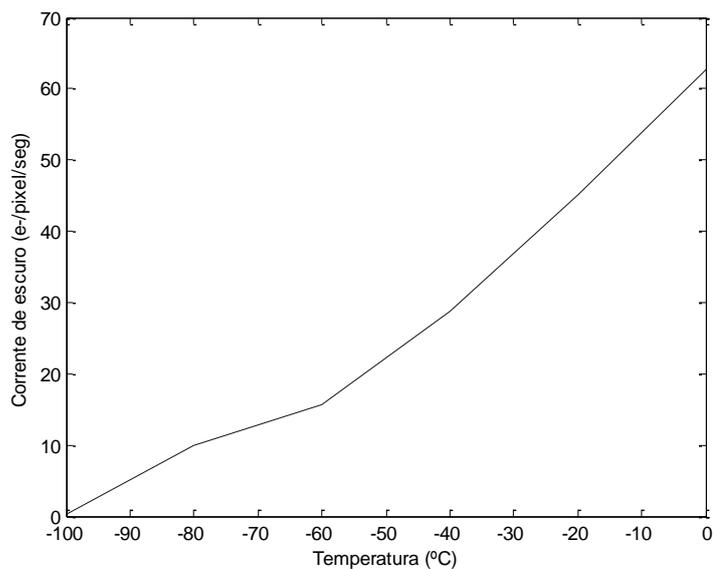


Figura 5.30 - Corrente no escuro em e⁻/pixel/segundo em função da temperatura do dispositivo EMCCD

Conclui-se que o método para diminuir a corrente no escuro é somente baixar a temperatura de operação do dispositivo. Entretanto não é recomendado diminuir-se a temperatura a valores muito baixos porque pode existir um incremento no ruído de cargas espúrias, devido que a baixas temperaturas a ionização por impacto tem uma alta mobilidade de portadores adicionando-os ao sinal de saída.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

Durante os experimentos realizados o sistema de teste apresentou um bom acoplamento com as câmeras de teste do EMCCD, pois houve um isolamento de luz externa na câmara escura para a emissão de fótons. A fonte elaborada para iluminar os dispositivos fotodetectores apresentou um desempenho ótimo em termos de estabilidade luminosa, tendo uma variação de 0.005 nW/cm valor desprezível para as medições tomadas nos experimentos.

Devido às limitações no funcionamento da placa eletrônica de aquisição do EMCCD, conseguiu-se a aquisição de imagens para uma caracterização do dispositivo detector apenas para as condições mínimas de funcionamento, não sendo ainda possível chegar a uma operação otimizada. Nessas condições foi possível encontrar para EMCCD as seguintes características: corrente de escuro, ruído de leitura, linearidade, ganho estimado do dispositivo sem multiplicação de elétrons.

Em termos de valor da corrente de escuro no EMCCD, o melhor resultado foi de 0,23 e-/pixel/s. obtido a uma temperatura de -100°C . Este valor comparado com a folha de dados do fabricante do EMCCD cujo valor é de 0,002 e-/pixel/s, é alto. Mas deve-se tomar cuidado com a temperatura de operação do EMCCD, pois outros ruídos ainda são gerados, tais como a geração das cargas espúrias, apesar de terem sido desprezíveis para as condições de medida realizadas. Entretanto, no modo de alto ganho com multiplicação de elétrons e a uma frequência de 10 MHz na leitura dos dados de imagens, não é recomendável a utilização da faixa dos -100°C de temperatura até que se obtenha uma medida confiável das cargas espúrias.

Nos termos de linearidade o EMCCD apresentou uma resposta completamente linear com tempos de exposição na faixa dos 3800ms até 12000ms, somente para os tempos de exposição menores o EMCCD apresentou uma variação devido a uma dessincronização na captura de imagens, onde o EMCCD não capturava uma imagem completa gerando um valor em ADU quase constante. Vale ressaltar novamente que isso se deve a um problema no funcionamento do controlador eletrônico do EMCCD.

O ganho calculado para o EMCCD foi, somente o gerado pelo próprio dispositivo, e, esse foi obtido para várias intensidades luminosas. O valor médio encontrado para o ganho foi de $1,6 e^-/\text{pixels/s}$. esse valor é alto para um CCD regular. Conforme a literatura um valor de ganho comum para um CCD é $0,8 e^-/\text{pixels/s}$. Conclui-se que o ganho apresenta valores altos devido a que no processo para o cálculo foram usadas imagens planas e *bias*, e em especial as imagens *bias* estavam com valores médios em ADU altos, gerando um incremento no valor do ganho. O ganho do registro multiplicativo de elétrons não foi medido devido à problemas na placa eletrônica do EMCCD. Esse problema consiste basicamente da falta de sincronização da placa eletrônica, a tensão na fase de multiplicação durante todos os testes realizados foi mantida fixa, pois uma pequena variação em seu valor fazia com que a imagem adquirida ficasse imprópria para análise.

Em termos de ruído de leitura o EMCCD apresentou uma média de $41,57 e^- \text{ rms}$ a uma frequência de captura de 10 MHz. Este valor de ruído é alto porque o método para ser calculado depende do ganho obtido, mas este valor de ruído é consistente ao valor de $37 e^- \text{ rms}$ fornecido pelo fabricante. Deve-se levar em conta ainda que o valor fornecido na folha de dados do fabricante é referenciado em condições de *leiaute* e não medido.

No fotodiodo de avalanche obteve-se uma melhor caracterização de suas propriedades ópticas e elétricas, dado que foi possível obter uma polarização reversa até 200 volts permitindo chegar à avalanche do dispositivo e condições estáveis na emissão de luz. Foram medidas a corrente de escuro, responsividade, eficiência quântica, ganho em função da tensão reversa e a corrente de joelho em polarização direta.

Obtiveram-se os níveis da corrente de escuro para diferentes valores de polarização. O fenômeno de avalanche influencia nesta corrente, já que ela é multiplicada da mesma forma que uma fotocorrente gerada pela luz incidente. Assim a amplificação deste ruído é proporcional à tensão de polarização reversa. A corrente no escuro medida foi de 5nA para o APD 193 e 3nA para o APD 155 estando em valores dentro da faixa do fabricante que corresponde de 2nA até 10nA .

Foi possível representar em um gráfico a multiplicação de elétrons por ionização por impacto na caracterização de fotodiodos de avalanche. Esse ganho causado pela ionização aumenta de forma proporcional à tensão aplicada no fotodiodo de avalanche e varia de acordo com o comprimento de onda aplicado. Pode-se relacionar este fenômeno com o fotodetector EMCCD, porque é o mesmo que ocorre em um só estágio no registro de multiplicação de alto ganho do EMCCD.

Todos os dados obtidos na caracterização do fotodiodo de avalanche são consistentes com os parâmetros fornecidos pelo fabricante. Houve apenas uma certa margem de erro entre as duas referências usadas: 155 e 193 devido ao processo de fabricação do fotodiodo de avalanche.

Assim, podemos concluir que os objetivos deste trabalho foram alcançados quase em sua totalidade. Como já citado anteriormente devido a algumas limitações da parte eletrônica do EMCCD. Não foi possível fazer uma caracterização de todas as propriedades do fotodetector EMCCD.

6.1 Trabalhos futuros

- Realizar uma análise completo da eficiência térmica das câmeras refrigeradas com célula Peltier e nitrogênio líquido. Comparando-se as duas e investigando-se qual leiaute é o mais indicado para os testes sugeridos.
- Com a seção eletrônica do controlador EMCCD funcionando corretamente encontrar o ganho do registro de multiplicação, e observar suas variações quando são aplicadas diferentes formas e níveis do sinal aplicado na fase de alta tensão. Além disso, observar a presença e comportamento dos ruídos de leitura e CIC.
- Melhorar o sistema de teste na parte do controle da intensidade luminosa a emitir à câmera, criar uma fonte que possa ser controlada pelo computador. Para obter uma maior análise do dispositivo é aumentar as opções de comprimentos de onda desde o ultravioleta até o infravermelho.

REFERÊNCIAS

ADVANCED-PHOTONICS. Small Area Avalanche Photodiode SD 012-70-62-541. Advanced-Photonics. 2006

ANDOR-TECHNOLOGY. EMCCD tutorial http://www.emccd.com/what_is_emccd/emccd_tutorial/Q1_What_are_Electron_Multiplying_CCDs/. 2005.

AXIS-COMMUNICATIONS. CCD CHIP. www.axis.com/edu/axis/images/ccd.gif. CCD: AXIS-Communications. 500x303.

BASDEN, A. G.; HANIFF, C. A.; MACKAY, C. D. Photon counting strategies with low-light level CCDs. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 345, n. 3, p. 985-991, 2003.

BASDEN, A. G. et al. A new photon-counting spectrometer for the COAST. THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING Proceedings of SPIE, v. 5491, p. 12, 2004. ISSN 0277-786X.

BAUTZ, M. CCD Subpixel Structure. Abril 2008 1997. Disponível em: < http://space.mit.edu/ACIS/cal_report/node63.html >. Acesso em: 15 abr. 2008.

BERRY, R.; BURNELL, J. The Handbook of Astronomical Image Processing. 2. Willmann-Bell, Inc, 2005. 712 ISBN 0-943396-82-4.

BOYLE, W. S.; SMITH, G. E. Charge Coupled Semiconductor Device. The Bell System Technical Journal, v. April, p. 587 - 593, 1970.

BURILLO, F. R. Lidar sensing of the atmosphere: receiver design and inversion algorithms for an elastic system. 1996. (Doctor). Departament of Signal Theory and Communications, UPC-Universitat Politècnica de Catalunya

BURKE, B.; JORDEN, P.; VU, P. CCD Technology. In: NETHERLANDS, S. (Ed.). Scientific detectors for astronomy 2005, 2006. cap. III, p.225-264. ISBN 978-1-4020-4330-7 (Online).

CHANDLER, D. A 1.4-gigapixel camera to detect asteroids. MIT News office 2008.

CUMANI, C. Introduction to CCDs. Fifth International Topical Meeting on Neutron Radiography. Technische Universität München, Garching 2004.

DAIGLE, O.; CARIGNAN, C.; BLAIS-OUELLETTE, S. Faint flux performance of an EMCCD. High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy II Proceedings SPIE, v. 6276, p. 9, 2006. ISSN 9780819463418.

DAIGLE, O. et al. L3CCD results in pure photon counting mode. Optical and Infrared Detectors for Astronomy, v. 5499, p. 219-227, 2004.

DAISUKE, K. et al. Characteristics and Performance of the CCD Photometric System at Lulin Observatory. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, v. 5, n. 3, p. 315-326, 2005.

DENVIR, D. J.; CONROY, E. Electron multiplying CCD technology: The new ICCD. In: ENGINEERS-SPIE, S. O. P.-O. I., Low-light-level and real-time imaging systems, components, and applications, 2003. Seattle WA Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers-SPIE. p.164-174.

DHILLON, V. et al. ULTRASPEC: High-speed Spectroscopy with Zero Read-out Noise. The Messenger. Telescopes and Instrumentation. 127: 2 p. 2007.

E2V-TECHNOLOGIES. Dark Signal and Clock-Induced Charge in L3Vision. e2V-Technologies. us, p.4

_____. Optimising Operation of L3Vision. e2V-Technologies. us:

_____. The Use of Multiplication Gain in L3Vision. E2V-TECHNOLOGIES. us, p.3.
(2)

_____. CCD97-00 Back Illuminated. 2004

FELLERS, T. J.; DAVIDSON, M. W. Concepts in Digital Imaging Technology. Electron Multiplying Charge-Coupled Devices (EMCCDs), 2006. Disponível em: < <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/emccds.html> >. Acesso em: 02 sep 2009.

FIORENTIN, P.; IACOMUSSI, P.; ROSSI, G. Characterization and Calibration of a CCD Detector for Light Engineering. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, v. 54, n. 1, p. 171-177, February 2005.

FUJIHASHI, C. Dark-Current Multiplication Noises in Avalanche Photodiodes and Optimum Gains. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, v. LT-5, n. 6, p. 11, 1987.

FUJIWARA, A.; TAKAHASHI, Y. Manipulation of elementary charge in a silicon charge-coupled device. Letters to nature. 410: 560-562 p. 2001.

GEIRINHAS, P. M. L. A. D. M. et al. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FOTODÍODOS PIN E APD EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO ÓPTICOS COM DETECÇÃO DIRECTA. 2009.

GETREU, I. Modeling the bipolar transistor. Tektronix, inc, 1976.

HAMAMATSU-TECHNOLOGY. Characteristics and use of FFT-CCD area image sensor. HAMAMATSU PHOTONICS, p.27. 2003

_____. Characteristics and use of Si APD (Avalanche Photodiode). HAMAMATSU PHOTONICS, p.12. 2004

_____. Si Photodiode. HAMAMATSU-Technology, p.34. 2004

HOLLENHORST, J. N. A Theory of Multiplication Noise. IEEE transactions on electron devices, v. 37, n. 3, p. 8, 1990.

HOLST, G. C.; LOMHEIN, T. S. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems. SPIE-International Society for Optical Engine 2007. 355 ISBN 0819467308

HOWELL, S. B. Handbook of CCD Astronomy. Second. New York: Cambridge University Press, 2006. 208

HYNECEK, J. Impactron-a new solid state image intensifier. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 48, n. 10, p. 2238-2241, 2001.

HYNECEK, J.; NISHIWAKI, T. Excess noise and other important characteristics of low light level imaging using charge multiplying CCDs. IEEE transactions on electron devices, v. 50, n. 1, p. 239-245, 2003.

INGLEY, R.; SMITH, D. R.; HOLLAND, A. D. Life testing of EMCCD gain characteristics Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section v. 600, n. 2, p. 460-465, 2009.

JANESICK, J. R. Scientific Charge-Coupled Devices. SPIE-International Society for Optical Engine, 2001. 906 ISBN 0819436984.

JERRAM, P. et al. The LLLCCD: Low Light Imaging without the need for an intensifier. Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications II - Proceedings SPIE, v. 4306, p. 9, 2001.

JERRAM, P. A. et al. Electron Multiplying CCDs. SNIC Symposium. Stanford, California 5p. 2006.

KANBE, H.; KIMUR, T.; MIZUSHIMA, Y. Wavelength Dependence of Multiplication Noise in Silicon Avalanche Photodiodes. IEEE transactions on electron devices, v. 24, n. 6, p. 4, 1977.

KARAR, A.; TANAKA, R.; VANEL, J. APD's excess noise measurements using spectral analysis (FFT). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, v. 387, n. 1-2, p. 6, 1997.

LOT-ORIEL_GRUPPE. Darkcurrent and CIC in EMCCDs 2004.

MADAN, S. K.; BHAUMIK, B.; VASI, J. M. Experimental Observation of Avalanche Multiplication in Charge-Coupled Devices. IEEE transactions on electron devices, v. 30, n. 6, p. 694-699, 1983.

MCCLISH, M. et al. Characterization of Very Large Silicon Avalanche Photodiodes. IEEE DOE grant No. DE-FG02-03ER83763, p.4. 2004

_____. A reexamination of deep diffused silicon avalanche photodiode gain and quantum efficiency. IEEE transactions on nuclear science, v. 53, n. 5, p. 6, 2006. ISSN 0018-9499.

MOLL, J. L.; OVERSTRAETEN, R. V. Charge multiplication in silicon p-n junctions. *Solid-State Electronics*, v. 6, n. 2, p. 147-157, 1963.

OGASAWARA, K. et al. Avalanche photodiode for measurement of low-energy electrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v. 545, n. 3, p. 9, 2005.

NEWPORT-CORPORATION. Multi-Fuction Optical Meter Model 1835-C. 1993.

OVERSTRAETEN, R. V.; MAN, H. D. Measurement of the ionization rates in diffused silicon p-n junctions *Solid-State Electronics*, v. 13, n. 5, p. 583-608, 1970.

PAWLEY, J. B. More Than You Ever Really Wanted to Know About Charge-Coupled Devices. In: *HARDCOVER (Ed.). Handbook of Biological Microscopy*. 3, 2006. p.918-931. ISBN 978-0-387-25921-5.

PERKINELMER-INC. *Avalanche Photodiodes: A User's Guide*. PerkinElmer, p.8. 2000

RAMIREZ, F. J. *Contribuição ao projeto e construção de transistores bipolares PNP*. 1978. (Mestrado). Escola Politecnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RÉ, P. *O ABC DAS CÂMARAS CCD*. *Astronomia de Amadores*. nº 25 2005.

REY, G.; LETURCQ, P. *Théorie approfondie du Transistor Bipolare*. Masson et, 1972.

ROBBINS, M. S.; HADWEN, B. J. The Noise Performance of Electron Multiplying Charge-Coupled Devices. *IEEE transactions on electron devices*, v. 50, n. 5, p. 1227-1232, 2003.

SABOURET, G.; LYON, S. A. *Measurement of the Charge Transfer Efficiency of Electrons Clocked on Superfluid Helium*: Cornell University Library 2006.

STOYKOV, A.; SCHEUERMANN, R. *SILICON AVALANCHE PHOTODIODES*. Paul Scherrer Institut, 2005.

TATE, M. W.; EIKENBERRY, E. F.; GRUNER, S. M. CCD Detectors. In: *NETHERLANDS, S. (Ed.). International Tables for Crystallography*: Springer Netherlands, v.F, 2006. cap. 7.2, p.148-153.

TAYLOR, D. M. et al. Characterization of novel active area silicon avalanche photodiodes operating in the Geiger mode. *JOURNAL OF MODERN OPTICS*, v. 51, n. 9-10, p. 11, 2004.

TULLOCH, S. *Investigation into L3 CCD Performance*. University of Durham, p.23. 2003

_____. Photon Counting and Fast Photometry with L3 CCDs In: *MOORWOOD, A. F. M., Ground-based Instrumentation for Astronomy 2004*. SPIE. p.1958.

_____. Monte Carlo Modeling of L3 Detectors in High Time Resolution Applications. HIGH TIME RESOLUTION ASTROPHYSICS: The Universe at Sub-Second Timescales, 2008. p.14.

WALKER, G. Astronomical Observations Cambridge University Press, 1987. ISBN 0521339073