



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
SERVIÇO DE DOCUMENTAÇÃO E PUBLICAÇÕES

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de
Computadores

Implementação de WDM com 4 canais no espectro do
visível

JOÃO PEDRO ALVES REIS

(Licenciado em Engenharia Eletrónica e de Computadores)

Trabalho final de mestrado para obtenção do grau de mestre em engenharia de
eletrónica e telecomunicações

Orientador(es):

Prof.^a Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes

Prof.^a Doutora Maria Manuela Almeida Carvalho Vieira

Júri:

Presidente: Prof.^a Doutora Maria Manuela Almeida Carvalho Vieira

Vogais:

Prof.^o Doutor João Pedro Barrigana Ramos da Costa

Prof.^a Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes

Dezembro de 2013

Agradecimentos

Em primeiro lugar pretendo dar um especial agradecimento à minha família e à minha mulher por toda a sua paciência e apoio incondicional que sempre prestaram. Agradeço-lhes pelo incentivo que sempre deram, pelo carinho e amor que nunca faltou e pela compreensão. A sua ajuda tornou tudo muito mais fácil.

À Professora Doutora Paula Louro Antunes e à Professora Doutora Manuela Vieira, que como professoras orientadoras sempre me proporcionaram o apoio e suporte necessário. Agradeço por me terem proporcionado a realização deste trabalho, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e pelo acompanhamento que sempre demonstraram.

A todos os meus colegas e amigos, que tendo-me ou não acompanhado ao longo do percurso académico nunca deixaram de me apoiar e encorajar.

A todos o meu imenso agradecimento

Resumo

O presente relatório apresenta a análise optoelectrónica de uma heteroestrutura semicondutora empilhada de fotodíodos PIN, baseada numa liga de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H – *Hydrogenated Amorphous Silicon*) e siliceto de carbono amorfo hidrogenado (a-SiC:H – *Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide*), cujos fotodíodos foram otimizados para deteção de sinais óticos no domínio do visível.

O objetivo desta tese é avaliar as capacidades da heteroestrutura em redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), para transmissão de sinais óticos a curta distância, utilizando como meio de transmissão as fibra óticas de plástico (POF – *Plastic Optical Fiber*). O trabalho aqui apresentado vem na sequência de trabalhos anteriores, em que a mesma estrutura foi analisada segundo determinados critérios, para o mesmo fim.

A transmissão é feita através de quatro dispositivos LED (*Light Emitting Diode*) com as cores: violeta (400 nm), azul (470 nm), verde (525 nm) e vermelho (626 nm). É utilizada radiação de fundo frontal e posterior, de cor violeta, já que testes recentes concluíram ser a que mais beneficia a eficiência na deteção dos sinais.

Faz-se uma sucinta caracterização optoelectrónica da estrutura semicondutora com o objetivo de aferir a influência da radiação de fundo de cor violeta sobre a transmissão, individual, de cada um dos canais de transmissão. A fotocorrente gerada pelo dispositivo sob a ausência e presença de radiação de fundo foi medida, para quatro sequências binárias diferentes com diferentes frequências de modulação. Para cada canal e para cada frequência de modulação calculou-se os ganhos óticos obtidos pela aplicação da radiação de fundo e a sua influência sob os tempos de subida.

Os resultados obtidos permitem verificar que a aplicação de radiação de fundo de cor violeta influencia de forma distinta os diferentes canais vermelho, verde, azul e violeta. Para além da dependência com o comprimento de onda do sinal ótico do canal de entrada evidenciou-se também a influência da frequência de modulação. A aplicação de radiação de fundo pelo lado frontal amplifica a fotocorrente dos sinais de cor vermelha e verde e atenua os sinais de cor violeta. Por sua vez, a aplicação de radiação de fundo pelo lado frontal amplifica fortemente a fotocorrente dos sinais de cor violeta e atenua os restantes. Relativamente ao tempo de subida da fotocorrente verifica-se que

apenas para baixas frequências de modulação existe influência do comprimento de onda do canal ou da aplicação de radiação de fundo. Sendo que a influência tende a diminuir com o aumento da frequência de modulação, atingindo valores muito próximos entre os diferentes canais, com ou sem radiação de fundo, na frequência de modulação mais alta.

Tendo por base a análise feita aos canais individuais mediu-se a fotocorrente resultante da combinação dos canais dois a dois, três a três e quando todos são utilizados. As medidas de fotocorrente foram realizadas sobre a ausência e presença de radiação de fundo de cor violeta e para as mesmas combinações binárias e frequências de modulação. A influência da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior permite, através do ganho produzido, decodificar as combinações binárias dos sinais transmitidos.

Palavras-chave: Fibras óticas de plástico (POF), Demultiplexagem por divisão em comprimento de onda (WDM), transmissão no visível, optoelectrónica

Abstract

The following report presents the optoelectronic analysis of a stacked hetero-structure with PIN photodiodes, which is based on both Hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) and Hydrogenated amorphous silicon carbide (a-SiC:H), whose photodiodes were optimized in order to grant optical signals detection in the visible spectrum.

The thesis goal is to evaluate the hetero-structure capacities in WDM networks (Wavelength Division Multiplexing), for short range optical signals transmission, using plastic optical fibers as a way to propagate the signal. The presented work derives from previous investigations, in which the same structure was put to test following certain standards but with the same objective.

The transmission is done through four LED (Light Emitting Diode) devices with different colors: Violet (400 nm), blue (470 nm), green (525 nm) and red (626 nm). It is used a violet background front radiation and background back radiation, bearing in mind that recent investigations determined it to be the most effective in signal detection.

In order to study the impact of violet background radiation has over the individual transmission channels, a brief optoelectronic characterization is done. The photocurrent produced by the device is measured under the presence and the absence of background radiation for four different binary sequences, with different modulation frequencies. The optical gain obtained from the exposure to background radiation and its raising times was calculated, for each channel and for each modulation frequency.

The results show that the background radiation has a different impact over the different channels (red, green, blue and violet). Besides the dependency between the wavelength of the optical signal in the input channel, also the modulation frequency influence has been proved.

Frontal application of background radiation amplifies the red and green signals photocurrents; on the other hand it attenuates violet signals. Accordingly, back application of background radiation has the opposite effect. Regarding the photocurrents rise time, it has been proved that the channels wave length and the background radiation exposure only have influence on lower modulation frequencies. Thus, that influence lowers as the modulation frequency rises; reaching really close values within the

different channels, with or without background radiation, at higher modulation frequencies.

Based on the analysis that has been made, over the individual channels, it was measured the resulting photocurrent from the combination of paired channels, three channels at a time and all channels. The above process has been done under the presence and absence of violet background radiation and under the same binary combinations and modulation frequencies. The influence of the background radiation, from both frontal and back sides, allows decoding the binary combinations of the transmitted signals, through the produced optical gain.

Key words: Plastic optical fiber, Wavelength division multiplexing, visible spectrum transmission, optoelectronics

Índice

Agradecimentos	I
Resumo.....	III
Abstract	V
Lista de figuras	XI
Lista de Tabelas	XV
Lista de acrónimos e termos.....	XVII
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
1.4. Trabalho relacionado.....	5
1.5. Referências bibliográficas	5
Capítulo 2 – Tecnologia WDM	7
2.1. Introdução	7
2.2. Wavelength Division Multiplexing.....	8
2.2.1. Princípio de operação	10
2.2.2. Características dos sistemas WDM.....	11
2.2.3. Tipos de dispositivos WDM	12
2.3. Dispositivo WDM baseado em semicondutores	17
2.3.1. Estrutura do dispositivo	17
2.3.2. Caracterização da resposta espectral.....	18
2.3.3. Contribuição do dispositivo para a resposta espectral.....	19
2.3.4. Dispositivo WDM controlado por tensão	20
2.3.5. Influência da taxa de transmissão	22
2.3.6. Influência da potência ótica do sinal incidente	23

2.3.7.	Influência de polarização ótica para a resposta espectral.....	24
2.4.	Referências bibliográficas	29
Capítulo 3 – Caracterização optoelectrónica		31
3.1.	Descrição do dispositivo.....	31
3.2.	Descrição das experiências	32
3.3.	Análise dos canais individuais	35
3.3.1.	Análise do canal vermelho (R)	35
3.3.2.	Análise do canal verde (G)	39
3.3.3.	Análise do canal azul (B).....	42
3.3.4.	Análise do canal violeta (V)	46
3.3.5.	Análise dos ganhos óticos.....	49
3.3.6	Análise dos tempos de subida	51
3.3.7	Conclusão	53
3.4.	Referências bibliográficas	53
Capítulo 4 – Análise WDM.....		55
4.1.	Análise dos canais combinados.....	55
4.1.1	Canais RG	55
4.1.2	Canais GB	57
4.1.3	Canais RV	58
4.1.4	Canais RB	60
4.1.5	Canais GV	62
4.1.6	Canais BV	63
4.1.7	Canais RGB	65
4.1.8	Canais RBV	68
4.1.9	Canais GBV	71
4.1.10	Canais RGV	74

4.1.11	Canais RGBV.....	77
4.2	Aplicações.....	80
4.3.	Referências bibliográficas	84
Capítulo 5	– Conclusões e desenvolvimentos futuros	85
Capítulo 6	– Anexos.....	89

Lista de figuras

Figura 1 – Atenuação de fibras óticas de sílica ao longo das três principais janelas de transmissão ótica no domínio do infravermelho (extraído de [2]).	8
Figura 2 – Espectro de comprimentos de onda DWDM e CWDM (extraído de [8]).	10
Figura 3 – Configuração básica de um sistema de transmissão unidirecional, baseado em multiplexagem por comprimento de onda (editado de [3]).	11
Figura 4 – Desmultiplexador baseado num prisma (extraído de [1]).	13
Figura 5 – Dispositivo desmultiplexador baseado em filtros interferentes (extraído de [1]).	14
Figura 6 – Dispositivo baseado em grelhas de <i>Bragg</i> e circuladores óticos (extraído de [1]).	14
Figura 7 – Representação de um interferómetro de <i>Mach-Zehnder</i> formado a partir de dois acopladores 3 dB. O primeiro acoplador separa a luz em duas partes iguais (extraído de [3]).	15
Figura 8 – Dispositivo baseado em grelhas de difração (extraído de [1]).	16
Figura 9 – Dispositivo baseado em AWG (extraído [1]).	16
Figura 10 – Estrutura do dispositivo semiconductor (extraído de [7]).	17
Figura 11 – Resposta espectral do dispositivo para diferentes valores de tensão de polarização (extraído de [7]).	18
Figura 12 – Influência da variação da tensão de polarização na resposta espectral do dispositivo (extraído de [7]).	19
Figura 13 – Contribuição individual de cada fotodíodo para a resposta espectral (extraído de [7]).	20
Figura 14 – Variação de sinais multiplexados com a tensão de polarização na presença de: a) vermelho e azul, b) vermelho, verde e azul; c) Dependência do comprimento de onda do canal de entrada com a tensão de polarização (extraído de [7]).	21
Figura 15 – Variação dos sinais multiplexados com a tensão de polarização (extraído de [7]).	22
Figura 16 – Influência da taxa de transmissão sobre o sinal multiplexado de dois sinais (R e G) (extraído de [7]).	23
Figura 17 – Influência da intensidade ótica no sinal multiplexado (extraído de [7]).	23
Figura 18 – Resposta espectral à frequência de 500 Hz sobre a influência de luz de fundo frontal da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7]).	25
Figura 19 - Resposta espectral à frequência de 3000 Hz sobre a influência de luz de fundo frontal da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7]).	26
Figura 20 - Resposta espectral à frequência de 500 Hz sobre a influência de luz de fundo posterior da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7]).	27

Figura 21 - Resposta espectral à frequência de 3000 Hz sobre a influência de luz de fundo posterior da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7])...	28
Figura 22 - Diagrama esquemático representativo da estrutura do dispositivo semiconductor. ...	31
Figura 23 – Diagrama da montagem utilizada no estudo dos sinais WDM.	33
Figura 24 – Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.	36
Figura 25 - Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	36
Figura 26 - Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	37
Figura 27 - Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	37
Figura 28 – Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	39
Figura 29 - Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	40
Figura 30 - Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	40
Figura 31 - Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	41
Figura 32 – Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	43
Figura 33 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	43
Figura 34 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	44
Figura 35 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	44
Figura 36 – Fotocorrente normalizada do canal violeta (400 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	46
Figura 37 - Fotocorrente normalizada do canal violeta (400 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	47
Figura 38 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	47
Figura 39 - Fotocorrente normalizada do canal violeta (400 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.....	48

Figura 40 – Ganho ótico resultante da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal.....	50
Figura 41 - Ganho ótico resultante da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal.....	50
Figura 42 – Tempo de subida de cada canal sob a ausência e presença de radiação de fundo: a) canal vermelho; b) canal verde; c) canal azul e d) canal violeta.	51
Figura 43 – Tempo de subida de cada canal: a) no escuro; b) sobre radiação frontal e c) sobre radiação posterior.	52
Figura 44 – Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RG com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.....	56
Figura 45 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais GB com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.....	58
Figura 46 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.....	59
Figura 47 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RB com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.....	61
Figura 48 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais GV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.....	63
Figura 49 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais BV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.....	64
Figura 50 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGB com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	66
Figura 51 – Descodificação dos canais na combinação RGB sobre radiação de fundo frontal. ...	67
Figura 52 - Descodificação dos canais na combinação RGB sobre radiação de fundo posterior.	68
Figura 53 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RBV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	69
Figura 54 - Descodificação dos canais na combinação RBV sobre radiação de fundo frontal. ..	70

Figura 55 - Descodificação dos canais na combinação RBV sobre radiação de fundo posterior.	71
Figura 56 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais GBV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	72
Figura 57 - Descodificação dos canais na combinação GBV sobre radiação de fundo frontal. ..	73
Figura 58 - Descodificação dos canais na combinação GBV sobre radiação de fundo posterior.	74
Figura 59 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	75
Figura 60 - Descodificação dos canais na combinação RGV sobre radiação de fundo frontal. ..	76
Figura 61 - Descodificação dos canais na combinação RGV sobre radiação de fundo posterior.	77
Figura 62 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGBV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	78
Figura 63 - Descodificação dos canais na combinação RGBV sobre radiação de fundo frontal.	79
Figura 64 - Descodificação dos canais na combinação RGBV sobre radiação de fundo posterior.	80
Figura 65 – Comparação de fotocorrente entre as combinações RGBV e RGB, sobre radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	81
Figura 66 - Comparação de fotocorrente entre as combinações RGBV e GBV, sobre radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	82
Figura 67 - Comparação de fotocorrente entre as combinações RGBV e RBV, sobre radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.	83

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resumo das características dos sistemas WDM.	9
Tabela 2 – Definição das frequências de modulação dos canais individuais.	34
Tabela 3 – Definição das combinações RGBV das sequências padrão.....	34
Tabela 4 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal vermelho.....	38
Tabela 5 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal verde.....	42
Tabela 6 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal azul.....	45
Tabela 7 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal azul.....	49

Lista de acrónimos e termos

Acrónimo/termo	Descrição
a-Si:H	Hydrogenated Amorphous Silicon
a-SiC:H	Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide
AWG	Array Waveguide Grating
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
GIAMOS	Grupo de Investigação Aplicada em Microeletrónica, Optoelectrónica e Sensores
ITO	Indium Tin Oxide
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
LED	Light Emitting Diode
POF	Plastic Optical Fiber
TDM	Time Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing

Capítulo 1 – Introdução

Nos últimos anos temos vindo a assistir a uma crescente procura e oferta de serviços com maior largura de banda, com a tendência que continue a crescer no futuro. A capacidade das redes de telecomunicações, tem aumentado a uma razão de aproximadamente 90 % a cada 2 anos [1].

A fibra ótica assume um papel importantíssimo nesta premissa, sobretudo devido à maior capacidade de transmissão que oferece comparativamente a outras soluções, como o cobre. No que diz respeito à transferência de dados, os meios tradicionais (cabos coaxiais, pares entrelaçados) suportam taxas de débito binário limitadas e são passíveis de sofrer de interferências eletromagnéticas.

O aparecimento das fibras óticas de sílica como meio de transmissão de dados, fez com que muitas das anteriores limitações tenham sido ultrapassadas, embora a questão dos custos elevados continuasse a ser um inconveniente. Todas estas condições fizeram com que se realizassem pesquisas em meios físicos alternativos, estando a tecnologia das fibras óticas baseada em materiais poliméricos entre as possíveis candidatas. Por estas razões, nos últimos anos as fibras óticas de plástico (POF – *Plastic Optical Fiber*) têm suscitado a atenção das áreas científicas e comerciais. A fibra ótica de plástico não surge com o intuito de um dia poder substituir a fibra ótica de sílica, uma vez que as características físicas da fibra de plástico não são adequadas para a comunicação a longa distância. Pelo contrário, as fibras óticas de plástico consistem numa boa alternativa futura para as ligações a curtas distâncias (até cerca de 1 Km), podendo substituir por exemplo os cabos coaxiais, os de par entrelaçado e os de redes locais Ethernet. Para além disto, as POFs têm ainda as vantagens de serem muito leves e finas.

As fibras óticas de plástico, apresentam características que as tornam uma solução adequada para substituir os cabos de cobre como meio de transmissão para curtas distâncias. O diâmetro do núcleo destas varia entre os 120 μm a 1000 μm , sendo bastante maior do que o das fibras de sílica, fazendo com que sejam mais simples e menos dispendiosas no que diz respeito a componentes. Para além disso, o material de que são feitas permite que sejam mais flexíveis, resistentes e manuseáveis.

A utilização de fibras de plástico na última milha constitui um importante avanço na transmissão de dados, sobretudo pela capacidade de largura de banda que oferece. Contudo, para obter um melhor aproveitamento da largura de banda é necessário recorrer, e adaptar técnicas de multiplexagem bastante utilizadas nas transmissões de longa distância por fibras óticas de sílica.

A tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é uma prática bastante utilizada nas redes de transmissão de longa distância, através de fibras óticas de sílica. A sua utilização constitui uma importante alternativa à expansão das redes de transmissão. A tecnologia WDM é uma alternativa à instalação de mais fibra ótica, como forma para suportar mais serviços ou novos utilizadores.

O conceito WDM pode também ser aplicado às fibras óticas de plástico. Contudo, estas apresentam diferentes características de atenuação ao longo do espectro eletromagnético, com melhor eficiência no domínio da luz visível. Por esta razão, as fibras de plástico apenas podem ser utilizadas no domínio do visível o que requer o projeto de novos dispositivos.

Uma solução para ultrapassar o problema da largura de banda nas fibras óticas de plástico é a adaptação de dispositivos WDM no domínio visível do espectro.

1.1. Enquadramento

A multiplexagem de sinais é uma prática recorrente nos sistemas de transmissão de longa distância, utilizando as fibras óticas de sílica como meio de transmissão. As fibras óticas de sílica, apresentam melhores índices de atenuação na região do infravermelho.

Com o objetivo de fazer um melhor aproveitamento das capacidades das fibras óticas é utilizada a tecnologia WDM. A tecnologia WDM, utilizada nos sistemas de transmissão, permite que sejam combinados os sinais de várias fontes óticas, normalmente díodos laser, com diferentes comprimentos de onda em simultâneo numa única fibra. Um dispositivo multiplexador é utilizado no lado do transmissor, para combinar os sinais. Do lado do recetor é utilizado um dispositivo demultiplexador que permite separar o sinal combinado nas suas diferentes componentes espectrais. A

principal vantagem da sua utilização é o aumento do débito binário, sendo também mais económico, transparente e modular.

As fibras óticas de plástico surgem como principais candidatas à substituição de fios de cobre. Torna-se então necessário aproveitar tecnologias utilizadas nas fibras óticas de sílica, que operam no domínio do infravermelho, às fibras óticas de plástico.

Com este trabalho, pretende testar-se um sistema integrado que realiza a multiplexagem e fotodeteção no espectro visível para implementação nas POF.

1.2. Objetivo

Neste trabalho é utilizado um dispositivo constituído por uma estrutura semicondutora, baseada em fotodiodos PIN de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H – *Hydrogenated Amorphous Silicon*) e siliceto de carbono amorfo hidrogenado (a-SiC:H – *Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide*), que funciona como filtro de cor na região visível do espectro, ou seja, entre os 400 nm e os 700 nm. A sensibilidade espectral do dispositivo, na região do visível, é modulada pelo sinal de tensão elétrico aplicado e/ou pela presença de polarização ótica adicional, pela incidência de luz.

Como fonte ótica utilizam-se quatro LEDs (*Light Emitting Diode*) de cor diferente, que transmitem sinais de diferentes comprimentos de onda (violeta – 400 nm, azul – 470 nm, verde – 525 nm, vermelho – 626 nm).

Pretende-se estudar o desempenho do dispositivo como multiplexador/demultiplexador dos sinais transmitidos pelos quatro LED, podendo estar sujeito ou não a radiação de fundo. O objetivo é avaliar se o desempenho do dispositivo o torna passível de ser utilizado como dispositivo WDM nas redes POF.

Este trabalho surge no seguimento de outros trabalhos realizados anteriormente, por um grupo de pesquisa do ISEL (Instituto Superior de Engenharia de Lisboa), onde se realizam estudos sobre o mesmo dispositivo. As conclusões tiradas até então foram consideradas como ponto de partida para a pesquisa realizada neste trabalho. Nestes trabalhos utilizaram-se somente 3 canais de transmissão (azul, vermelho e verde), e a transmissão dos sinais foi realizada em espaço livre. Pretende-se agora alargar a largura de banda do sistema utilizando mais um canal de transmissão (violeta).

1.3. Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos, onde o primeiro capítulo faz uma breve introdução e enquadramento ao tema abordado na tese, sintetizando o conceito e objetivo do WDM e a transmissão de sinais WDM utilizando dispositivos semicondutores pelo meio de transmissão POF.

No segundo capítulo é feita uma introdução à técnica de multiplexagem WDM e abordadas diferentes técnicas e aplicações do WDM. É feito um resumo da evolução do estudo realizado até agora no domínio da multiplexagem WDM utilizando dispositivos semicondutores. São descritos os resultados obtidos em trabalhos anteriores, com foco na caracterização optoelectrónica do dispositivo sob diferentes condições de iluminação, variando o comprimento de onda do sinal incidente, a tensão de polarização e a iluminação de fundo.

No terceiro capítulo é feita a descrição do dispositivo semicondutor e analisados os sinais de fotocorrente dos sinais WDM do dispositivo semicondutor. Esta análise é realizada com um conjunto de quatro dispositivos LED com as cores vermelho, verde, azul e violeta a emitir os respetivos sinais de dados tanto numa configuração individual como numa configuração de canais combinados. Na configuração de canal individual foi analisado o comportamento do dispositivo quando sujeito a presença de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal e posterior. A análise é quantificada através do cálculo do ganho ótico obtido para cada canal sob a aplicação de radiação de fundo e pela medição do tempo de subida na transição de OFF para ON. Na configuração de canais combinados é testada a descodificação da sequência binária transmitida para cada canal.

No quarto capítulo é analisado a aplicação do dispositivo semicondutor, nas condições de teste definida nos capítulos anteriores, como filtro de canais. Mais uma vez, tendo por base os resultados obtidos no capítulo três, é testado a remoção do canal violeta através da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal e a remoção do canal vermelho ou verde através da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior.

Por fim, no quinto capítulo, apresentam-se as conclusões o estudo realizado e apresentam-se sugestões para trabalho a desenvolver no futuro.

1.4. Trabalho relacionado

No âmbito do trabalho aqui apresentado, o autor participou na Conferência de Eletrónica de Telecomunicações e de Computadores 2013 (CETC13), a decorrer no ISEL.

O autor começou por contribuir com um resumo, que foi submetido e aceite pelo conselho científico da conferência, tendo depois desenvolvido um artigo para apreciação da revista *Procedia Technology*.

O trabalho foi apresentado na conferência CETC13 no formato de *poster*.

1.5. Referências bibliográficas

- [1] Infrastructure Report, “The first communications infrastructure report”, Ofcom, 2011;
- [2] Senior, John M., “Optical Fiber Communications – Principle and Practice - Second Edition”, Prentice Hall, 1992;
- [3] Ramaswami, Rajiv, Sivarajan, Kumar N., Sasaki, Galen H., “Optical Networks – A practical perspective - Third Edition”, Morgan Kaufmann, 2010;
- [4] Louro, P., Vieira, M., Vieira, M. A., Fernandes, M., Costa, J., “Use of a-Si:H Photodiodes in Optical Communications Applications”, *Advances in Photodiodes*, 2010;
- [5] Soares, Pedro M., “Avaliação do desempenho das fibras óticas de plástico”, Trabalho final de mestrado ISEL, 2012;
- [6] D. Nolan K. O. Hill et al, “Fiber Optics Handbok: Fiber, Devices and Systems for optical communications”, McGraw Hill, 2002;
- [7] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum, “POF Handbok: Optical Short Range Transmission Systems”, Berlin, 2008.

Capítulo 2 – Tecnologia WDM

Neste capítulo é apresentado a tecnologia WDM, que consiste em multiplexar sinais com diferentes comprimentos de onda sobre a mesma fibra ótica. É abordado a evolução das tecnologias de multiplexagem, o princípio de funcionamento e as vantagens da sua utilização. Serão apresentadas algumas das variantes desta tecnologia bem como exemplos de dispositivos.

2.1. Introdução

As redes de telecomunicações evoluíram de uma abordagem analógica para digital e as tecnologias de multiplexagem passaram de FDM (*Frequency Division Multiplexing*) para TDM (*Time Division Multiplexing*), podendo ainda coexistir no mesmo sistema. Com o aparecimento de fibra ótica o passo lógico foi o de adaptar a tecnologia TDM já existente a este novo meio, uma vez que era do ponto de vista económico mais viável aumentar a velocidade dos sistemas TDM para conseguir melhores desempenhos. A tecnologia TDM é uma técnica de demultiplexagem, em que é um ou mais sinais são transmitidos em intervalos de tempo diferentes. A evolução exponencial das tecnologias de informação refletiu-se diretamente no aumento da quantidade de informação transportada pelas redes de telecomunicações e levou os sistemas TDM a encontrar um limite prático de 10 Gbps. Este limite, quando comparado com as potencialidades da fibra representa apenas uma pequena fração da largura de banda possível de se atingir [1].

A abordagem mais óbvia para se aumentar a largura de banda é aumentar o número de fibras. No entanto, aumentar simplesmente o número de fibras para, fazer face à necessidade de maior largura de banda é uma opção inviável devido ao elevado custo dos equipamentos e da sua posterior manutenção.

A tecnologia WDM permite aos operadores explorar de uma forma mais eficiente as capacidades oferecidas pelas fibras óticas, através da divisão por comprimento de onda, o que permite que vários sinais partilhem a mesma fibra. A utilização de WDM, em sistemas de transmissão por fibra ótica na região do infravermelho é uma solução que existente há bastante tempo no mercado, com resultados e benefícios demonstrados. Mas, para fazer face às limitações de largura de

banda na “última milha”, porque integrar fibras óticas de sílica para sistemas de transmissão de curta distância é economicamente caro, têm-se vindo a fazer esforço para aplicar as mais recentes fibras óticas de plástico nestes sistemas. Assim, uma vez que as fibras óticas de plástico apresentam melhores níveis de atenuação na região do visível é imperativo que se projetem novos dispositivos, entre os quais, o dispositivo WDM para ultrapassar o problema da largura de banda.

2.2. Wavelength Division Multiplexing

Nos sistemas de comunicação por fibra ótica, até há pouco tempo atrás, a intensidade da radiação emitida pelo díodo laser é modulada através da injeção de corrente, e o sinal transmitido é detetado diretamente pelo fotodíodo no extremo da linha de transmissão. Estes sistemas de transmissão recorrem, assim, ao esquema de deteção direta, não usando a elevada capacidade de transmissão das fibras óticas. Por razões económicas e operacionais, como novos serviços, é necessário aumentar a taxa de transmissão dos sistemas.

As fibras óticas mono-modo apresentam boas características de transmissão, devido à sua baixa atenuação e dispersão principalmente em torno dos comprimentos de onda 1,30 μm e 1,55 μm . Se considerarmos, por exemplo, um laser emitindo no comprimento de onda de 1,30 μm , a largura de banda do canal corresponde a cerca de 2300 GHz. Isto significa que ter-se-ia espaço suficiente para transmitir centenas de milhares de canais de TV em simultâneo sobre a mesma fibra.

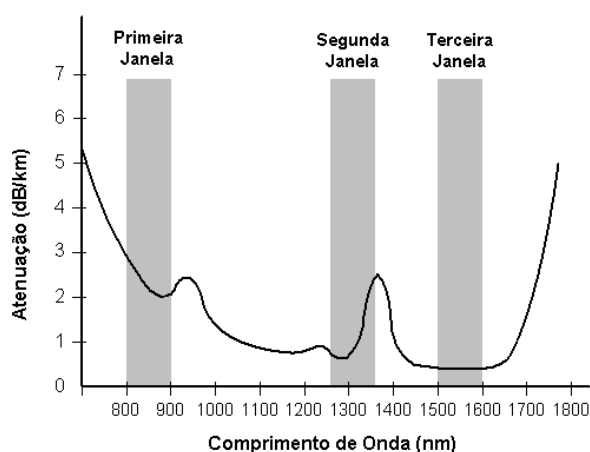


Figura 1 – Atenuação de fibras óticas de sílica ao longo das três principais janelas de transmissão ótica no domínio do infravermelho (extraído de [2]).

Transmitindo, em simultâneo, diferentes tipos de informação no mesmo canal físico, ou seja multiplexando os diferentes sinais, a capacidade de transmissão do canal é aumentada. São várias as técnicas de multiplexagem disponíveis, entre os quais, multiplexagem por divisão na frequência (FDM – *Frequency Division Multiplexing*), multiplexagem por divisão no tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*) e multiplexagem por divisão espacial (SDM – *Space Division Multiplexing*). Todos estes processos são dispendiosos, e pouco flexíveis do ponto de vista do sistema de transmissão ótica, tornando a expansão das capacidades complexa e de custo elevado.

Outro processo tecnicamente mais sofisticado é a multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*). Nos sistemas de comunicação ótica baseados em WDM, a radiação de várias fontes óticas de comprimentos de ondas distintos é transmitida simultaneamente sobre a mesma fibra. Como o custo de *bit/s* nas linhas de transmissão ótica está muito ligado ao custo dos cabos de fibra ótica, é altamente vantajoso transmitir vários canais na mesma fibra, multiplicando assim a capacidade de transmissão.

Os sistemas WDM, podem ser classificados segundo o espaçamento dos comprimentos de onda multiplexados, em *Coarse WDM* (CWDM) e *Dense WDM* (DWDM). Os sistemas CWDM suportam menos de 16 comprimentos de onda por fibra, enquanto os DWDM suportam mais de 32 comprimentos de onda. Os sistemas CWDM são menos sofisticados e conseqüentemente mais acessíveis economicamente, podendo ser implementados através de *lasers Fabry Perot*. Tipicamente os sistemas CWDM operam na região com comprimento de onda entre 1271 nm e 1611 nm, com um espaçamento de 20 nm entre canais. Na tabela 1 resume-se as principais características dos sistemas WDM.

Tabela 1 – Resumo das características dos sistemas WDM.

Características	CWDM	DWDM
Número de comprimentos de onda que podem ser combinados	16	64
Faixa de comprimentos de onda	1310 nm a 1610 nm	1492 nm a 1611 nm
Espaçamento entre canais	20 nm	0,8 nm
Áreas de aplicação	Redes metro	Redes ponto a ponto

Na Figura 2 ilustra-se a gama de comprimentos de onda e espaçamento entre elas, utilizadas em cada tecnologia.

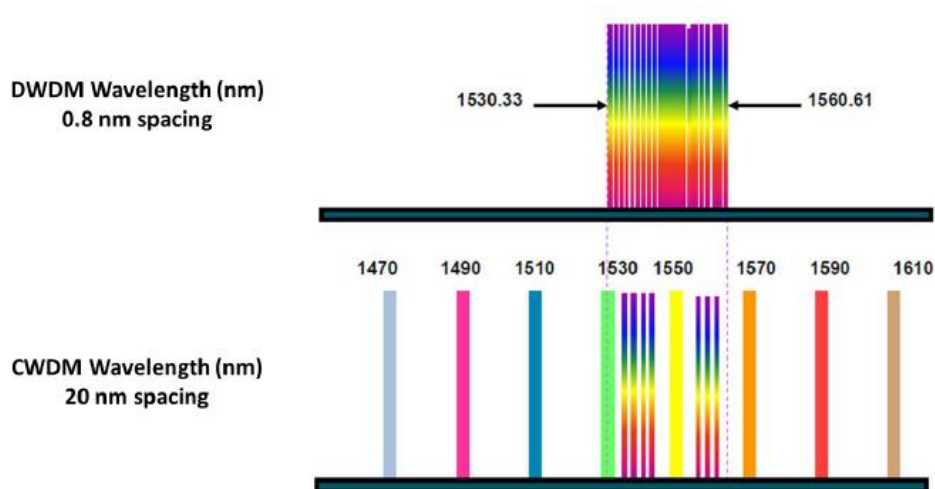


Figura 2 – Espectro de comprimentos de onda DWDM e CWDM (extraído de [8]).

2.2.1. Princípio de operação

As fibras monomodo conseguem suportar diferentes comprimentos de onda ao mesmo tempo. Se dois comprimentos de onda diferentes forem injetados em duas fibras separadamente, um único modo é excitado em cada fibra. Quando os dois comprimentos de onda forem multiplexados para uma única fibra, esta vai ter dois modos de primeira ordem com diferentes comprimentos de onda a serem transmitidos. Este conceito é diferente de fibras multimodo, em que cada comprimento de onda tem um modo diferente. Os diferentes canais são independentes uns dos outros. O comprimento de onda tem também outra importância no sistema de transmissão, como cada comprimento de onda é único, pode ser entendido como um género de endereço do sinal. No final da fibra, os diferentes comprimentos de onda são separados uns dos outros (demultiplexagem) e então são detetados separadamente, utilizando um fotodíodo para cada canal.

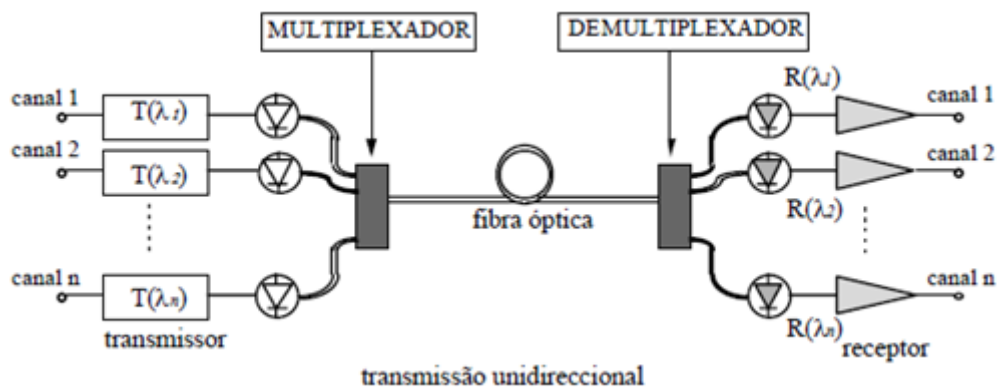


Figura 3 – Configuração básica de um sistema de transmissão unidirecional, baseado em multiplexagem por comprimento de onda (editado de [3]).

2.2.2. Características dos sistemas WDM

As tecnologias WDM oferecem suporte a projetos de alto desempenho, tais como o ensino à distância, em laboratórios remotos, em telemedicina e ambientes corporativos [4].

Algumas análises demonstram que, para distâncias menores a 50 Km, a solução de multi-fibra é menos dispendiosa e para distâncias superiores, o custo da solução WDM é mais vantajoso [4]. Assim, a principal razão para a utilização destes sistemas é a vantagem econômica, pelo custo reduzido, para transmissões a longa distância e a possibilidade de se modular o aumento da capacidade de transmissão conforme o mercado e as necessidades de tráfego. Possibilitam, ainda, o alcance de uma melhor relação entre custos e *bits* transmitidos.

Num sistema WDM podem-se enumerar as seguintes características:

- Flexibilidade no aumento da capacidade de tráfego – a migração de tráfego fornecido é possível sem a necessidade de se trocar amplificadores, acrescentar mais cablagem fibra e mesmo os multiplexadores WDM, preservando os investimentos realizados;
- Transparência – o sistema WDM não envolve processos elétricos ou taxas de transmissão o que permite que os sinais possam ser multiplexados e demultiplexados de forma independente e transparente.

- Modular – um sistema WDM permite que se projete o número de canais a multiplexar de acordo com as necessidades. O aumento no número de canais está apenas dependente na integração dos elementos terminais.

2.2.3. Tipos de dispositivos WDM

Os sistemas WDM utilizados no domínio do infravermelho para comunicações óticas a longas distâncias, necessitam de sistemas capazes de combinar múltiplos comprimentos de onda que provêm de várias fontes emisoras, para que sejam transmitidos numa única fibra. No WDM existem dois elementos-chave que são indispensáveis, sendo eles, o multiplexador (MUX) e o demultiplexador (DEMUX). Assim, os multiplexadores combinam os sinais das várias fontes emisoras, com diferentes comprimentos de onda e convergem num único feixe. Do lado dos recetores, os demultiplexadores separam os vários comprimentos de onda do feixe recebido e vão acoplá-los às fibras individuais.

Os dispositivos multiplexadores e demultiplexadores podem-se considerar-se ativos ou passivos. Passivos são, por exemplo, os prismas, grelhas de difração ou filtros fixos. Consideram-se ativos os dispositivos que utilizam filtros seletores de comprimento de onda. O principal desafio no projeto destes dispositivos é conseguir a mais eficiente separação de canais possível bem como ter baixo *cross-talk*.

Descrevem-se de seguida alguns dos dispositivos mais usuais, para implementar a multiplexagem e demultiplexagem de sinais.

a) Dispositivos baseados num prisma

Um prisma pode ser utilizado para separar a luz em todas as suas diferentes componentes (como o arco-íris), assim pode ser utilizado para demultiplexar diferentes comprimentos de onda. A utilização de sistemas baseados em prismas nos sistemas de transmissão tradicionais é bastante complexa. Por sua vez, a utilização destes nos sistemas de transmissão através de fibras óticas de plástico é bastante promissora.

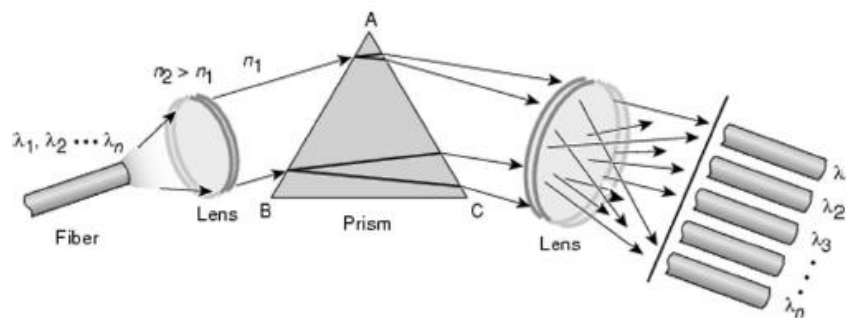


Figura 4 – Desmultiplexador baseado num prisma (extraído de [1]).

A primeira lente é utilizada para produzir um feixe de luz paralelo com todos comprimentos de onda disponíveis. Cada canal é difratado num ângulo diferente através do prisma, ou seja cada comprimento de onda sai pelo prisma em direções diferentes. Utilizando outra lente, os canais podem ser redirecionados para pontos desejados onde possa estar uma fibra ótica ou mesmo um detetor. Se o sistema funcionar no sentido contrário pode atuar como multiplexador.

b) Dispositivos baseados em filtros interferentes

Filtros interferentes, também denominados por filtros dielétricos ou filtros multicamada são usualmente fabricados a partir de dois materiais diferentes com diferentes índices refrativos. Este efeito, proporciona que uma alteração no índice refrativo resulte em que parte da luz seja refletida e outra parte seja transmitida. A partir de várias camadas alternativas dos mesmos dois materiais, é construído uma cavidade. Alguns dos comprimentos de onda interferem com a sua parte refletida construtivamente, e outros interferem destrutivamente. Os comprimentos de onda que interferem construtivamente passam o filtro e os outros são refletidos. O projeto destes dispositivos é complexo, porque a luz tem de ser extraída, focada através duma lente, passar o filtro, ser colecionada por outra lente e finalmente ser introduzida na fibra. É portanto um processo que inclui muitos elementos tornando a sua utilização de difícil acoplamento e economicamente cara.

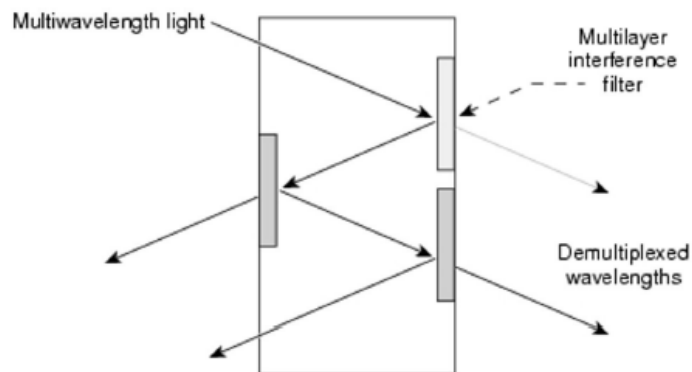


Figura 5 – Dispositivo desmultiplexador baseado em filtros interferentes (extraído de [1]).

Cada um dos filtros deixa passar exatamente um comprimento de onda e reflete os restantes. A utilização de vários filtros permite filtrar todos os comprimentos de onda.

c) Dispositivos baseados em grelhas de *Bragg*

As grelhas de *Bragg* são exatamente o oposto dos filtros. Em vez de permitir que apenas um comprimento de onda passe, atuam através da reflexão do comprimento de onda desejado. A sua facilidade de acoplamento torna a sua implementação bastante usual nos sistemas de transmissão por fibra ótica. A principal dificuldade é a reflexão da luz que pode danificar a fonte ótica, no entanto, pode ser contornado através de circuladores óticos.

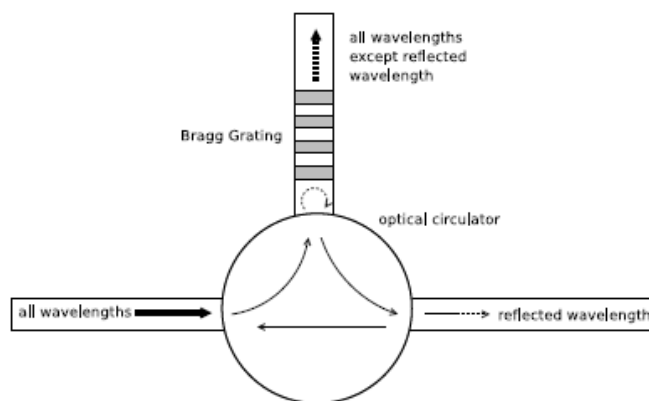


Figura 6 – Dispositivo baseado em grelhas de *Bragg* e circuladores óticos (extraído de [1]).

Todos os comprimentos de onda chegam pela fibra da esquerda, são redirecionados para a fibra no topo, pelo circulator ótico, onde um comprimento de onda é refletido pela grelha. Os restantes comprimentos de onda são retirados pela fibra

do topo. O comprimento de onda desejado é extraído pelo circulador ótico, que o faz sair pela fibra da direita.

d) Dispositivos baseados em interferômetros de *Mach-Zehnder*

Ligando os guias de saída de um acoplador direcional de 3 dB aos guias de entrada de outro acoplador direcional de 3 dB com as mesmas características, obtém-se um interferômetro de *Mach-Zehnder*. Este dispositivo é muito seletivo ao comprimento de onda quando não está balanceado, ou seja, quando o caminho ótico que liga os dois acopladores não é igual.

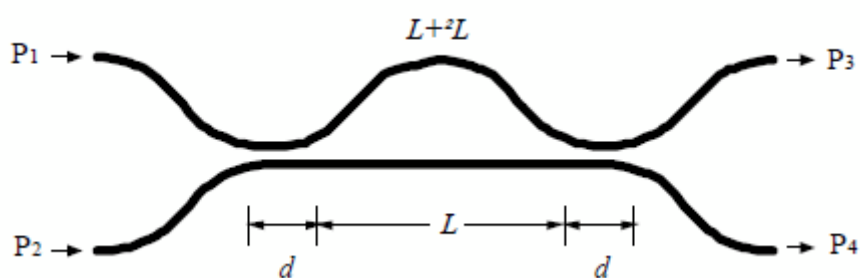


Figura 7 – Representação de um interferômetro de *Mach-Zehnder* formado a partir de dois acopladores 3 dB. O primeiro acoplador separa a luz em duas partes iguais (extraído de [3]).

Os dois feixes de luz demoram então tempos diferentes a chegar ao segundo acoplador, porque uma das fibras é escolhida para ser mais longa. Isto causa interferência e redireciona alguns canais para a primeira saída e outros para a segunda saída.

e) Dispositivos baseados em grelhas de difração

Os dispositivos baseados em grelhas de difrações, geralmente funcionam apenas em sistemas WDM, porque a separação de canais com comprimentos de onda próximos é ineficiente. Esta desvantagem pode tornar-se uma vantagem quando utilizada para a instrumentação de medidas; a ineficiente separação permite medir toda banda espectral.

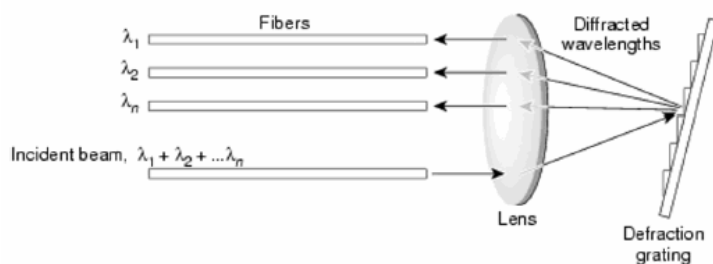


Figura 8 – Dispositivo baseado em grelhas de difração (extraído de [1]).

O feixe de luz incidente é direcionado numa grelha de difração. Cada comprimento de onda é difratado num ângulo diferente podendo ser então recebido numa posição diferente. No sentido contrário o sistema atua como um multiplexador.

f) Dispositivos baseados em Waveguide arrays

A estrutura *arrayed waveguide*, usualmente conhecida como AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*), utiliza a interferência para combinar ou separar diferentes canais. Esta estrutura é basicamente um interferómetro de *Mach-Zehnder* em larga escala, uma vez que consegue combinar cerca de 40 canais com baixo espaçamento entre canais. Por sua vez, as perdas de inserção são relativamente altas.

Os dispositivos AWG são caros e têm perdas maiores, mas têm a vantagem de permitir multiplexar um grande número de canais, usando um só dispositivo.

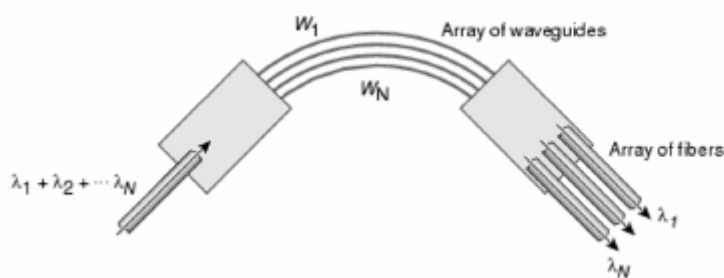


Figura 9 – Dispositivo baseado em AWG (extraído [1]).

A luz entra na primeira cavidade e é separada em diferentes guias de onda. Como diferentes guias de onda têm diferentes comprimentos, a luz na saída tem também fases entre todos os guias de onda. A interferência é então utilizada na segunda cavidade para separar os canais.

2.3. Dispositivo WDM baseado em semicondutores

Nesta secção apresenta-se o conhecimento atual sobre a utilização do dispositivo semiconductor para realizar a demultiplexagem na região do visível.

Existe um grupo de investigação no ISEL, denominado de GIAMOS (Grupo de Investigação Aplicada em Microeletrónica, Optoelectrónica e Sensores), que investiga a utilização de dispositivos semicondutores para aplicação como dispositivo WDM na região visível do espectro. Neste âmbito foram analisados diversas estruturas semicondutoras baseadas em fotodíodos PIN de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H). Têm sido analisados diversos tipos de estruturas semicondutoras e estudada a influência da tensão de polarização na resposta espectral do dispositivo, bem como a possibilidade de efetuar a demultiplexagem dos sinais transmitidos.

2.3.1. Estrutura do dispositivo

As estruturas analisadas são compostas por várias camadas: uma camada de vidro (substrato) onde incidem os múltiplos canais monocromáticos, um elétrodo transparente frontal (ITO – *Indium-Tin Oxide*), a estrutura semicondutora pin-pin e por fim um elétrodo transparente posterior.

A estrutura analisada neste trabalho dá pelo nome de NC5 e consiste num semiconductor com duas zonas de características distintas: um fotodíodo PIN frontal baseado em a-SiC:H e um fotodíodo PIN posterior baseado em a-Si:H.

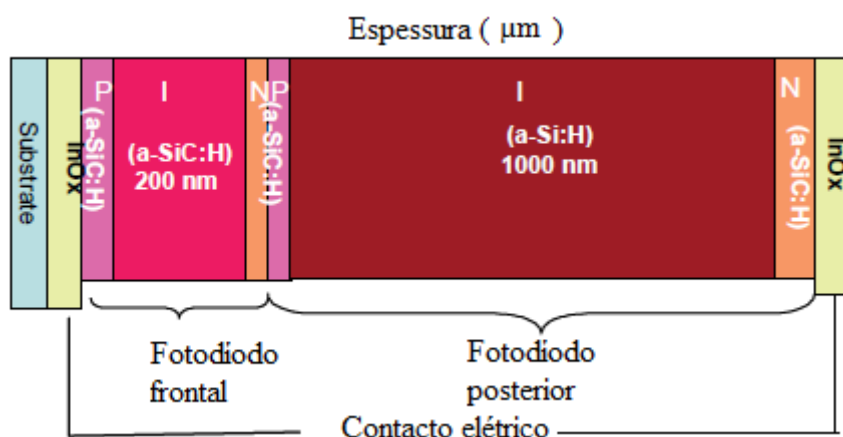


Figura 10 – Estrutura do dispositivo semiconductor (extraído de [7]).

Em testes feitos aos dois fotodíodos da estrutura aferiu-se que, o fotodíodo frontal apresenta índices de maior sensibilidade próximo dos 470 nm, sendo por isso,

indicado para detecção das cores azul (470 nm) e verde (525 nm), e deixa passar comprimentos de onda acima dos 590 nm. Para o fotodíodo posterior observou-se um máximo de fotocorrente próximo dos 600 nm, ou seja consegue detetar a cor vermelha (626 nm).

Em suma, conclui-se que o fotodíodo frontal é indicado como filtro ótico da cor azul, enquanto o fotodíodo posterior é indicado como filtro ótico da cor vermelha. A utilização dos dois complementa-se, uma vez que permite detetar todo o espectro de cores no domínio do visível.

2.3.2. Caracterização da resposta espectral

O dispositivo foi caracterizado através da análise da resposta espectral entre os 400 nm e 800 nm pela variação da fotocorrente gerada ao longo do espectro, primeiro sobre diferentes tensões de polarização (-10 V a +2 V). A Figura 11 ilustra o resultado prático desta análise.

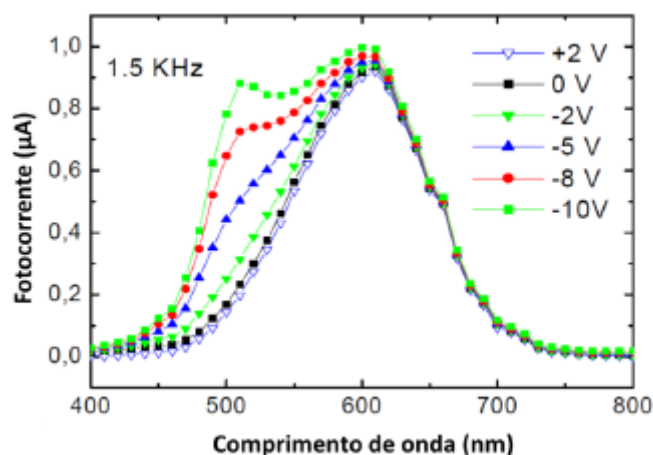


Figura 11 – Resposta espectral do dispositivo para diferentes valores de tensão de polarização (extraído de [7]).

Da análise à resposta espectral da Figura 11 conclui-se que o valor de fotocorrente aumenta com o aumento do comprimento de onda do sinal incidente, até ao máximo de 600 nm, a partir do qual começa a decrescer. Verifica-se também que a sensibilidade do dispositivo aumenta com a diminuição da tensão de polarização, note-se, que para valores negativos de voltagem a fotocorrente gerada é maior, sobretudo na zona entre os 400 nm e os 600 nm. Para comprimentos de onda superiores a 600 nm verifica-se que o sinal de fotocorrente é independente da tensão aplicada.

2.3.3. Contribuição do dispositivo para a resposta espectral

Foi analisado a influência do dispositivo na resposta espectral. Para isso, foram utilizados três LED RGB de alto brilho. A potência ótica de saída foi definida nos $19 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Os resultados da análise às medidas de resposta espectral para o dispositivo são apresentados na Figura 12.

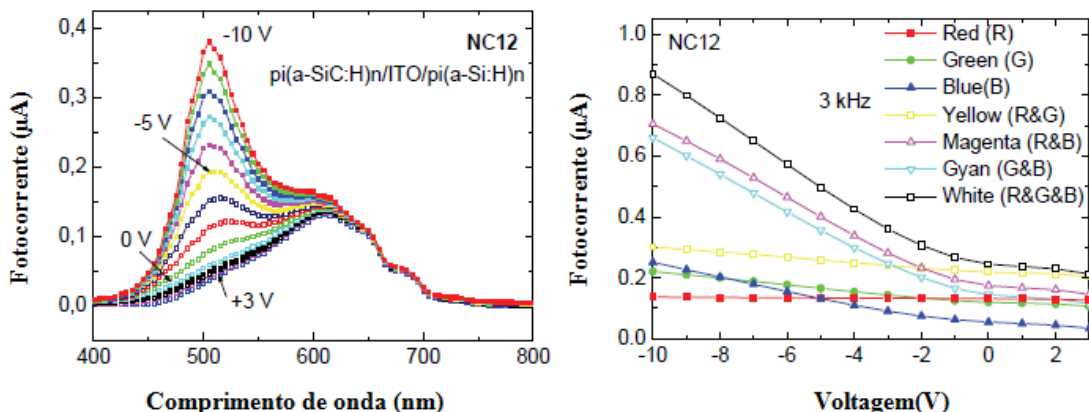


Figura 12 – Influência da variação da tensão de polarização na resposta espectral do dispositivo (extraído de [7]).

Através dos resultados obtidos, conclui-se que a resposta espectral do dispositivo apresenta um pico de fotocorrente próximo dos 500 nm, por efeito do fotodíodo frontal, confirmando o que foi analisado na Figura 11. A contribuição do fotodíodo posterior é menos acentuada, devido à independência dos comprimentos de onda próximos dos 600 nm à tensão aplicada.

A dependência dos vários comprimentos de onda com a tensão aplicada é demonstrada na Figura 12, sendo visível a forte dependência dos comprimentos de onda inferiores (azul e verde) e a fraca dependência dos comprimentos de onda superiores (vermelho).

A contribuição individual de cada fotodíodo foi analisada, Figura 13. Os resultados obtidos, permitem confirmar que os fotodíodos frontal e posterior atua como filtros óticos nas regiões do espectro da cor azul e vermelho, respetivamente.

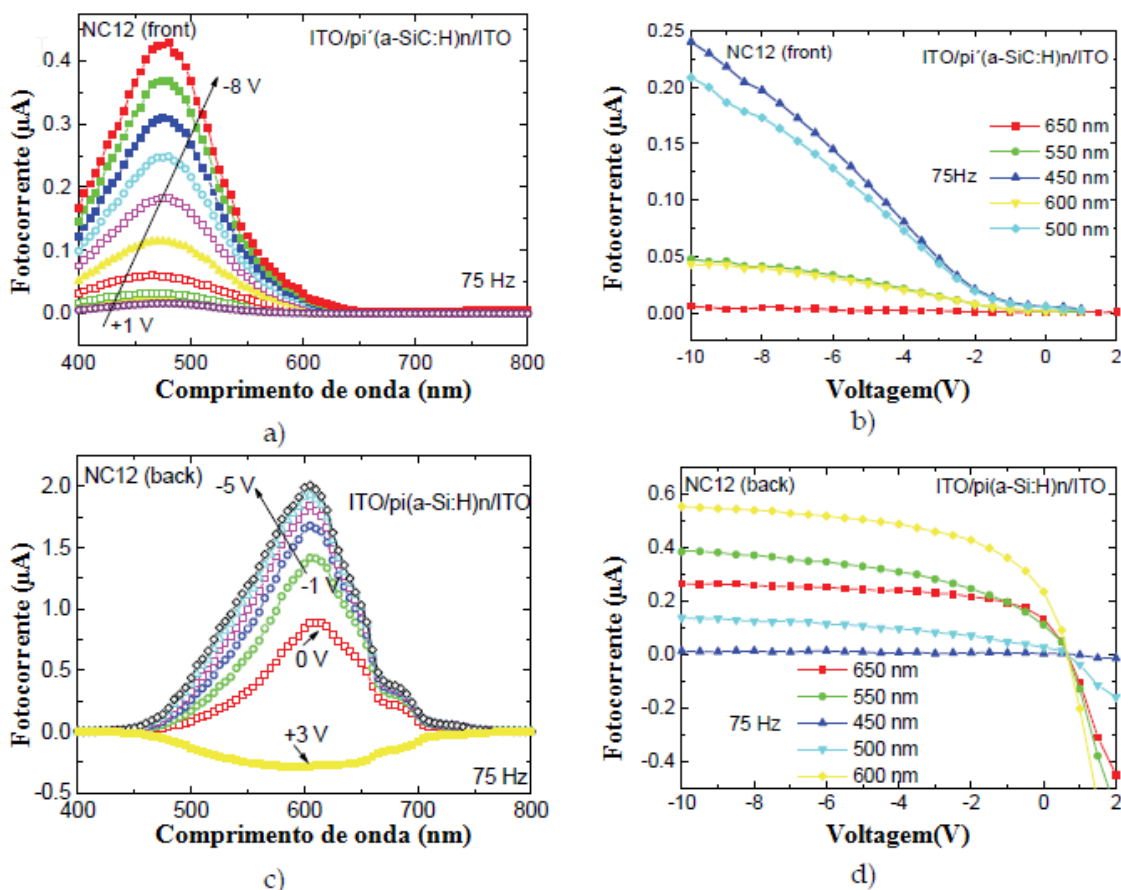


Figura 13 – Contribuição individual de cada fotodíodo para a resposta espectral (extraído de [7]).

2.3.4. Dispositivo WDM controlado por tensão

Foi analisado o efeitos da tensão de polarização ($-5\text{ V} < V < +2\text{ V}$) sobre o sinal de saída multiplexado, pela presença de dois e três sinais monocromáticos.

No topo de cada Figura são apresentados os sinais individuais dos LED que resultaram no sinal multiplexado. Na Figura 14 a), é visível a multiplexagem de dois canais, vermelho e azul, em que as frequências são 1500 Hz e 750 Hz, respetivamente. Desta forma garante-se que se tem as quatro combinações possíveis, correspondentes aos dois canais a OFF, apenas o canal vermelho a ON, apenas o canal azul a ON, e ambos os canais a ON.

Verifica-se que o nível de fotocorrente mais alto verifica-se quando ambos os canais estão a ON, e o nível mais baixo quando ambos estão a OFF. É ainda possível verificar que quando só se tem um canal ligado, o canal vermelho apresenta valores de fotocorrente maior que o azul. Ainda no mesmo gráfico, verifica-se que o sinal

multiplexado apresenta valores superiores de fotocorrente quando a tensão aplicada converge para valores negativos, sobretudo na presença do azul.

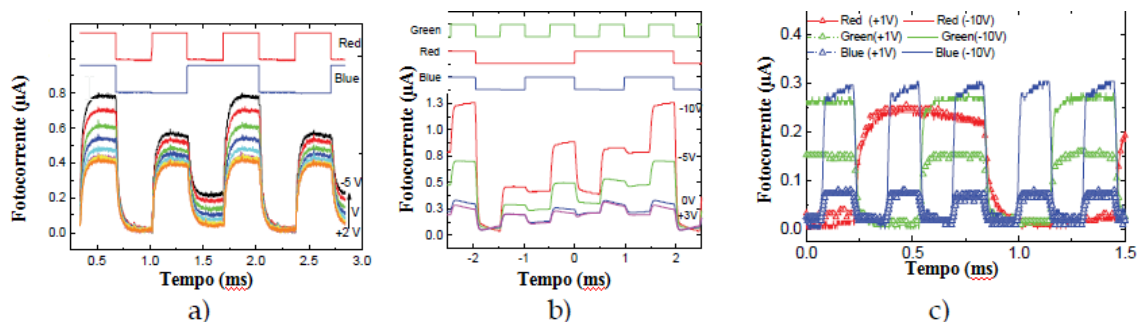


Figura 14 – Variação de sinais multiplexados com a tensão de polarização na presença de: a) vermelho e azul, b) vermelho, verde e azul; c) Dependência do comprimento de onda do canal de entrada com a tensão de polarização (extraído de [7]).

Na Figura 14 b) encontra-se representado a combinação dos três canais: RGB para as diferentes gamas de tensão aplicadas de -10V e +3V. Verifica-se que ao aplicar uma tensão de polarização de -10V, se observam oito níveis distintos de fotocorrente consoante o estado da luz incidente, o que corresponde cada um dos diferentes canais. Com a diminuição da tensão aplicada, a fotocorrente do sinal também baixa. Ao aplicar uma tensão de polarização a +3V, observa-se a atenuação da componente azul e para além do sinal deixar de ter os oito níveis de fotocorrente distintos.

Ao se aplicar uma luz monocromática, os valores de fotocorrente são superiores para o canal azul depois o verde e por fim o vermelho. Os valores de maior fotocorrente sob iluminação de duas luzes monocromática são obtidos para o verde e azul, seguidos pelo vermelho e azul e por fim vermelho & verde.

Na Figura 14 c), é apresentado a dependência dos sinais individuais com a tensão de polarização. Como seria expectável, pelas análises anteriores, o sinal vermelho mantém-se praticamente inalterado com a variação da tensão, por sua vez, os sinais azul e verde diminuem com o aumento da tensão.

Resumindo, conclui-se que o sinal multiplexado depende da tensão aplicada. Sendo que, sobre polarização inversa os diferentes níveis das diferentes combinações dos sinais de entrada tornam-se mais distintos.

A Figura 15 complementa a análise feita até aqui, ao apresentar a variação dos sinais multiplexados sobre o efeito de polarização direta ou inversa. No topo da figura

são apresentados as sequências de ON-OFF dos três sinais de entrada utilizados, sob o ritmo de transmissão de 2000 bps. Verifica-se que sobre a presença de polarização inversa, os oito níveis das possíveis combinações tornam-se mais distintos. Ao aumentar a tensão de polarização os diferentes níveis onde existem a presença do azul ficam menos definidos, dificultando a detecção e descodificação dos sinais de entrada.

O resultado combinado dos sinais multiplexados, sobre a presença de polarização inversa ou direta, pode ser utilizado para detetar os sinais de entrada.

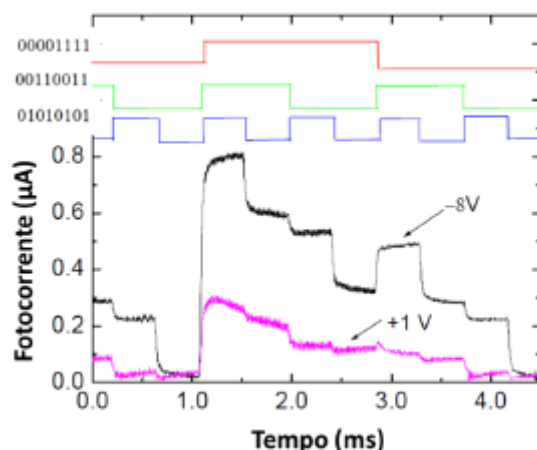


Figura 15 – Variação dos sinais multiplexados com a tensão de polarização (extraído de [7]).

2.3.5. Influência da taxa de transmissão

Na Figura 16 é apresentado os sinais adquiridos, pela presença de dois sinais de entrar, vermelho e verde, sob a influência de diferentes frequências de modulação (1 kHz, 10 kHz e 100 kHz) com uma polarização de -5 V. No topo da figura é mostrado a sequência de bits do sinal de entrada.

Verifica-se que o aumento da frequência produz um efeito de distorção no sinal multiplexado, dificultando o reconhecimento dos diferentes níveis que permitem fazer a descodificação do sinal de entrada. Note-se que com o aumento da frequência os níveis bem definidos vão-se perdendo, Figura 16.

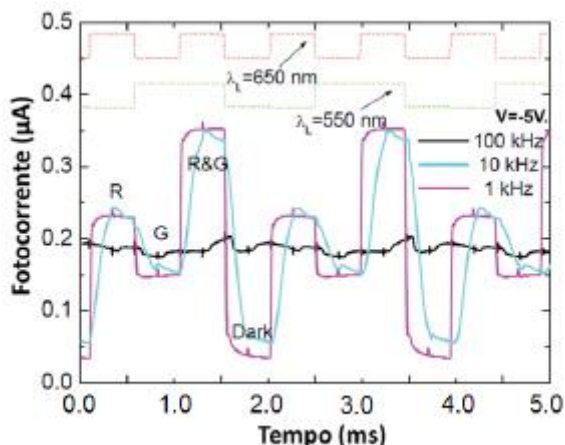


Figura 16 – Influência da taxa de transmissão sobre o sinal multiplexado de dois sinais (R e G) (extraído de [7]).

2.3.6. Influência da potência ótica do sinal incidente

A identificação dos diferentes sinais de entrada requer uma calibração do sinal de transmissão, com o objetivo de conhecer a resposta do dispositivo para cada sinal. Como a atenuação do sinal, ao longo do meio de transmissão, causa a redução da intensidade ótica do sinal foi analisado a influência desse efeito.

Para isso, o sinal multiplexado foi adquirido com sinais e entrada de intensidades óticas diferentes, a -8 V e a +1 V. As medições foram feitas para valores de intensidade ótica até 140 µWcm⁻².

A Figura 17 mostra o resultado da variação da fotocorrente com a polarização ótica.

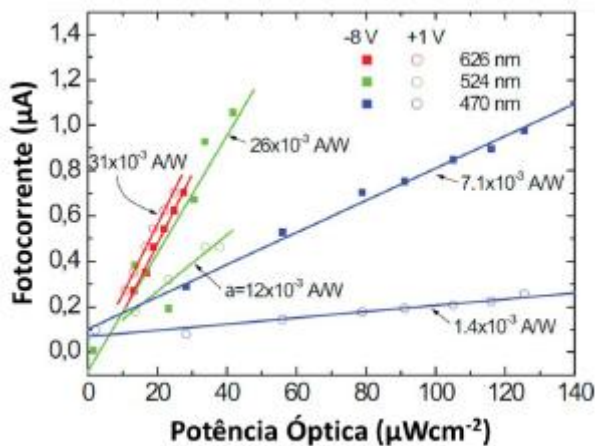


Figura 17 – Influência da intensidade ótica no sinal multiplexado (extraído de [7]).

O resultado permite observar que sobre iluminação vermelha a amplitude do sinal multiplexado é quase independente da tensão de polarização aplicada. Contudo é o que apresenta maior dependência da intensidade ótica, com uma taxa de crescimento linear de aproximadamente 31×10^{-3} A/W.

Sobre iluminação verde e azul, a dependência da tensão de polarização é maior do que sobre iluminação vermelha, como seria de esperar pelas análises anteriores. Verifica-se que para estes casos a dependência da potência ótica não é tão acentuada, apesar de em ambos os casos a aplicação de uma tensão de polarização negativa contribuir para o aumento da fotocorrente.

2.3.7. Influência de polarização ótica para a resposta espectral

Em testes mais recentes foi analisado a influência da polarização ótica na resposta espectral. Por forma a fazer essa análise utilizou-se dois LED a emitir pelo lado frontal e posterior, fazendo variar a intensidade da luz de fundo bem como a frequência do sinal incidente.

Assim, foram feitas medições quando o dispositivo se encontra sem iluminação de fundo e quando é colocado um LED de uma determinada cor, polarizado com uma corrente de 0,1 mA, 0,5 mA, 1 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA e 20 mA para uma frequência do sinal incidente de 500 Hz e de 3000 Hz. Para cada valor de frequência do sinal incidente foi analisado a influência da luz de fundo de cor violeta (400 nm), azul (470 nm), verde (525 nm), amarela (580 nm) e vermelha (626 nm).

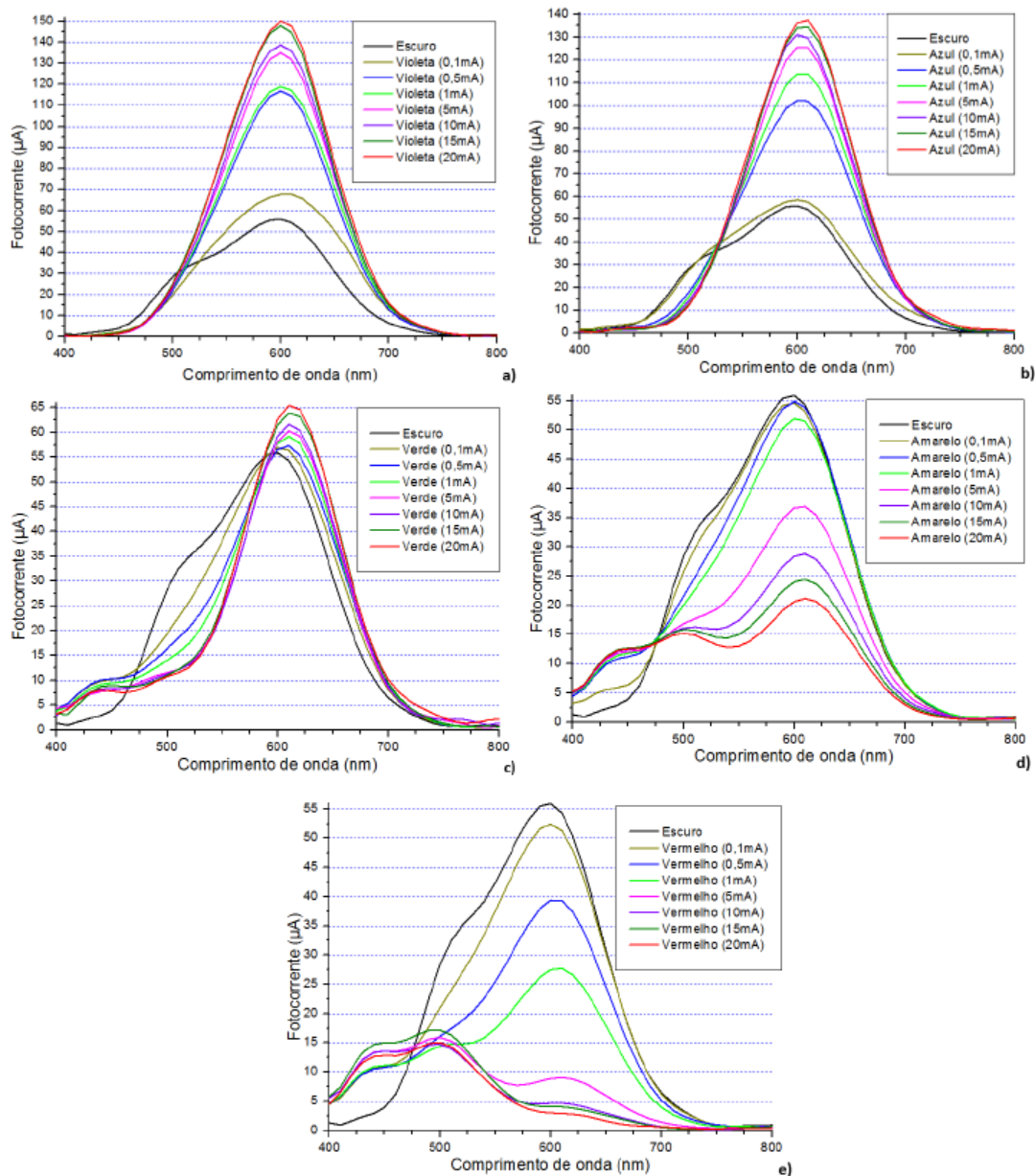


Figura 18 – Resposta espectral à frequência de 500 Hz sobre a influência de luz de fundo frontal da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7]).

Verifica-se que a aplicação da luz de fundo de cor violeta e azul, Figura 18 a) e b), amplifica a fotocorrente para comprimentos de onda superiores a 525 nm, seja qual for a intensidade da polarização ótica.

Sobre a influência da luz de fundo de cor verde é visível também um ligeiro aumento da fotocorrente, para comprimentos de onda superiores a 600 nm, ainda que inferior à amplificação obtida com as luzes de fundo violeta e azul.

Na presença de polarização ótica de cor amarela e vermelha verifica-se o efeito inverso, ou seja, a fotocorrente é atenuada para comprimentos de onda superiores a 475 nm, sendo a atenuação superior com o aumento da intensidade da polarização ótica.

A mesma análise foi feita para a frequência do sinal incidente de 3000 Hz, Figura 19. Neste caso, verifica-se um comportamento observado para o caso anterior, tendo no entanto valores de fotocorrente inferiores. Conclui-se que o aumento da frequência do sinal incidente tende a atenuar o valor de fotocorrente.

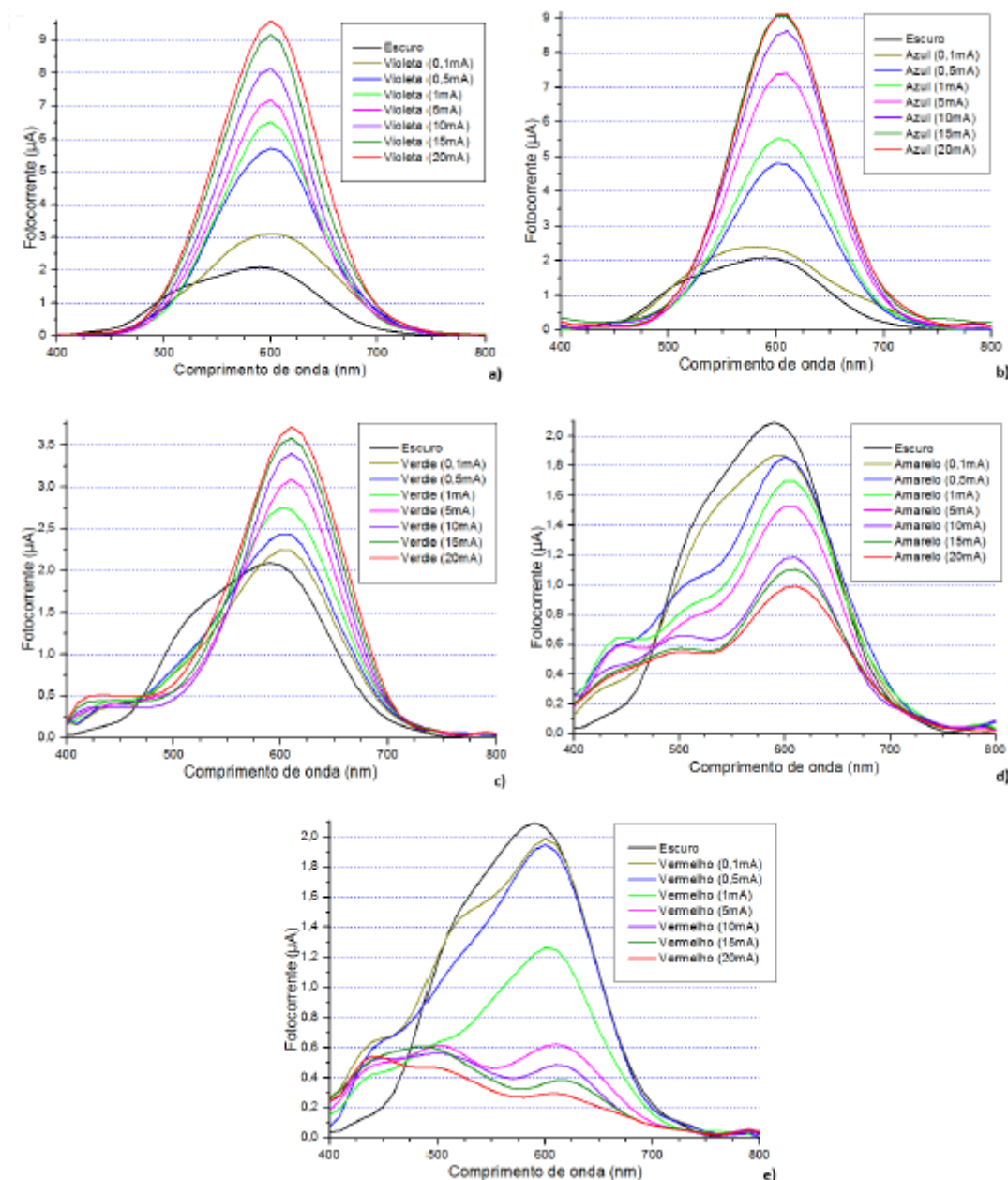


Figura 19 - Resposta espectral à frequência de 3000 Hz sobre a influência de luz de fundo frontal da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7]).

A influência da polarização ótica sobre iluminação de fundo posterior do dispositivo foi também analisa, sobre as mesmas condições.

Os resultados da Figura 20 permitem aferir que incidindo luz de fundo pelo lado posterior do dispositivo, a uma frequência de 500 Hz a fotocorrente gerada acima dos 450 nm é independente da cor da luz de fundo. Verifica-se que em todos os casos a fotocorrente é sempre atenuada, seja qual for a intensidade da iluminação de fundo. A fotocorrente dos comprimentos de onda inferiores a 450 nm é sempre amplificada.

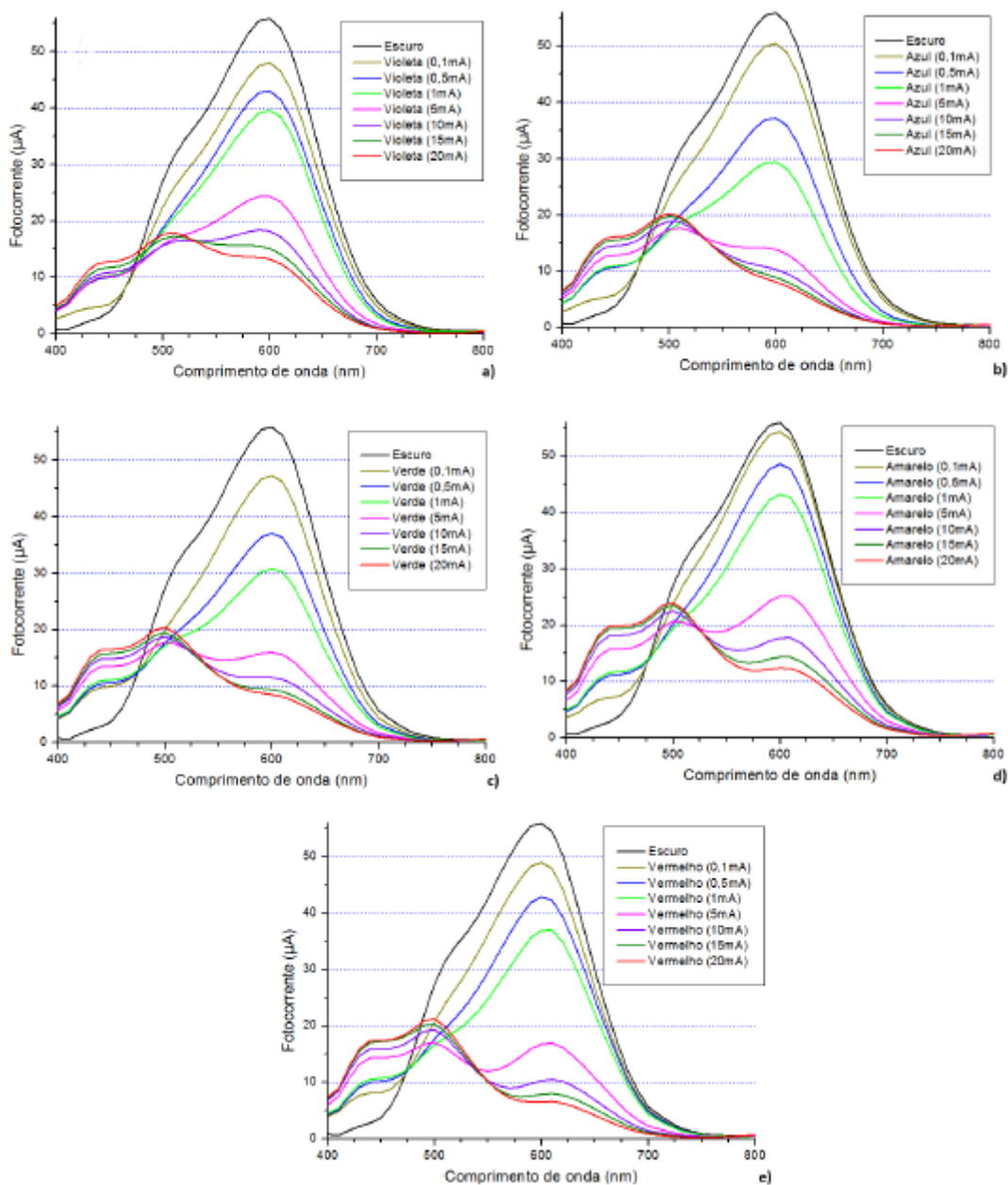


Figura 20 - Resposta espectral à frequência de 500 Hz sobre a influência de luz de fundo posterior da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7]).

Tal como foi verificado na Figura 19, o aumento da frequência do sinal incidente resulta em valores de fotocorrente inferiores. Seja qual for a cor da luz de fundo aplicada pelo lado posterior a uma frequência de 3000 Hz, a fotocorrente gerada acima do comprimento de onda e 500 nm é sempre atenuada. A fotocorrente para comprimentos de onda inferiores a 500 nm é sempre amplificada, sendo tanto maior quando maior for a intensidade da luz incidente.

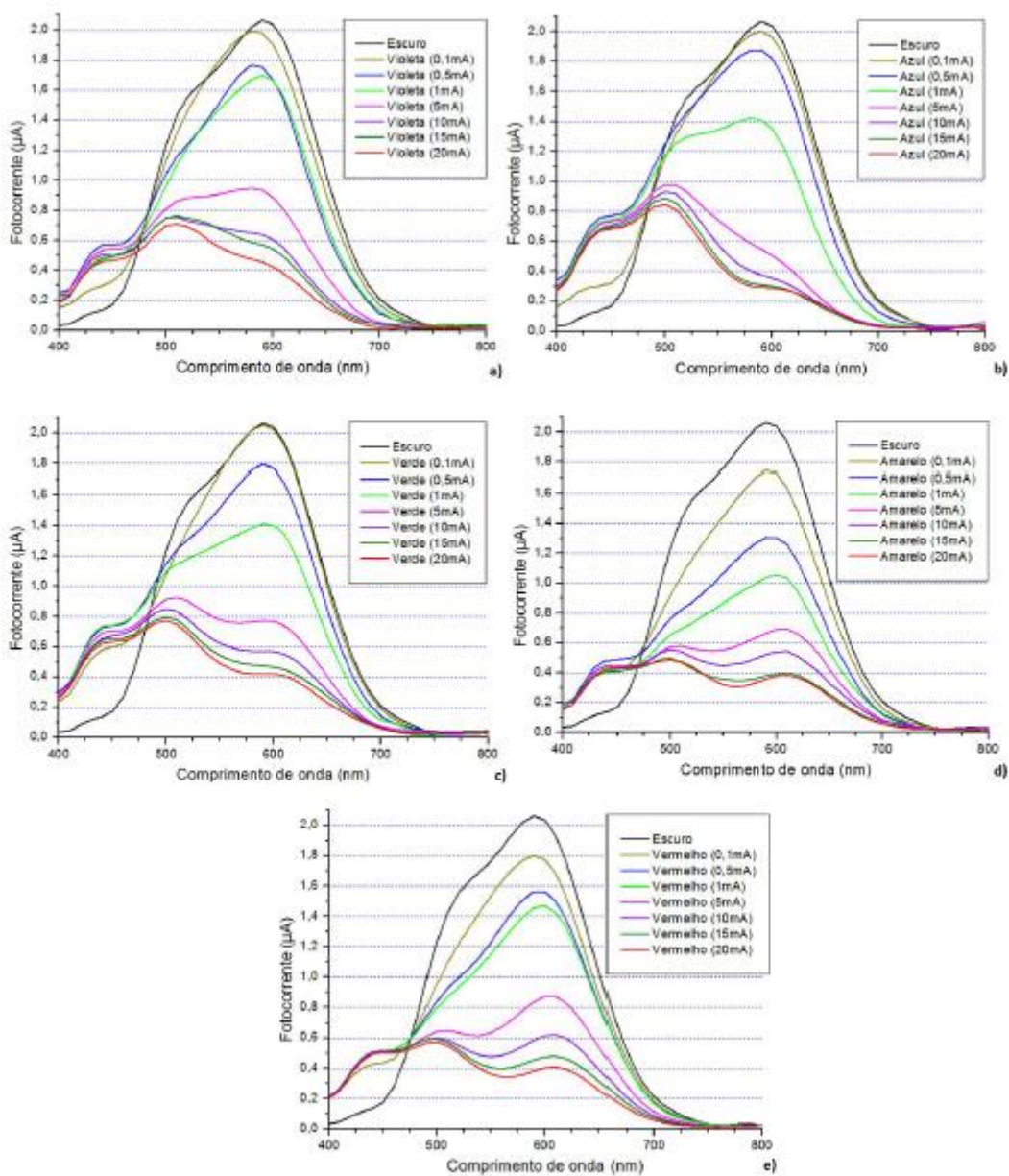


Figura 21 - Resposta espectral à frequência de 3000 Hz sobre a influência de luz de fundo posterior da cor a) violeta, b) azul, c) verde, d) amarela e e) vermelho (extraído de [7]).

2.4. Referências bibliográficas

- [1] Bischoff, Dominik, “Wavelength multiplexing: WDM and DWDM systems”, 2009;
- [2] Andrade, Miguel, “WDM – Multiplexagem por divisão de comprimento de onda”, FEUP, 2001;
- [3] Figueiredo, José Maria Longras, “Dispositivos ópticos integrados para multiplexagem de comprimento de onda”, FEUP, 1994;
- [4] <http://pt.scribd.com/doc/60886269/APOSTILA-DE-DWDM>, em 02-01-2013;
- [5] http://www.gta.ufrj.br/grad/04_1/wdm/work.html, em 04-01-2013;
- [6] Keiser, Gerd, “A review of WDM technology and applications”, GTE Systems & Technology, 1998;
- [7] Louro, P., Vieira, M., Vieira, M. A., Fernandes, M., Costa, J., “Use of a-Si:H Photodiodes in Optical Communications Applications”, Advances in Photodiodes, 2010;
- [8] Ferraz, Hugo, “Fotodetector e dispositivo WDM integrados”, ISEL, 2012;
- [9] A. M. Dias, “Projeto de Diplomação: Análise de projetos de redes metropolitanas WDM”, Porto Alegre, 2009;
- [10] T. Miki and H. Ishio, “Viabilities of Wavelength-Division-Multiplexing Transmission System over an optical fiber cable”, IEEE Transactions on Communications, 1978;
- [11] T. A. Silva, “Tese de dissertação de Mestrado em Implementação de WDM com dispositivos semicondutores”, ISEL, 2011;
- [12] N. Massa, “Fiber Optic Telecommunication”, University of Connecticut, Massachusetts, 2000;
- [13] V. A. Manuel, M. Vieira, J. Costa, P. Louro, M. Fernandes, A. Fantoni, “Double Pin Photodiodes with two optical gate connections for light triggering: A capacitive two-phototransistor model”, in Sensors & Transducers Journal, 2011;
- [14] M. Haupt and U. Fischer-Hirchert, “WDM Key Element in the visible spectrum for standard SI-POF”, Fachhochschule Schmalkalden, 2010;
- [15] J. Wilson, J. Hawkes, “Optoelectronics, an introduction”, Prentice Hall, London, 1998;

- [16] S. M. Sze, "Physics of the semiconductor devices", 2nd Ed., John Wiley, New York, 1981.

Capítulo 3 – Caracterização optoelectrónica

Neste capítulo é feita uma apresentação sucinta do dispositivo semiconductor usado para a fotodeteção e demultiplexagem dos sinais transmitidos por cada canal ótico e são apresentados os resultados das experiências laboratoriais realizadas para a sua caracterização. O objetivo das experiências é o estudo das características optoelectrónicas do dispositivo sobre polarização ótica, usando para o efeito várias sequências binárias dos sinais a transmitir.

3.1. Descrição do dispositivo

A estrutura semicondutora utilizada é constituída por dois fotodíodos PIN, que no lado frontal possui uma camada intrínseca muito fina (200 nm) com hiato energético de 2.1 eV, baseada em a-SiC:H, e no lado posterior uma camada intrínseca mais espessa (1000 nm) com hiato energético de 1.8 eV, baseada em a-Si:H.

Na estrutura identificam-se duas zonas distintas de geração de fotocorrente, uma na zona dos 500 nm e outra nos 626 nm, dependentes da tensão de polarização aplicadas. Estas duas zonas distintas resultam das propriedades associadas a cada camada intrínseca (hiato energético e espessura). A Figura 22 ilustra a configuração estrutural do dispositivo semiconductor.

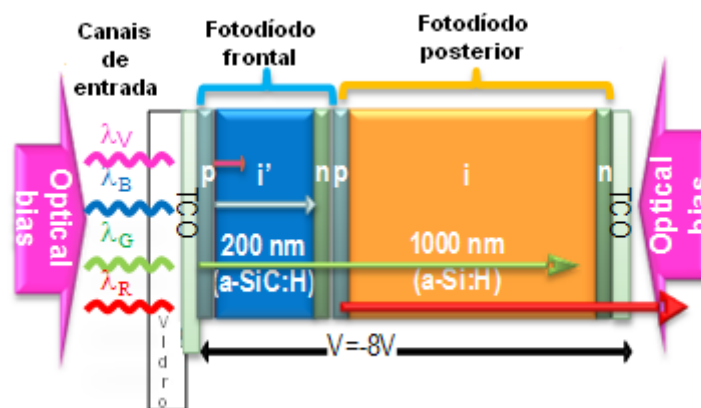


Figura 22 - Diagrama esquemático representativo da estrutura do dispositivo semiconductor.

Pelo estudo de cada fotodíodo conclui-se que o fotodíodo frontal gera fotocorrente até aos 600 nm, observando-se um máximo próximo dos 470 nm. Em termos práticos, o primeiro fotodíodo absorve os comprimentos de onda do violeta (400

nm, 3.1 eV), azul (470 nm, 2.638 eV) e verde (525 nm, 2.632 eV), e deixa passar para o fotodíodo posterior o vermelho (626 nm). Isto deve-se ao facto da energia dos fótons dos comprimentos de onda superiores a 600 nm (vermelho: 626 nm, 1.981 eV) ser inferior ao hiato energético do fotodíodo frontal (2.1 eV) o que impede a fotogeração.

Por sua vez, para o fotodíodo posterior observa-se um máximo de fotocorrente gerada próximo de 600 nm, o que resulta na absorção da luz vermelha que o primeiro fotodíodo deixa passar. O fotodíodo posterior gera fotocorrente até aos 700 nm. Assim, a estrutura de fotodíodos está desenvolvida de forma a favorecer no fotodíodo frontal uma grande absorção da luz violeta e azul, e grande transparência à luz vermelha, enquanto que o fotodíodo posterior favorece a absorção da luz vermelha.

3.2. Descrição das experiências

A caracterização optoelectrónica realizada ao dispositivo consistiu em avaliar o seu comportamento enquanto demultiplexador, perante diferentes condições, nomeadamente a utilização de diferentes sequências binárias dos LEDs e a aplicação de radiação de fundo em regime estacionário.

A caracterização do dispositivo semiconductor foi feita através da medição da fotocorrente gerada, através de um osciloscópio, utilizando-se LEDs de diferentes comprimentos de onda modulados a diferentes frequências e sobre o efeito polarização ótica, através da aplicação de radiação de fundo. A montagem experimental para realizar a experiências encontra-se esquematizada na Figura 23.

Para simular os quatro canais de transmissão de dados utilizou-se quatro LEDs de alto brilho, com comprimentos de onda na região do visível, nomeadamente, violeta (400 nm), azul (470 nm), verde (525 nm) e vermelho (626 nm). Cada LED representa um canal ótico de transmissão diferente, sob a forma de uma onda quadrada e controlados através de uma placa microcontrolador ligada a um computador.

A placa microcontrolador é alimentada por uma fonte de tensão DC e permite através de uma ligação série ao computador gerar as sequências binárias de cada canal de transmissão, controlar a intensidade luminosa dos LEDs emissores. Os LEDs de fundo utilizados para a polarização ótica frontal e posterior são alimentados por uma fonte de corrente DC, que permite controlar a intensidade luminosa.

Para se controlar a tensão de polarização do dispositivo semiconductor recorreu-se a um amplificador de *Lock-in*. Com base em resultados de experiências anteriores configurou-se o amplificador de *Lock-in* para uma tensão de polarização DC fixa de -8 V. No ponto de saída do dispositivo é utilizado um amplificador de baixo ruído, dado que o sinal de fotocorrente gerado é bastante baixo.

Para ler os sinais óticos emitidos pelos três canais de transmissão e também para a medição da fotocorrente gerada pelo dispositivo semiconductor, utilizou-se um osciloscópio digital de 4 canais.

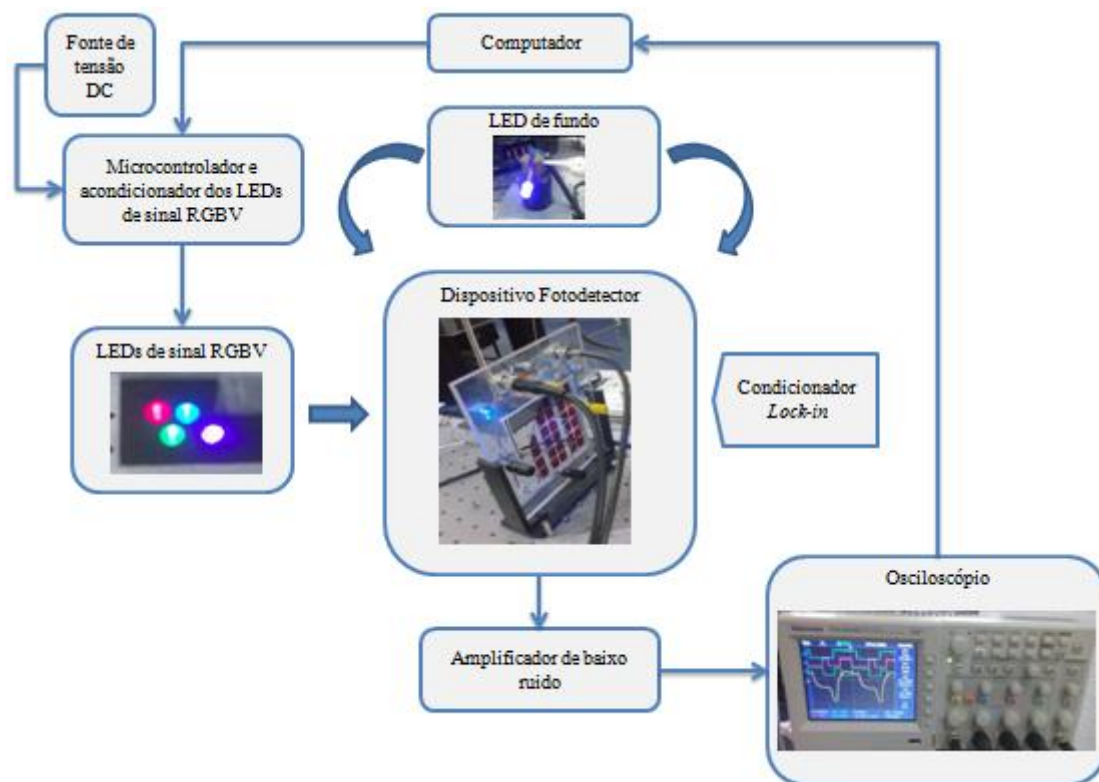


Figura 23 – Diagrama da montagem utilizada no estudo dos sinais WDM.

Para a experiência definiram-se quatro sequências binárias individuais para os quatro canais, denominadas por sequências padrão. Na definição de cada sequência padrão, consideraram-se diferentes frequências de modulação para os diferentes canais de transmissão. Na Tabela 2 mostram-se as quatro frequências de modulação utilizadas.

Tabela 2 – Definição das frequências de modulação dos canais individuais.

Frequência	Bits															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
F0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
F1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
F2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
F3	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

As frequências de modulação foram definidas tendo por base uma razão de dobro entre frequências consecutivas, ou seja, a frequência F1 tem o dobro da frequência de modulação da F0 (a mais lenta), a frequência F2 tem o dobro da frequência de modulação da F1, e por sua vez a frequência F3 (a mais rápida) tem o dobro da frequência de modulação da F2. As quatro sequências foram definidas tendo em conta estas frequências de modulação, sendo que a cada canal é atribuído uma frequência de modulação diferente.

Assim, garantiu-se que em cada sequência é possível testar as 16 combinações possíveis existentes (2^4) para os quatro canais, assegurando que em pelo menos uma combinação todos os canais estarão a OFF ou ON. As sequências padrão definidas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Definição das combinações RGBV das sequências padrão.

Frequência	Sequências padrão			
	Sequência 1	Sequência 2	Sequência 3	Sequência 4
F0	R	V	G	B
F1	G	B	R	V
F2	B	R	V	G
F3	V	G	B	R

As sequências definidas permitem identificar o comportamento da estrutura semicondutora, face ao desempenho individual e combinado dos canais, na presença ou ausência de polarização ótica.

De salientar que todos os gráficos apresentados neste trabalho foram devidamente tratados, de forma a normalizar os valores da fotocorrente, isto é, o sinal a normalizar é decomposto nas suas duas componentes, tempo e amplitude. Na componente temporal, é adicionado o valor mínimo do tempo para que este tenha início no valor 0, enquanto que na componente da amplitude se soma ao sinal o valor mínimo do sinal de modo a assegurar o nível de referência 0 quando todos os canais estão OFF.

3.3. Análise dos canais individuais

A primeira análise realizada visa estudar o comportamento do dispositivo quando para cada uma das sequências definidas na Tabela 3 é utilizado apenas um dos canais de transmissão.

Fez-se a análise da fotocorrente gerada pelo dispositivo, quando este se encontra na ausência e na presença de polarização ótica, através da aplicação de radiação de fundo pelo lado frontal e posterior. Pelos resultados de estudos anteriores, concluiu-se que o desempenho do dispositivo é favorecido pela utilização de radiação de fundo com a luz violeta e de polarização elétrica aplicada de -8 V.

Com esta análise pretende-se, analisar os ganhos produzidos pela aplicação da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior, analisar os tempos de subida da fotocorrente e determinar de que forma estas medidas se relacionam com o comprimento de onda do canal a transmitir e com frequência de modulação dos mesmos.

3.3.1. Análise do canal vermelho (R)

De forma a analisar a influência da incidência da luz de fundo quando apenas o sinal ótico vermelho é transmitido, fizeram-se testes ao dispositivo utilizando apenas o canal vermelho, de acordo com frequências definidas pelas sequências padrão. Fizeram-se medições de fotocorrente, para as quatro sequências, variando a incidência da radiação de fundo. As Figuras 24, 25, 26 e 27 ilustram o resultado das medições

realizadas. No topo de cada gráfico mostra-se a sequência binária utilizada no canal de transmissão.

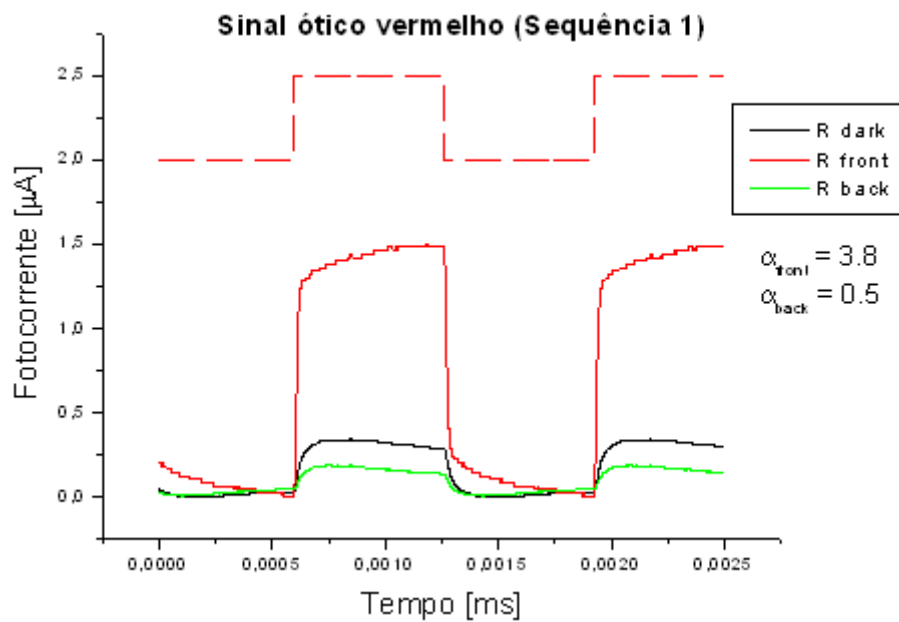


Figura 24 – Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

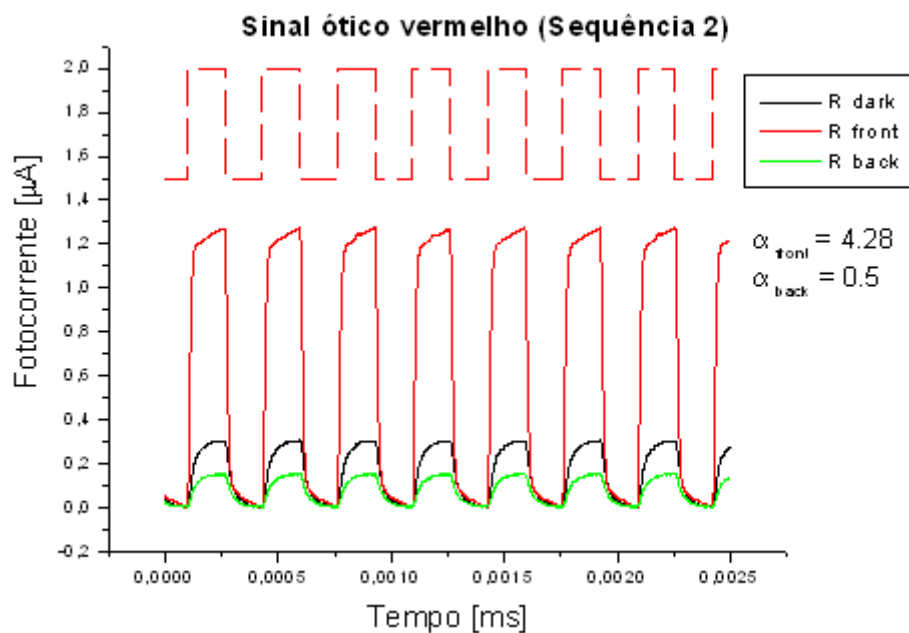


Figura 25 - Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

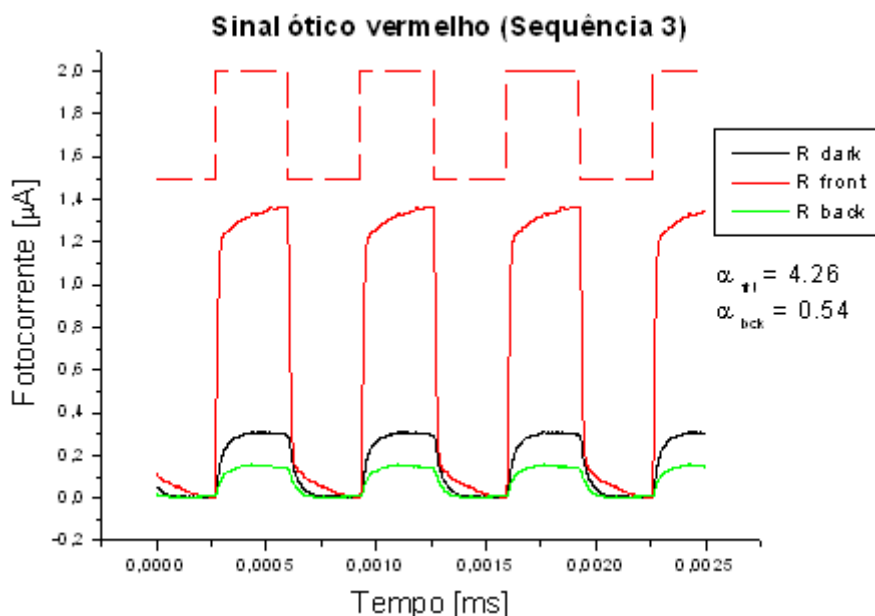


Figura 26 - Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

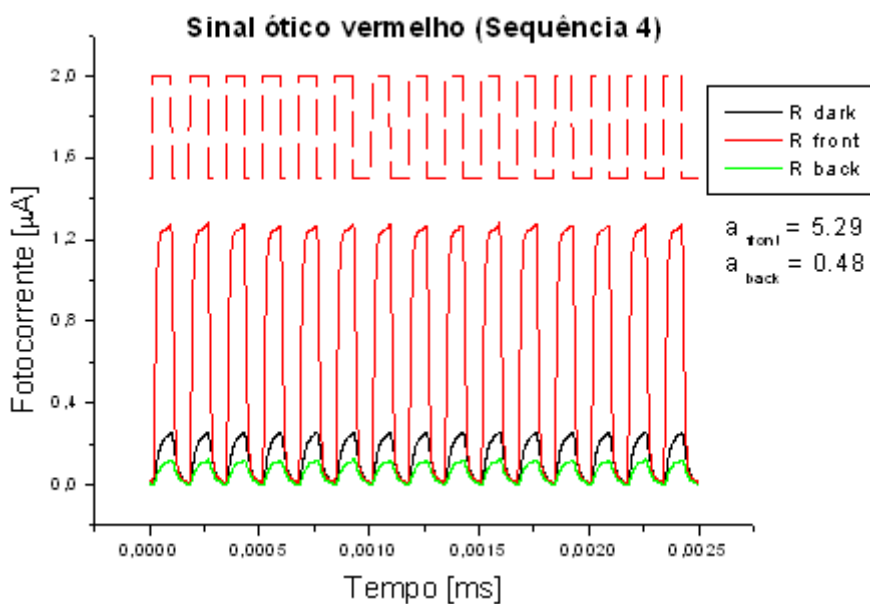


Figura 27 - Fotocorrente normalizada do canal vermelho (626 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

Através das medições realizadas com o canal de transmissão vermelho, verifica-se que a aplicação de radiação de fundo afeta a fotocorrente gerada pelo dispositivo de forma diferente. Quando o dispositivo, na presença do canal vermelho, é sujeito à incidência de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal a fotocorrente gerada é

amplificada face à fotocorrente medida nas mesmas condições mas sem aplicação de radiação de fundo. Por sua vez, a aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior atenua a fotocorrente gerada. Como seria de esperar a fotocorrente gerada segue a forma temporal do sinal ótico transmitido, notando-se no entanto que o tempo de subida da fotocorrente, até atingir o máximo (R=ON) varia com a frequência do sinal ótico.

Para cada medição, ou seja, com aplicação de radiação de fundo frontal e posterior, e para cada sequência, calculou-se o ganho ótico da aplicação do fundo e os tempos de subida da fotocorrente. O ganho foi calculado tendo em conta o valor médio do sinal ótico com a aplicação de fundo e o valor médio do sinal ótico transmitido. O tempo de subida foi medido entre 10% a 90% do valor máximo de fotocorrente na transição OFF para ON. A Tabela 4 apresenta os ganhos óticos e tempo de subida atingidos para as situações descritas.

Tabela 4 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal vermelho.

Sequência	Frequência	Ganho		Tempo de subida (ns)		
		Radiação frontal	Radiação posterior	Escuro	Radiação frontal	Radiação posterior
1	F0	3.80	0.51	75.6	77.6	74.8
3	F1	4.26	0.48	67.9	31.3	66.6
2	F2	4.28	0.46	54.1	24.0	64.6
4	F3	5.29	0.45	21.4	21.7	48.0

Verifica-se que o ganho ótico obtido se relaciona com a frequência de modulação do sinal ótico transmitido. O aumento da frequência de modulação faz com que o ganho ótico, resultante da aplicação de luz de fundo pelo lado frontal, seja maior. Com a radiação de fundo a incidir no lado posterior, o aumento da frequência de modulação atenua ligeiramente o ganho ótico. Por sua vez, o tempo de subida decresce com o aumento da frequência de modulação. Verifica-se assim que não existe

correlação entre o ganho ótico e os tempos de subida. A aplicação de radiação de fundo não tem uma relação linear com os tempos de subida nas diferentes frequências.

3.3.2. Análise do canal verde (G)

De forma a analisar a influência da incidência da luz de fundo quando apenas é transmitido o sinal ótico verde, fizeram-se testes ao dispositivo utilizando apenas o canal verde, de acordo com frequências definidas pelas sequências padrão. Fizeram-se medições de fotocorrente, para as quatro sequências, variando a incidência da radiação de fundo. As Figuras 28, 29, 30 e 31 ilustram o resultado das medições realizadas. No topo de cada gráfico mostra-se a sequência binária utilizada no canal de transmissão.

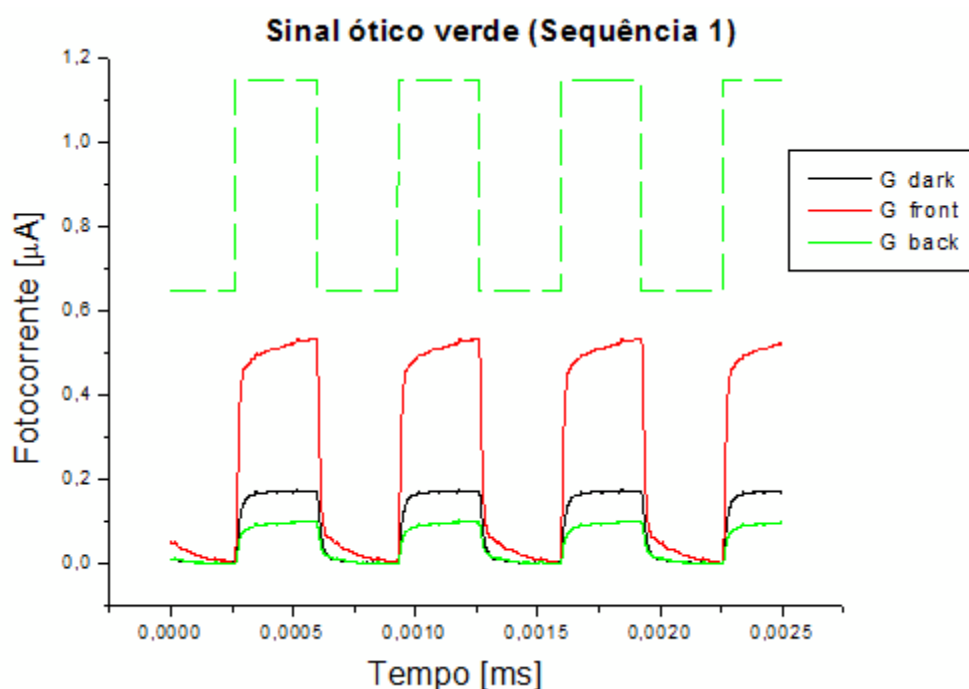


Figura 28 – Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

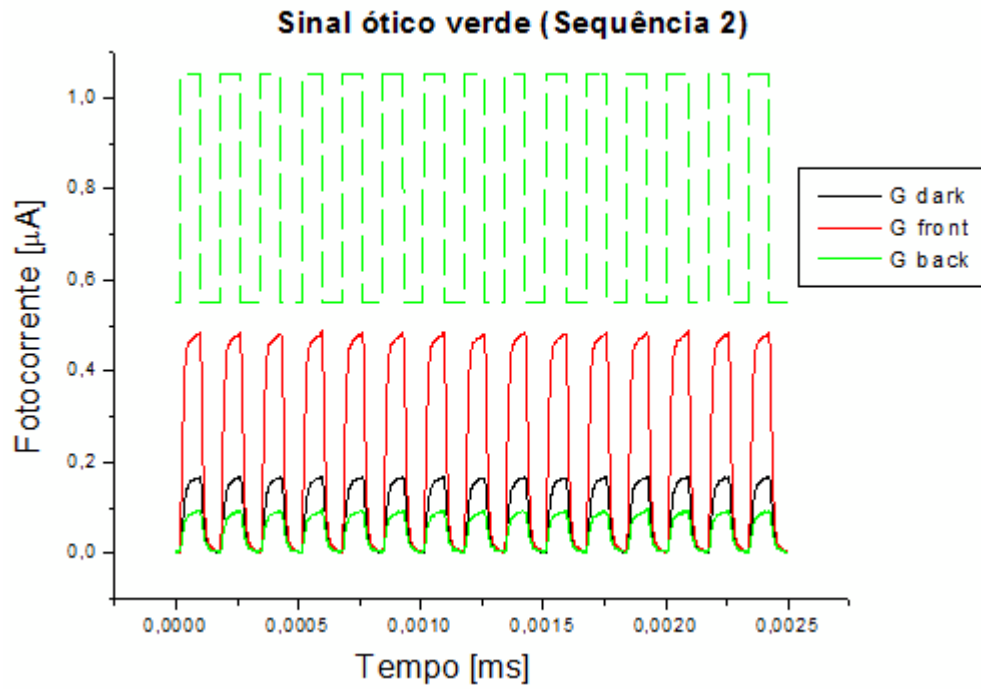


Figura 29 - Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

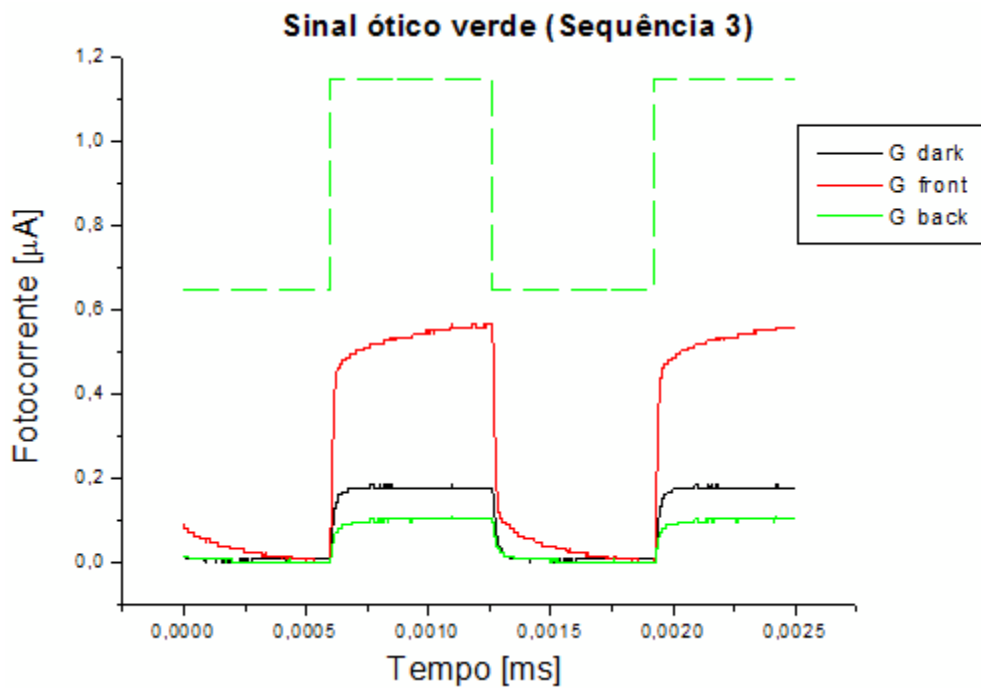


Figura 30 - Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

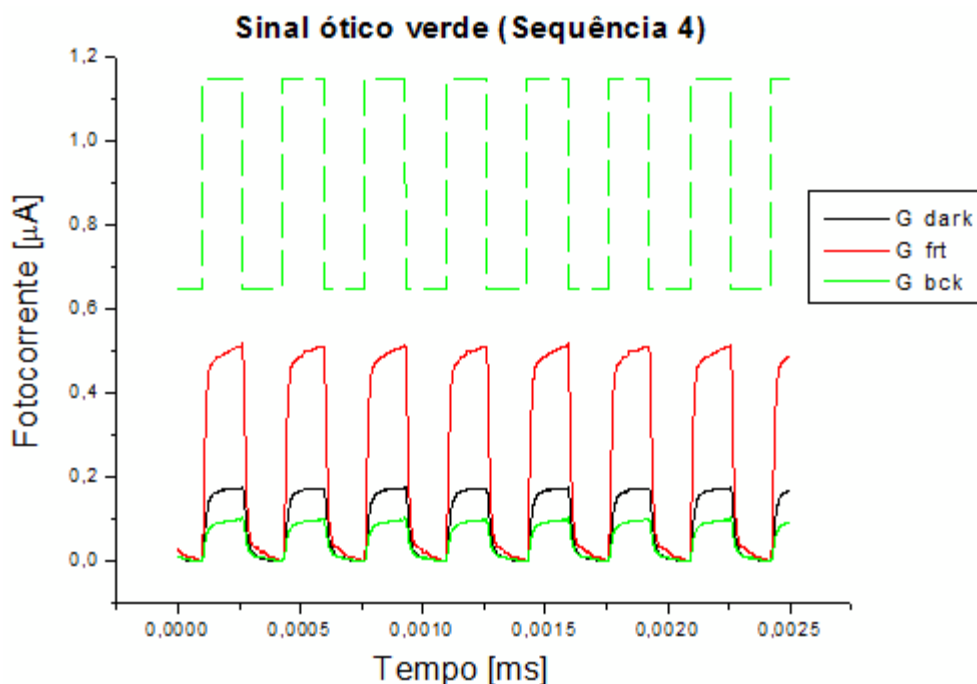


Figura 31 - Fotocorrente normalizada do canal verde (525 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

Através das medições realizadas com o canal de transmissão verde, verifica-se que a aplicação de radiação de fundo afeta a fotocorrente gerada pelo dispositivo de forma diferente, tal como se sucede com o canal vermelho analisado anteriormente. Quando o dispositivo, na presença do canal verde, é sujeito à incidência de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal a fotocorrente gerada é amplificada face à fotocorrente medida nas mesmas condições mas sem aplicação de radiação de fundo. Por sua vez, a aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior atenua a fotocorrente gerada. Como seria de esperar a fotocorrente gerada segue a forma temporal do sinal óptico transmitido, notando-se no entanto que o tempo de subida da fotocorrente, até atingir o máximo ($G=ON$) varia com a frequência do sinal óptico.

Para cada medição, ou seja, com aplicação de radiação de fundo frontal e posterior, e para cada sequência, calculou-se o ganho ótico da aplicação do fundo e os tempos de subida da fotocorrente. O ganho foi calculado tendo em conta o valor médio do sinal ótico com a aplicação de fundo e o valor médio do sinal ótico transmitido. O tempo de subida foi medido entre 10% a 90% do valor máximo de fotocorrente na transição OFF para ON. A Tabela 5 apresenta os ganhos óticos e tempo de subida atingidos para as situações descritas.

Tabela 5 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal verde.

Sequência	Frequência	Ganho		Tempo de subida (ns)		
		Radiação frontal	Radiação posterior	Escuro	Radiação frontal	Radiação posterior
3	F0	3.10	0.56	32.8	134.0	90.4
1	F1	3.09	0.57	42.1	62.2	76.2
4	F2	2.93	0.57	36.3	28.7	54.8
2	F3	2.90	0.56	28.7	20.5	34.6

Verifica-se que o ganho ótico obtido se relaciona com a frequência de modulação do sinal ótico transmitido. O aumento da frequência de modulação faz com que o ganho ótico, resultante da aplicação de luz de fundo pelo lado frontal, seja menor. Com a radiação de fundo a incidir no lado posterior, a variação da frequência de modulação não produz alterações no ganho ótico. Por sua vez, o tempo de subida, à semelhança do que se verifica no canal vermelho, também decresce com o aumento da frequência de modulação mas não de uma forma linear. Neste caso verifica-se relação com o ganho ótico, que também decresce com a frequência. A aplicação de radiação de fundo faz com que o tempo de subida aumente bastante na frequência mais baixa, sobretudo quando é pelo lado frontal. Contudo o aumento da frequência diminui o tempo de subida para valores muito próximos, nas três medições diferentes.

3.3.3. Análise do canal azul (B)

De forma a analisar a influência da incidência da luz de fundo quando apenas é transmitido o sinal ótico azul, fizeram-se testes ao dispositivo utilizando apenas o canal azul, de acordo com frequências definidas pelas sequências padrão. Fizeram-se medições de fotocorrente, para as quatro sequências, variando a incidência da radiação de fundo. As Figuras 32, 33, 34 e 35 ilustram o resultado das medições realizadas. No topo de cada gráfico mostra-se a sequência binária utilizada no canal de transmissão.

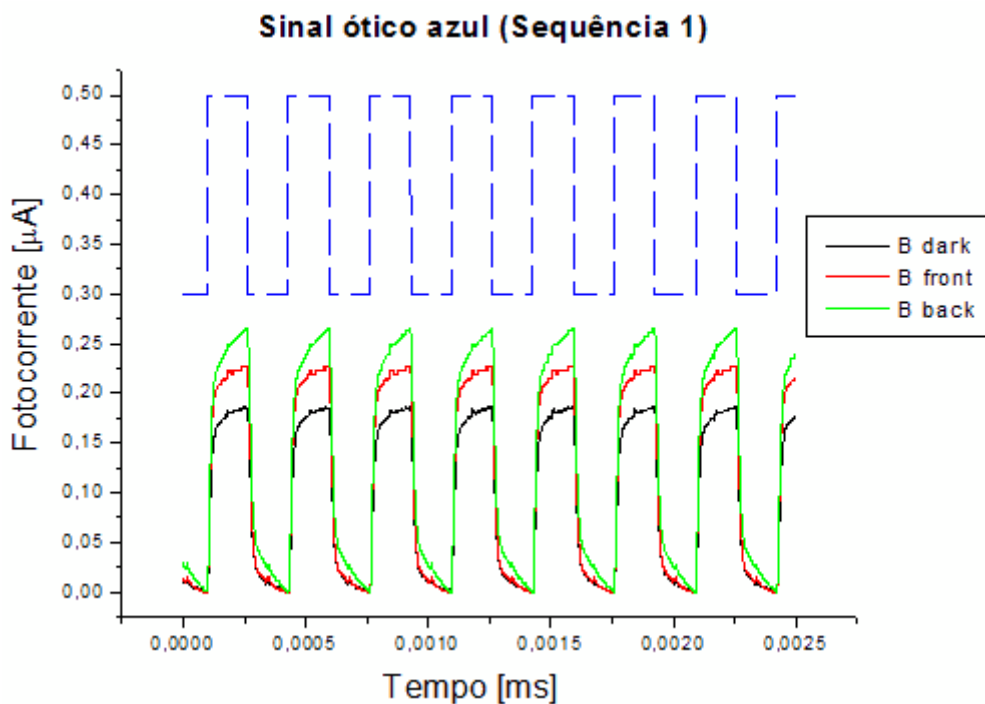


Figura 32 – Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

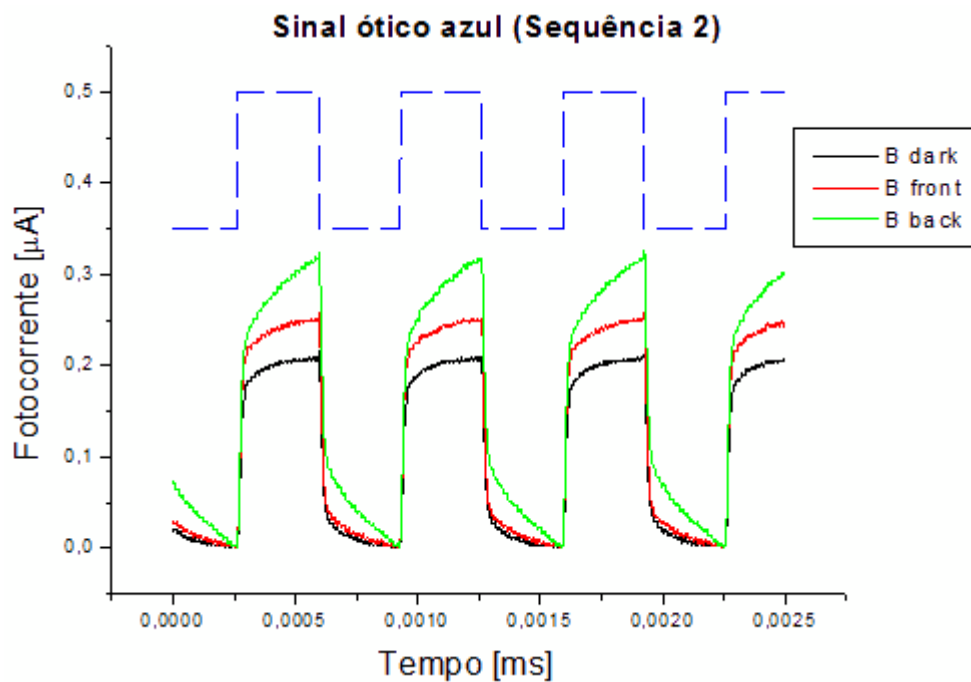


Figura 33 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

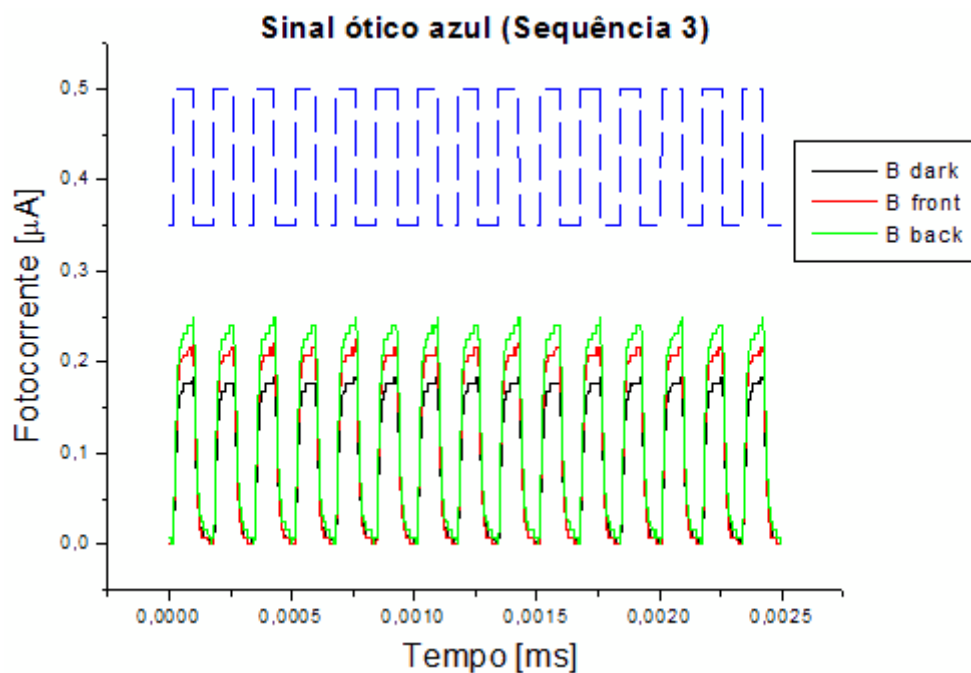


Figura 34 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

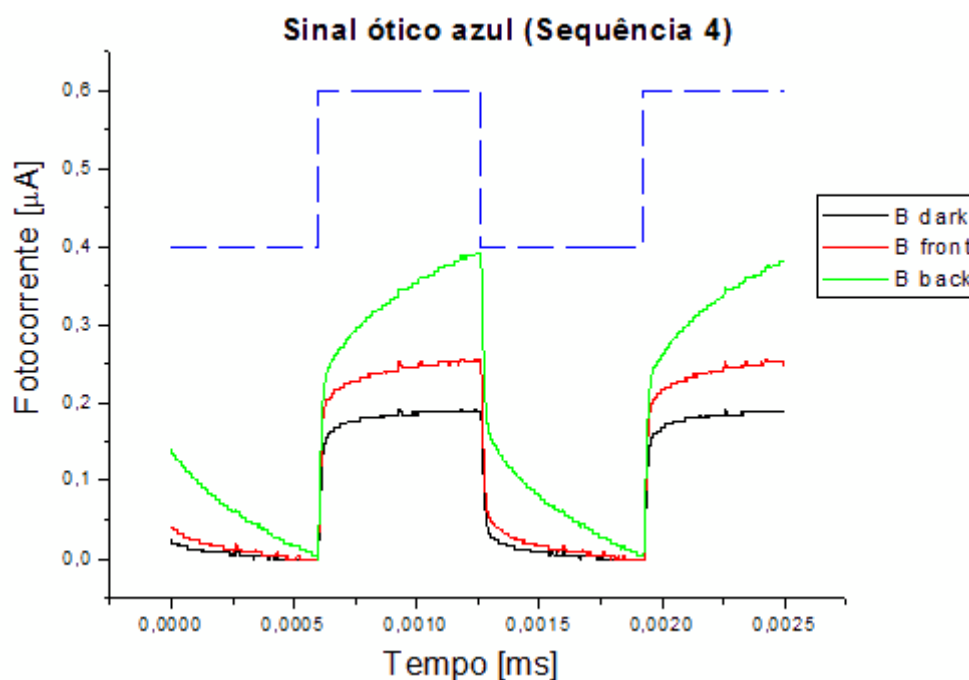


Figura 35 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

Através das medições realizadas com o canal de transmissão azul, verifica-se que a aplicação de radiação de fundo afeta a fotocorrente gerada pelo dispositivo de

forma diferente. Ao contrário do que se verifica para o canal vermelho e verde, no canal azul a presença de radiação de fundo amplifica o sinal ótico quer pelo lado frontal ou posterior. Como seria de esperar a fotocorrente gerada segue a forma temporal do sinal ótico transmitido, notando-se no entanto que o tempo de subida da fotocorrente, até atingir o máximo (B=ON) varia com a frequência do sinal ótico.

Para cada medição, ou seja, com aplicação de radiação de fundo frontal e posterior, e para cada sequência, calculou-se o ganho ótico da aplicação do fundo e os tempos de subida da fotocorrente. O ganho foi calculado tendo em conta o valor médio do sinal ótico com a aplicação de fundo e o valor médio do sinal ótico transmitido. O tempo de subida foi medido entre 10% a 90% do valor máximo de fotocorrente na transição OFF para ON. A Tabela 6 apresenta os ganhos óticos e tempo de subida atingidos para as situações descritas.

Tabela 6 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal azul.

Sequência	Frequência	Ganho		Tempo de subida (ns)		
		Radiação frontal	Radiação posterior	Escuro	Radiação frontal	Radiação posterior
4	F0	1.33	2.07	85.9	128.0	406.0
2	F1	1.21	1.52	62.9	71.9	174.0
1	F2	1.21	1.42	34.0	36.1	70.0
3	F3	1.17	1.34	21.8	23.8	27.8

Verifica-se que o ganho ótico obtido se relaciona com a frequência de modulação do sinal ótico transmitido. O aumento da frequência de modulação faz com que o ganho ótico, resultante da aplicação de luz de fundo pelo lado frontal, seja ligeiramente menor. Por sua vez, com a radiação de fundo a incidir no lado posterior, a variação da frequência de modulação produz alterações de ganho mais consideráveis. Pelo lado posterior, o aumento da frequência de modulação também faz com que o ganho ótico diminua. À semelhança dos canais vermelho e verde, o tempo de subida do canal azul também diminui com a frequência de modulação. Também para o canal azul

se verifica que a aplicação de radiação de fundo tem bastante influência no aumento do tempo de subida, sobretudo quando é pelo lado frontal e com mais expressão para a frequência mais baixa.

3.3.4. Análise do canal violeta (V)

De forma a analisar a influência da incidência da luz de fundo quando apenas o é transmitido o sinal ótico violeta, fizeram-se testes ao dispositivo utilizando apenas o canal violeta, de acordo com frequências definidas pelas sequências padrão. Fizeram-se medições de fotocorrente, para as quatro sequências, variando a incidência da radiação de fundo. As Figuras 36, 37, 38 e 39 ilustram o resultado das medições realizadas. No topo de cada gráfico mostra-se a sequência binária utilizada no canal de transmissão.

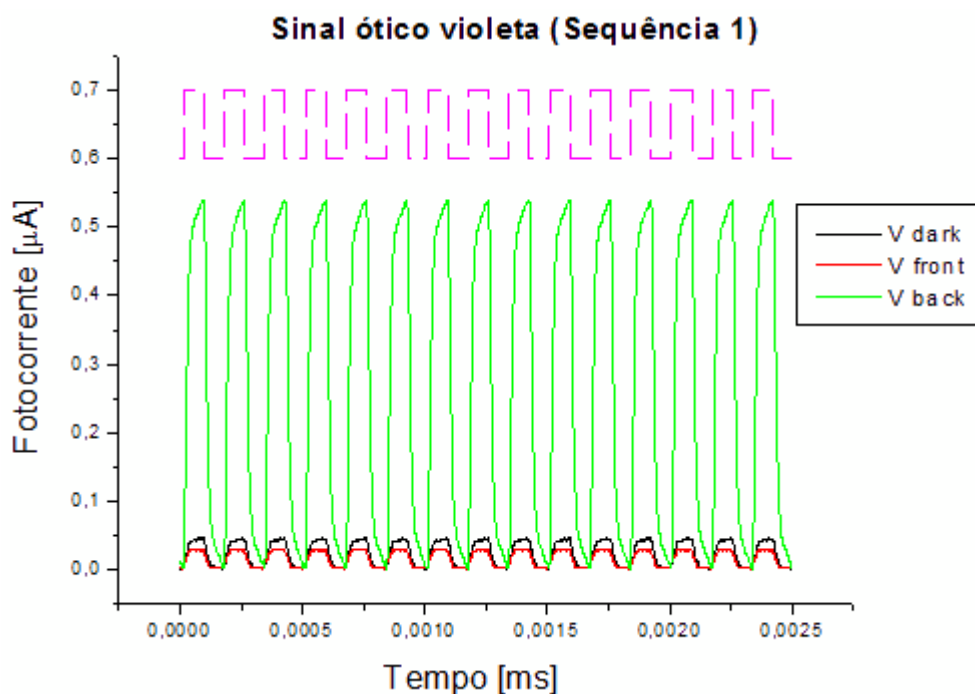


Figura 36 – Fotocorrente normalizada do canal violeta (400 nm) para a combinação binária da sequência 1, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

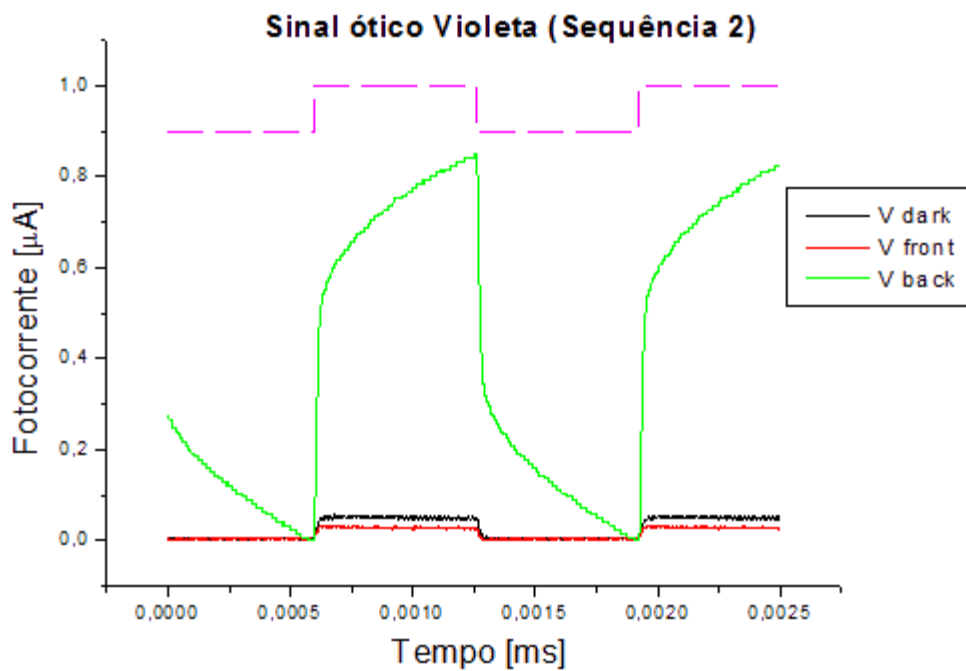


Figura 37 - Fotocorrente normalizada do canal violeta (400 nm) para a combinação binária da sequência 2, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

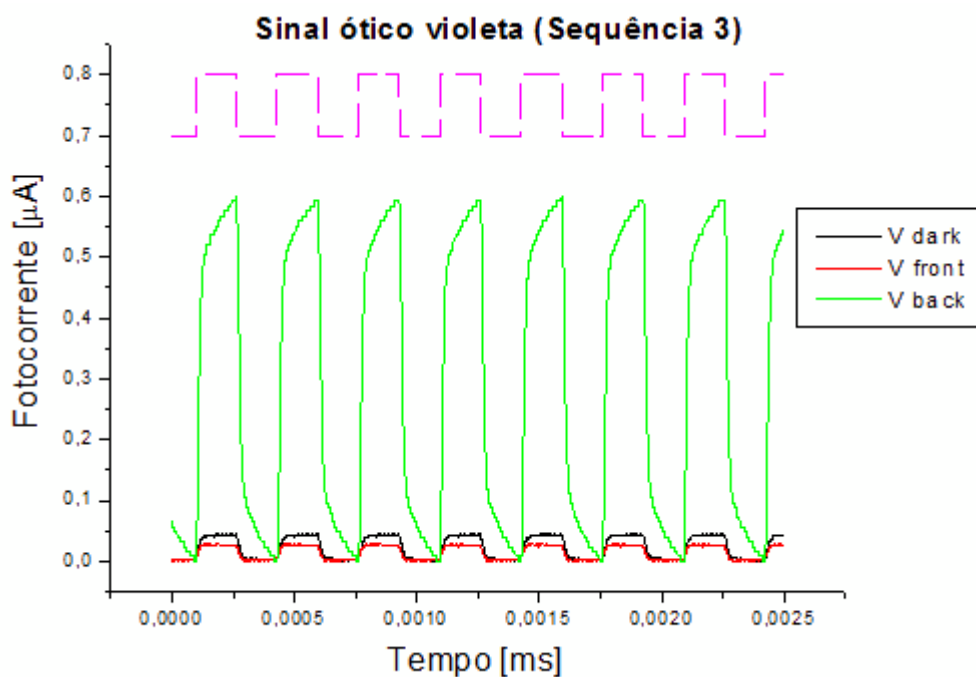


Figura 38 - Fotocorrente normalizada do canal azul (470 nm) para a combinação binária da sequência 3, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

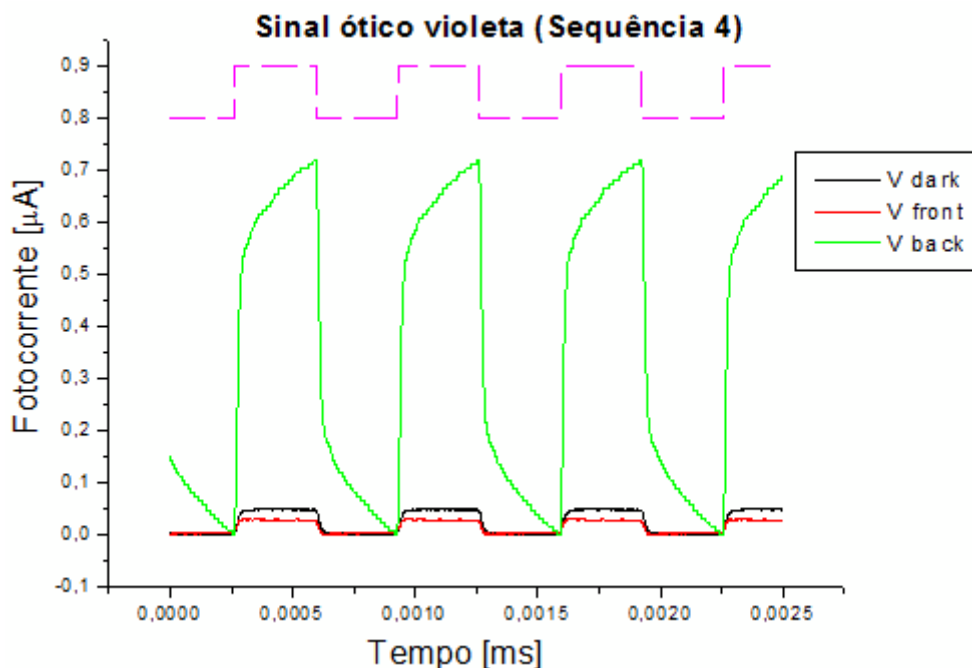


Figura 39 - Fotocorrente normalizada do canal violeta (400 nm) para a combinação binária da sequência 4, com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal e posterior.

Através das medições realizadas com o canal de transmissão violeta, verifica-se que a aplicação de radiação de fundo afeta a fotocorrente gerada pelo dispositivo de forma diferente. A aplicação da radiação de fundo pelo lado frontal atenua o sinal óptico, enquanto que a radiação de fundo pelo lado posterior amplifica o sinal óptico. Note-se ainda, que ao contrário dos restantes canais, o canal violeta na presença de radiação de fundo pelo lado frontal é o único que regista atenuação do sinal óptico.

Como seria de esperar a fotocorrente gerada segue a forma temporal do sinal óptico transmitido, notando-se no entanto que o tempo de subida da fotocorrente, até atingir o máximo ($V=ON$) varia com a frequência do sinal óptico.

Para cada medição, ou seja, com aplicação de radiação de fundo frontal e posterior, e para cada sequência, calculou-se o ganho óptico da aplicação do fundo e os tempos de subida da fotocorrente. O ganho foi calculado tendo em conta o valor médio do sinal óptico com a aplicação de fundo e o valor médio do sinal óptico transmitido. O tempo de subida foi medido entre 10% a 90% do valor máximo de fotocorrente na transição OFF para ON. A Tabela 7 apresenta os ganhos ópticos e tempo de subida atingidos para as situações descritas.

Tabela 7 – Ganho ótico e tempos de subida da aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior e frontal para o canal azul.

Sequência	Frequência	Ganho		Tempo de subida		
		Radiação frontal	Radiação posterior	Escuro	Radiação frontal	Radiação posterior
2	F0	0.56	15.44	22.9	18.9	375.0
4	F1	0.62	14.28	27.7	18.4	159.0
3	F2	0.62	12.91	29.6	20.5	19.9
1	F3	0.65	11.60	24.0	26.6	27.2

Verifica-se que o ganho ótico obtido se relaciona com a frequência de modulação do sinal ótico transmitido. O aumento da frequência de modulação faz com que o ganho ótico, resultante da aplicação de luz de fundo pelo lado frontal, seja ligeiramente superior. Por sua vez, com a radiação de fundo a incidir no lado posterior, a variação da frequência de modulação produz alterações de ganho mais consideráveis. Pelo lado posterior, o aumento da frequência de modulação faz com o ganho decresça substancialmente.

3.3.5. Análise dos ganhos óticos

Tendo em vista a análise do efeito que a aplicação de radiação de fundo tem sobre a fotocorrente de saída do dispositivo testaram-se os canais RGBV de forma individual, com a presença de radiação de fundo e na sua ausência. Foram feitas medidas de fotocorrente para ambas as situações e calcularam-se os respectivos ganhos óticos.

O gráfico da Figura 40 ilustra a variação do ganho óptico sobre iluminação frontal com a frequência de modulação para cada canal de transmissão.

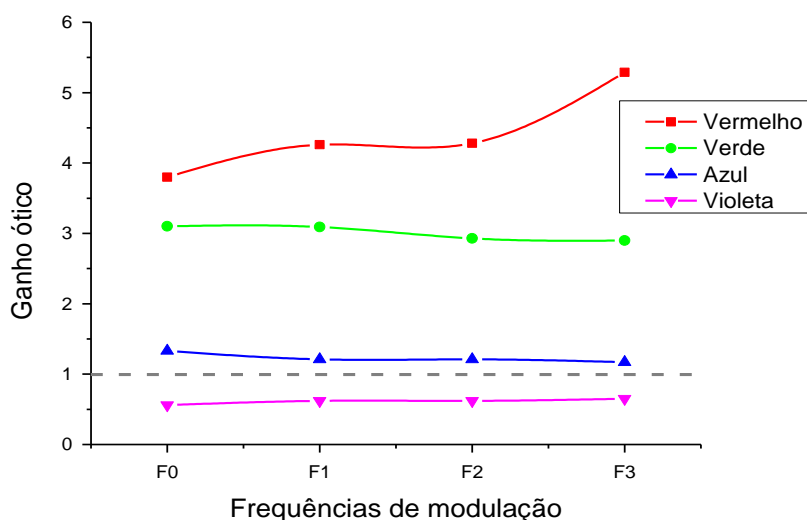


Figura 40 – Ganho óptico resultante da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal.

A aplicação de radiação de fundo pelo lado frontal amplifica consideravelmente os comprimentos de onda longos, no espectro do visível, como o vermelho (626 nm) e o verde (525 nm). Por sua vez, os comprimentos de onda curtos como o azul (470 nm) e o violeta (400 nm) são pouco amplificados ou até mesmo atenuados, no caso do violeta. Verifica-se que alteração da frequência de modulação tem mais expressão no canal vermelho. Na Figura 41 ilustra-se a variação do ganho óptico sobre iluminação posterior com a frequência de modulação para cada canal de transmissão.

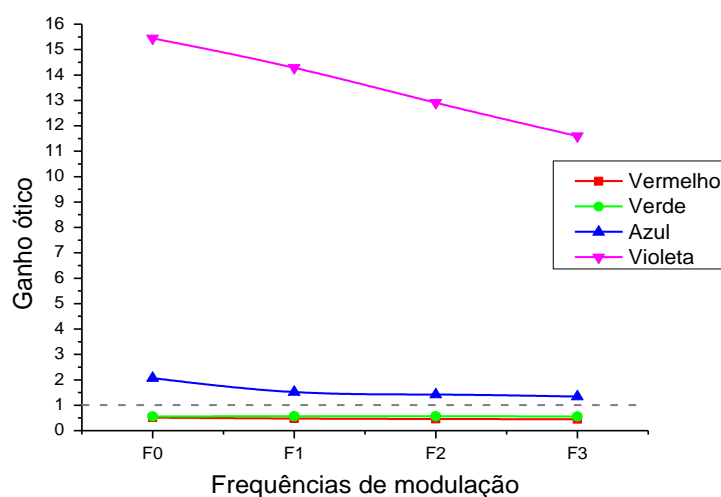


Figura 41 - Ganho óptico resultante da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior.

A aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior tem o comportamento oposto ao observado sobre fundo frontal. Ou seja, há uma forte amplificação dos comprimentos de onda curtos, sobretudo do canal violeta. Verifica-se também que a frequência de modulação tem bastante impacto no ganho ótico do canal violeta. O canal azul é ligeiramente amplificado e o canal vermelho e verde são atenuados com razões muito próximas. Apesar do canal vermelho ser ligeiramente mais atenuado que o verde, ainda assim apresenta valores de fotocorrente superiores. O aumento da frequência de modulação diminui bastante o ganho ótico.

3.3.6 Análise dos tempos de subida

Tendo em vista a análise do efeito que a aplicação de radiação de fundo tem sobre o tempo de subida da fotocorrente de saída do dispositivo testaram-se os canais RGBV de forma individual, com a presença de radiação de fundo e na sua ausência. O gráfico da Figura 42 ilustra a variação do tempo de subida para cada canal sobre a ausência ou presença de radiação de fundo.

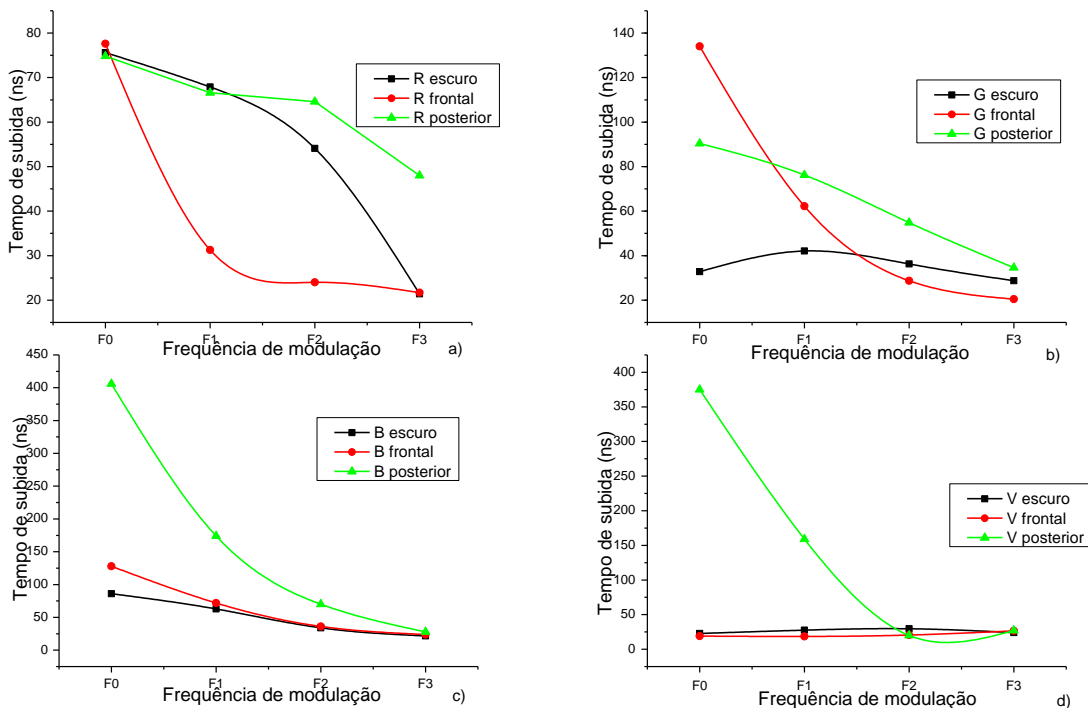


Figura 42 – Tempo de subida de cada canal sobre a ausência e presença de radiação de fundo: a) canal vermelho; b) canal verde; c) canal azul e d) canal violeta.

Tal como se referiu na análise individual dos canais verifica-se que o tempo de subida nos quatro canais diminui com o aumento da frequência de modulação. Constata-

se ainda que o tempo de subida tende a decrescer mais abruptamente com a diminuição do comprimento de onda do canal. Na frequência de modulação mais elevada ambos os canais têm aproximadamente o mesmo tempo de subida, a rondar os 20 ns a 30 ns. Contudo, nas frequências de modulação mais lenta verifica-se que os canais com comprimento de onda mais baixo apresentam maior duração do tempo de subida.

A Figura 43 mostra a comparação dos tempos de subida de cada canal sem a aplicação de radiação de fundo e sobre a aplicação de radiação de fundo pelos dois lados.

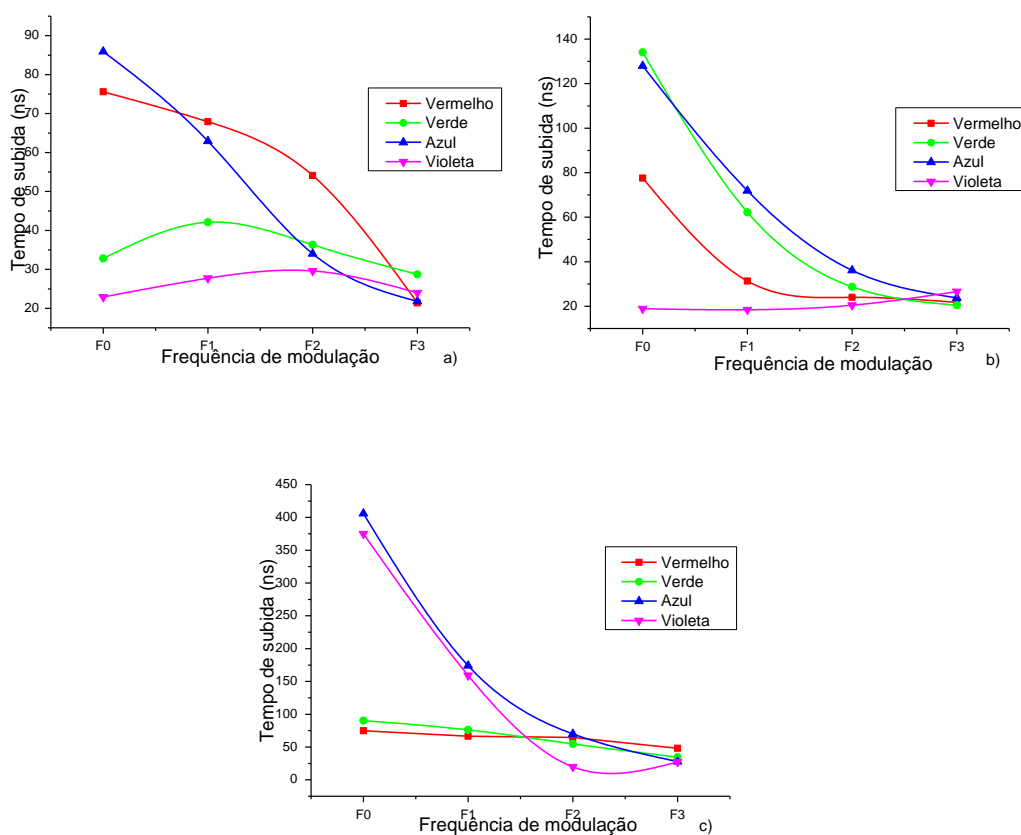


Figura 43 – Tempo de subida de cada canal: a) no escuro; b) sobre radiação frontal e c) sobre radiação posterior.

Pela aplicação de radiação de fundo verifica-se que quando é pelo lado frontal se regista um aumento no tempo de subida do canal vermelho e verde, por sua vez quando é pelo lado posterior verifica-se que o tempo de subida aumenta nos canais azul e violeta. Independentemente do lado por onde é aplicado a radiação de fundo, verifica-se

que na frequência mais baixa o tempo de subida tende a aumentar bastante com a diminuição do comprimento de onda do canal.

3.3.7 Conclusão

Os resultados demonstram, que a aplicação de radiação de fundo de cor violeta influencia de forma distinta os diferentes canais individuais. Para além da dependência com o comprimento de onda do sinal ótico do canal de entrada evidenciou-se também a influência da frequência de modulação.

Conclui-se assim que, a radiação de fundo violeta é absorvida no fotodíodo frontal, aumentando o campo elétrico no fotodíodo posterior, onde os fotões de cor vermelha e parte dos verdes são absorvidos. Sobre radiação de fundo posterior, o campo elétrico aumenta no fotodíodo frontal onde os fotões de cor violeta e parte dos azuis são absorvidos. Assim, alternando entre radiação frontal e posterior a função fotónica é alterada, permitindo filtrar o canal vermelho ou o canal violeta, respetivamente.

Relativamente ao tempo de subida da fotocorrente verifica-se apenas para baixas frequências de modulação existe influência do comprimento de onda do canal ou da aplicação de radiação de fundo. Sendo que a influência tende a diminuir com o aumento da frequência de modulação, atingindo valores muito próximos entre os diferentes canais, com ou sem radiação de fundo, na frequência de modulação mais alta. Assim, as frequências de modulação baixas podem prejudicar a correta deteção da sequência binária transmitida.

3.4. Referências bibliográficas

- [1] Bischoff, Dominik, “Wavelength multiplexing: WDM and DWDM systems”, 2009;
- [2] Andrade, Miguel, “WDM – Multiplexagem por divisão de comprimento de onda”, FEUP, 2001;
- [3] Figueiredo, José Maria Longras, “Dispositivos ópticos integrados para multiplexagem de comprimento de onda”, FEUP, 1994;
- [4] Keiser, Gerd, “A review of WDM technology and applications”, GTE Systems & Technology, 1998;

- [5] Louro, P., Vieira, M., Vieira, M. A., Fernandes, M., Costa, J., “Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications”, *Advances in Photodiodes*, 2010;
- [6] Ferraz, Hugo, “Fotodetector e dispositivo WDM integrados”, ISEL, 2012.
- [7] A. M. Dias, “Projeto de Diplomação: Análise de projetos de redes metropolitanas WDM”, Porto Alegre, 2009;
- [8] T. Miki and H. Ishio, “Viabilities of Wavelength-Division-Multiplexing Transmission System over an optical fiber cable”, *IEEE Transactions on Communications*, 1978;
- [9] T. A. Silva, “Tese de dissertação de Mestrado em Implementação de WDM com dispositivos semicondutores”, ISEL, 2011;
- [10] N. Massa, “Fiber Optic Telecommunication”, University of Connecticut, Massachusetts, 2000;
- [11] V. A. Manuel, M. Vieira, J. Costa, P. Louro, M. Fernandes, A. Fantoni, “Double Pin Photodiodes with two optical gate connections for light triggering: A capacitive two-phototransistor model”, in *Sensors & Transducers Journal*, 2011;
- [12] M. Haupt and U. Fischer-Hirschert, “WDM Key Element in the visible spectrum for standard SI-POF”, *Fachhochschule Schmalkalden*, 2010;
- [13] M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, A. Fantoni, V. Silva, “SiC multilayer add/drop filter for optical interconnects”, 2013;
- [14] J. Wilson, J. Hawkes, “Optoelectronics – An introduction”, Prentice Hall, London, 1998;
- [15] C. Petit, M. Blaser, “Photodiodes with Integrated Optical Fiber for Optical Network Applications”, *Workshop on Optical Components for broadband Communication, Proc. of SPIE Vol.6350, 63500I*, 2006;
- [16] Hsiung-Kuang Tsai, Si-Chen Lee, “Amorphous SiC/Si Three-color detector”, *Applied Physics Letters Volume 52*, 2009;
- [17] M. Vieira, “Three Transducers for One Photodetector: essays for optical communications”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.

Capítulo 4 – Análise WDM

No quarto capítulo é analisado a aplicação do dispositivo semiconductor, nas condições de teste definida nos capítulos anteriores, como dispositivo WDM. É analisado a influência da radiação de fundo com diferentes combinações dos quatro canais (vermelho, verde, azul e violeta). Será também testado o dispositivo na filtragem de canais.

4.1. Análise dos canais combinados

Nas mesmas condições em que foi realizada a análise aos canais individuais, foi também efetuada a análise combinando os vários canais. A combinação simultânea de canais tem por base os mesmos quatro canais RGBV, com objetivo de se analisar as 16 combinações possíveis para diferentes estados de excitação ótica. Assim, fizeram-se medidas da fotocorrente gerada pelo dispositivo quando os canais são combinados dois a dois, três a três e quando os quatro são utilizados em simultâneo. Mais uma vez as medidas de fotocorrente foram realizadas quando o dispositivo não se encontra sujeito a radiação de fundo e quando se encontra sujeito a radiação de fundo violeta pelos lados frontal e posterior. A tensão de polarização aplicada à estrutura semicondutora foi constante e com um valor de -8 V, sendo o estudo realizado com base nas quatro sequências padrão.

4.1.1 Canais RG

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais RG, utilizaram-se apenas os LEDs vermelho e verde nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 44 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências.

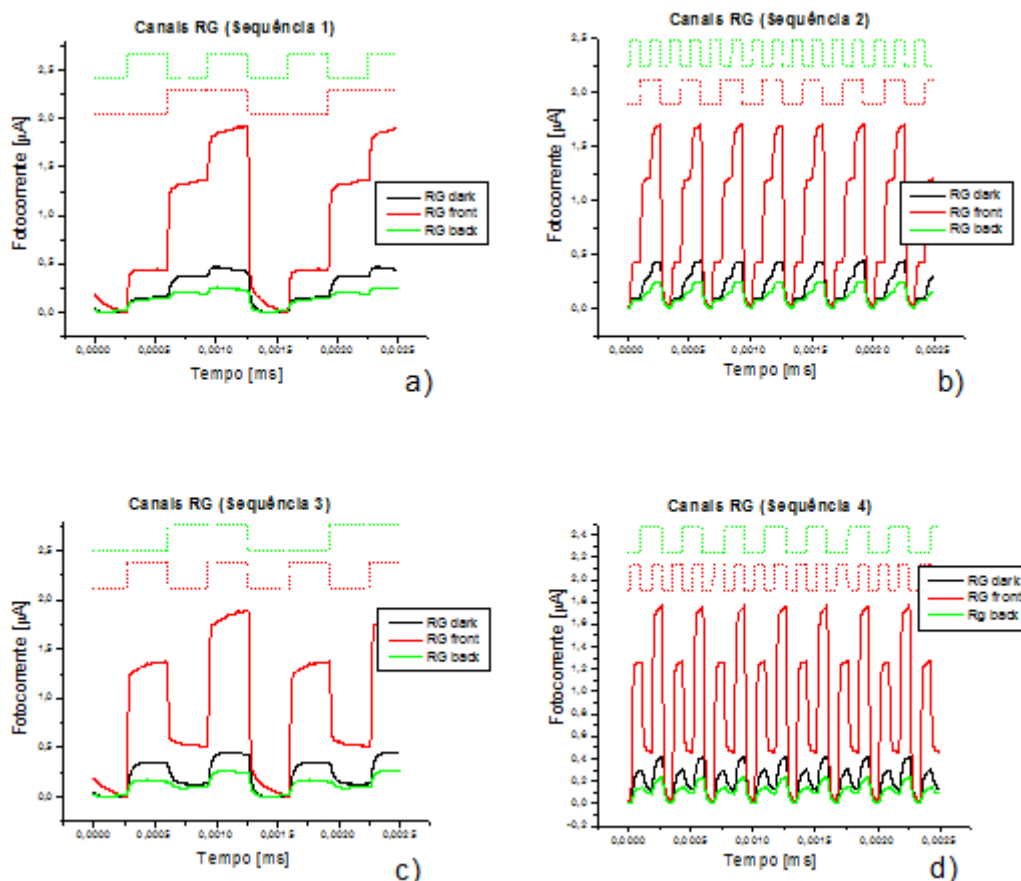


Figura 44 – Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RG com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, existem quatro níveis de fotocorrente, correspondentes às quatro (2^2) combinações ON/OFF possíveis entre os dois canais. Não deixa de ser evidente, no entanto, que a amplitude de fotocorrente é bastante diferente nas três medidas, quando o dispositivo não está sobre radiação de fundo ou quando está sobre radiação de fundo frontal e posterior. Verifica-se que a fotocorrente resultante pela aplicação da radiação de fundo frontal é a que tem maior amplitude e onde os quatro níveis estão mais definidos. Por sua vez, a fotocorrente resultante da aplicação da radiação de fundo pelo lado posterior é a que tem menor amplitude. Este resultado é o esperado, de acordo, com o resultado da análise aos canais individuais, em que se verificou forte amplificação da fotocorrente dos sinais óticos vermelho e verde sobre radiação de fundo pelo lado frontal. Verificou-se também que no caso da radiação de fundo pelo lado posterior a fotocorrente é atenuada.

Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos dois canais (RG=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos dois canais (RG=OFF). Nos dois patamares intermédios, o de maior valor de fotocorrente corresponde apenas à presença do canal vermelho (R=ON e G = OFF) e o de menor valor de fotocorrente à presença apenas do canal verde (R=OFF e G=ON). Este resultado confirma o resultado das medidas individuais, onde se verificou que o ganho do canal vermelho é superior ao do canal verde, sob as mesmas condições de radiação de fundo. Apesar do canal vermelho ser ligeiramente mais atenuado que o verde pela radiação de fundo pelo lado posterior o seu valor de fotocorrente é superior.

4.1.2 Canais GB

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais GB, utilizaram-se apenas os LEDs verde e azul nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 45 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais G e B, definida por cada sequência.

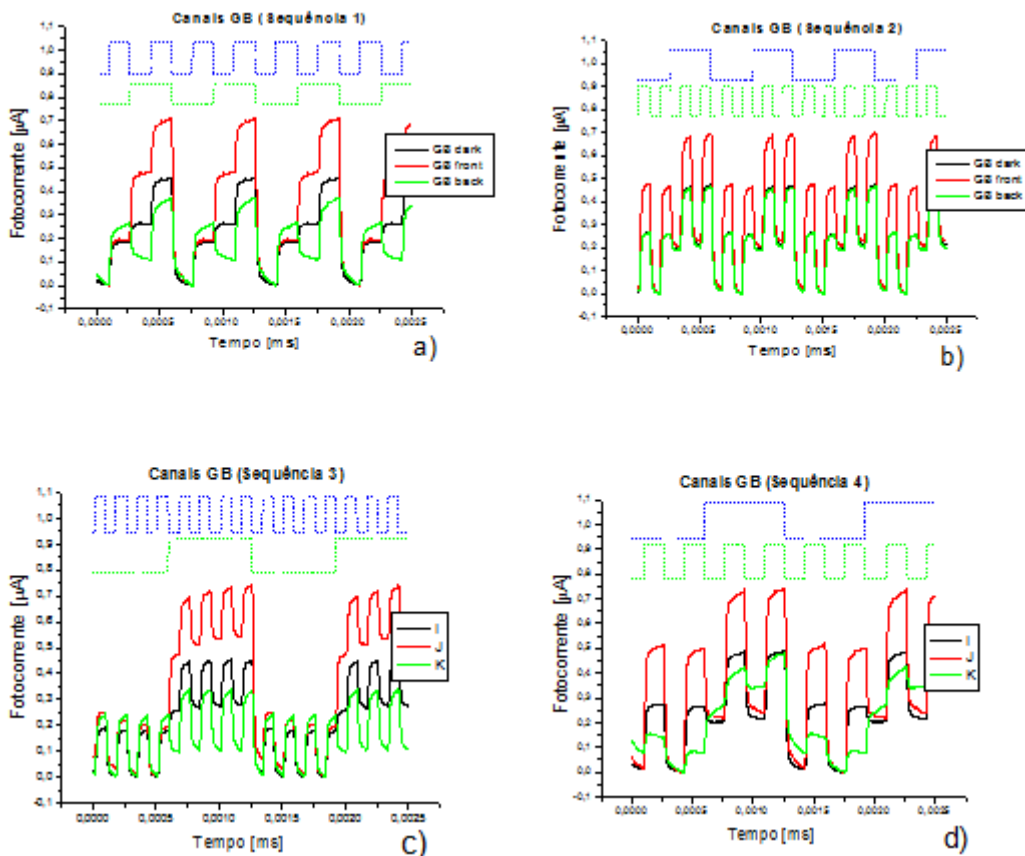


Figura 45 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais GB com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se novamente que, para as quatro sequências, existem quatro níveis de fotocorrente, correspondentes às quatro (2^2) combinações ON/OFF possíveis entre os dois canais. Não deixa de ser evidente, no entanto, que a amplitude de fotocorrente é bastante diferente nas três medidas, quando o dispositivo não está sobre radiação de fundo ou quando está sobre radiação de fundo frontal e posterior. Verifica-se que a fotocorrente resultante pela aplicação da radiação de fundo frontal é a que tem maior amplitude e onde os quatro níveis estão mais definidos. Ao contrário do que se verifica na combinação RG, a fotocorrente resultante da aplicação da radiação de fundo pelo lado posterior nem sempre é a que tem menor valor uma vez que o canal azul é amplificado nesta situação. Este resultado está de acordo, com o resultado da análise aos canais individuais. Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos dois canais (GB=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos dois canais (GB=OFF). Nos dois patamares intermédios, a influência da radiação de fundo é bastante considerável, porque a radiação de fundo pelo lado posterior atenua o sinal verde mas amplifica o azul e pelo lado frontal ambos são amplificados, apesar do canal verde ter um ganho maior.

Assim, sobre radiação frontal o patamar intermédio de maior amplitude corresponde à presença apenas do verde (G=ON e B=OFF) e o de menor amplitude à presença apenas do azul (G=OFF e B=ON). Quando a radiação provém do lado posterior, o resultado inverte-se, o de maior amplitude corresponde ao canal azul apenas (G=OFF e B=ON) e o de menor amplitude ao verde apenas (G=ON e B=OFF), porque o canal azul é amplificado pela radiação posterior e o sinal verde é atenuado.

4.1.3 Canais RV

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais RV, utilizaram-se apenas os LEDs vermelho e violeta nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 46 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências.

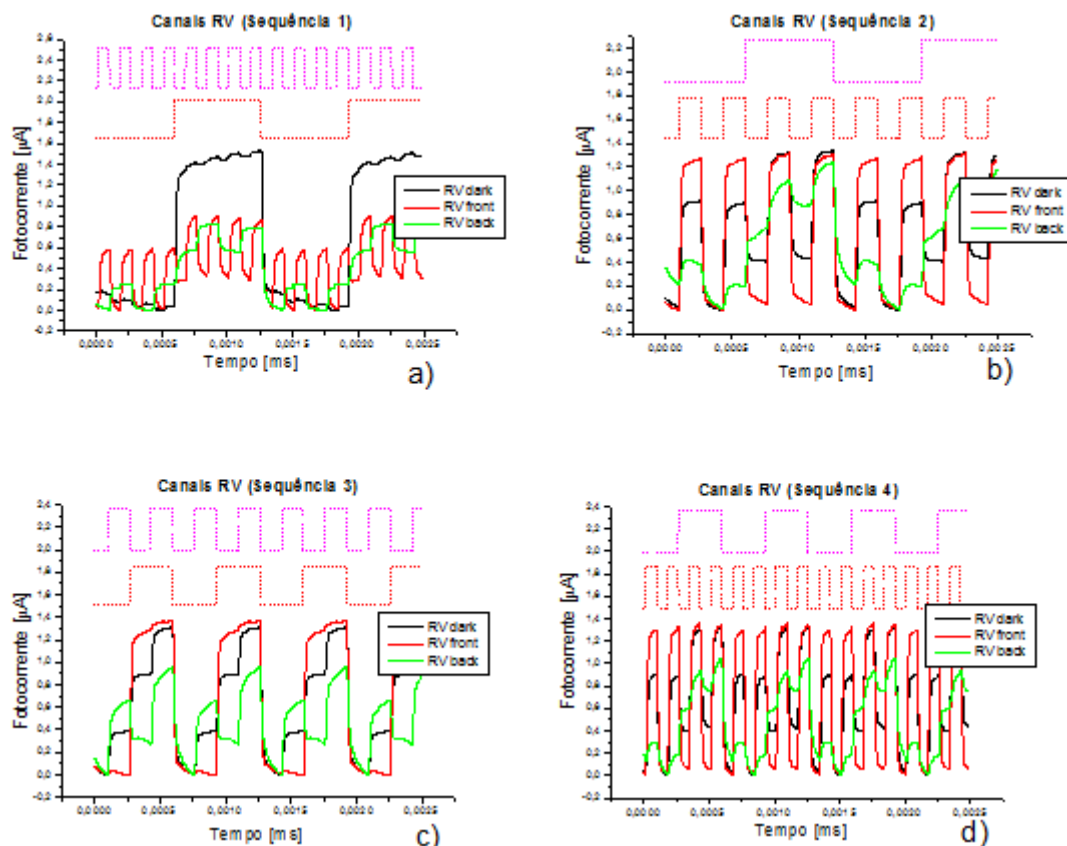


Figura 46 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, existem quatro níveis de fotocorrente, correspondentes às quatro (2^2) combinações ON/OFF possíveis entre os dois canais. Não deixa de ser evidente, no entanto, que a amplitude de fotocorrente é bastante diferente nas três medidas, quando o dispositivo não está sobre radiação de fundo ou quando está sobre radiação de fundo frontal e posterior.

A presença do canal violeta faz com os níveis sejam quase imperceptíveis com a aplicação de radiação de fundo pelo lado frontal. Os níveis estão mais definidos quando a aplicação da radiação de fundo se faz pelo lado posterior. Este resultado é o esperado, de acordo, com o resultado da análise aos canais individuais.

Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos dois canais (RV=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos dois canais (RV=OFF). Nos dois patamares intermédios, a influência da radiação de fundo é bastante considerável, porque a radiação de fundo pelo lado posterior atenua o sinal

vermelho mas amplifica bastante o violeta e pelo lado frontal amplifica o vermelho e atenua o violeta.

Assim, sobre radiação frontal o patamar intermédio de maior amplitude corresponde à presença apenas do vermelho (R=ON e V=OFF), apesar da amplitude de fotocorrente ser bastante próxima de quando ambos os canais estão ligados. O patamar intermédio de menor amplitude corresponde apenas à presença do violeta (R=OFF e V=ON), que neste caso é bastante próximo do nível de fotocorrente quando ambos os canais estão desligados. Assim, com radiação de fundo pelo lado frontal a presença do canal violeta é quase desprezável. Quando a radiação é usada no lado posterior, o resultado inverte-se, fruto da forte amplificação do canal violeta. O patamar intermédio de maior amplitude corresponde apenas ao canal violeta (R=OFF e V=ON) e o de menor amplitude ao vermelho apenas (R=ON e V=OFF).

4.1.4 Canais RB

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais RB, utilizaram-se apenas os LEDs vermelho e azul nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 46 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais R e B, definida por cada sequência.

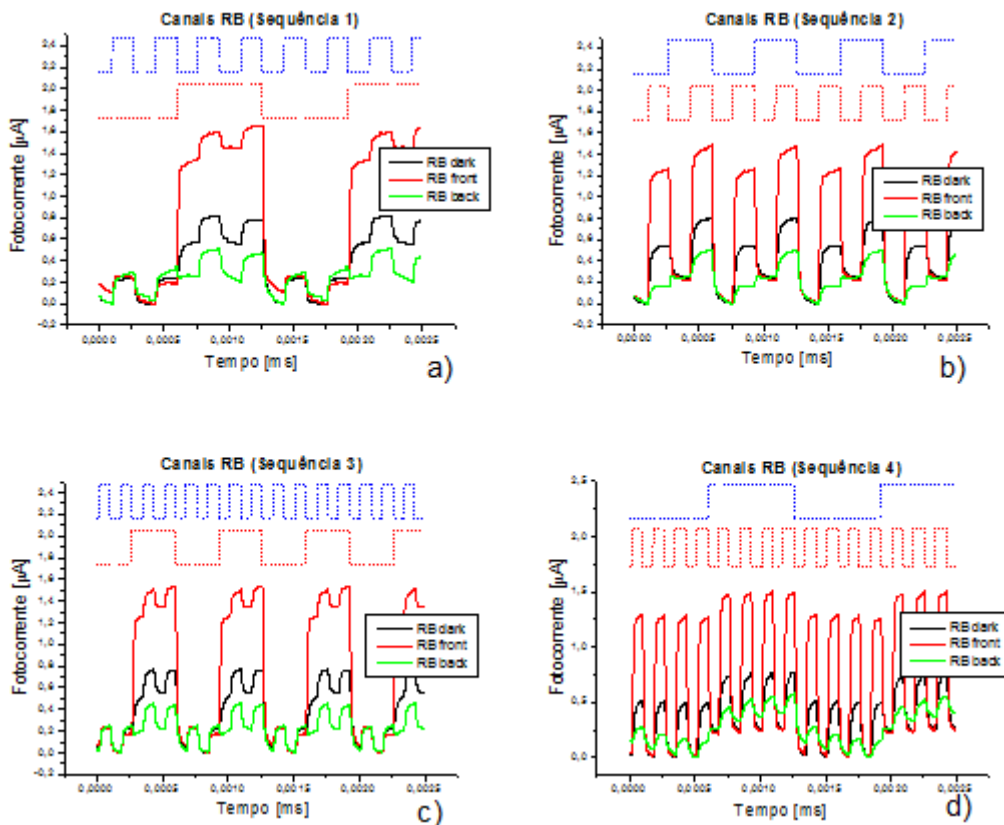


Figura 47 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RB com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, existem quatro níveis de fotocorrente, correspondentes às quatro (2^2) combinações ON/OFF possíveis entre os dois canais. Não deixa de ser evidente, no entanto, que a amplitude de fotocorrente é bastante diferente nas três medidas, quando o dispositivo não está sobre radiação de fundo ou quando está sobre radiação de fundo frontal e posterior.

A caracterização dos ganhos de ambos os canais permite que em cada sequência os quatro níveis de fotocorrente estejam bem definidos, quer pelo lado frontal quer pelo lado posterior. Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos dois canais (RB=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos dois canais (RB=OFF). Nos dois patamares intermédios, a influência da radiação de fundo é considerável, porque a radiação de fundo pelo lado frontal amplifica ambos os sinais mas a razão do ganho do vermelho é bastante superior ao azul, pelo lado posterior o canal azul é amplificado e o vermelho atenuado.

Assim, sobre radiação frontal o patamar intermédio de maior amplitude corresponde à presença do vermelho apenas (R=ON e B=OFF) e o patamar intermédio de menor amplitude corresponde à presença do azul apenas (R=OFF e B=ON), que neste caso é bastante próximo do nível de fotocorrente de quando ambos os canais estão desligados. Quando a radiação é do lado posterior, o resultado inverte-se, devido à atenuação do canal vermelho. O patamar intermédio de maior amplitude corresponde ao canal azul apenas (R=OFF e B=ON) e o de menor amplitude ao vermelho apenas (R=ON e B=OFF).

4.1.5 Canais GV

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais GV, utilizaram-se apenas os LEDs verde e violeta nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 48 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais G e V, definida por cada sequência.

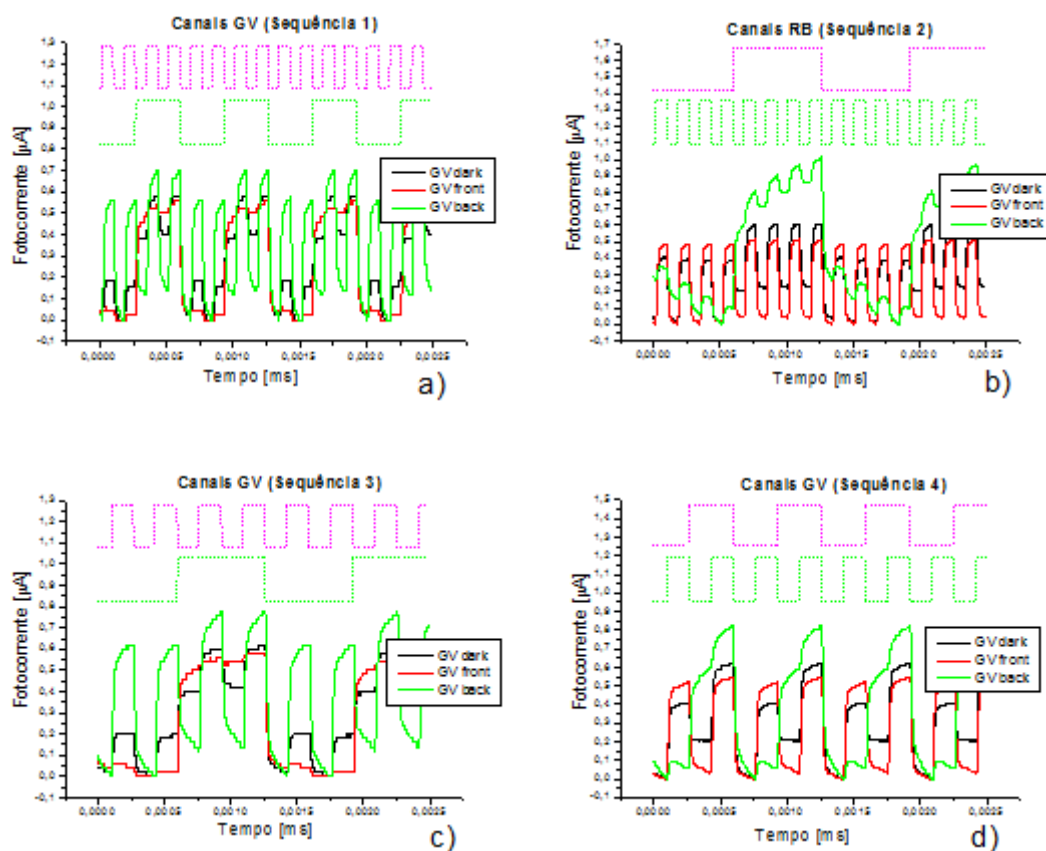


Figura 48 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais GV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, existem quatro níveis de fotocorrente, correspondentes às quatro (2^2) combinações ON/OFF possíveis entre os dois canais. Não deixa de ser evidente, no entanto, que a amplitude de fotocorrente é bastante diferente nas três medidas, quando o dispositivo não está sobre radiação de fundo ou quando está sobre radiação de fundo frontal e posterior.

O resultado das medidas para a combinação GV é bastante idêntico ao da combinação RV, sendo que neste caso o valor de fotocorrente sob a radiação frontal não é tão elevado

Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos dois canais (GV=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos dois canais (GV=OFF). Nos dois patamares intermédios, a influência da radiação de fundo é considerável tal como acontece na combinação RV, porque a radiação de fundo pelo lado frontal amplifica o canal verde e atenua o violeta, pelo lado posterior o canal violeta é amplificado e o verde é atenuado.

Assim, sobre radiação frontal o patamar intermédio de maior amplitude corresponde à presença do verde apenas (G=ON e V=OFF) e o patamar intermédio de menor amplitude corresponde à presença do violeta apenas (G=OFF e V=ON). Quando a radiação é do lado posterior, o resultado inverte-se, devido à forte amplificação do canal violeta. O patamar intermédio de maior amplitude corresponde ao canal violeta apenas (G=OFF e V=ON) e o de menor amplitude ao verde apenas (G=ON e V=OFF).

4.1.6 Canais BV

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais BV, utilizaram-se apenas os LEDs azul e violeta nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 49 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências.

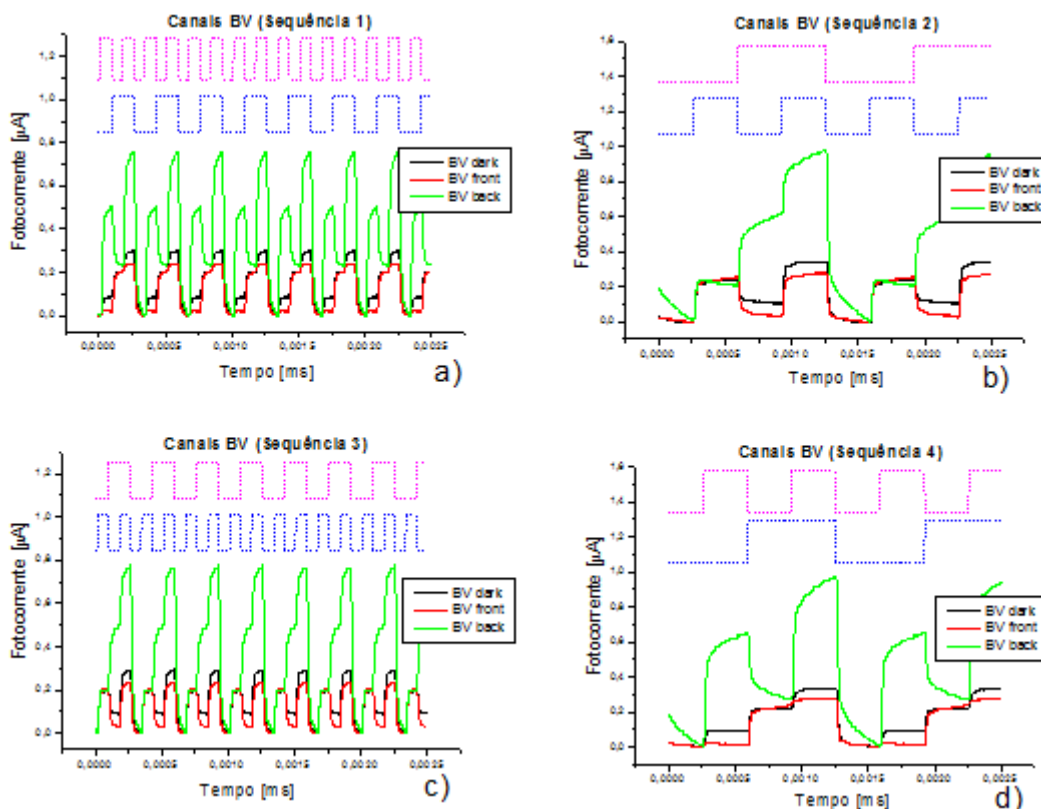


Figura 49 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais BV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, existem quatro níveis de fotocorrente, correspondentes às quatro (2^2) combinações ON/OFF possíveis entre os dois canais. Não deixa de ser notório, no entanto, que a amplitude de fotocorrente é bastante diferente nas três medidas, quando o dispositivo não está sobre radiação de fundo ou quando está sobre radiação de fundo frontal e posterior.

Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos dois canais (BV=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos dois canais (BV=OFF). A combinação destes dois canais permite que sobre radiação de fundo pelo lado posterior os patamares intermédios estejam bem definidos porque apesar de ambos os canais serem amplificadas a razão de ganho do canal violeta é muito superior ao do azul. Assim, sobre radiação posterior o patamar intermédio de maior amplitude corresponde à presença do violeta apenas (B=OFF e V=ON) e o patamar intermédio de menor amplitude corresponde à presença do azul apenas (B=ON e V=OFF). Quando a radiação é do lado frontal, o resultado inverte-se, devido à

amplificação do canal azul e atenuação do violeta. O patamar intermédio de maior amplitude corresponde à presença apenas do canal azul (B=ON e V=OFF) e o de menor amplitude ao violeta apenas (B=OFF e V=ON). Note-se que para esta combinação de canais, a fotocorrente gerada pelo dispositivo sobre radiação de fundo pelo lado posterior é em praticamente todas as combinações ON/OFF superior à fotocorrente gerada pela radiação de fundo pelo lado frontal, o que nas restantes combinações de canais nunca verifica. Este resultado mais uma vez confirma a apetência do dispositivo para amplificar os sinais óticos na região do violeta e azul quando está sobre radiação de fundo pelo lado posterior.

4.1.7 Canais RGB

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGB, utilizaram-se apenas os LEDs vermelho, verde e azul nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 50 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais R, G e B, definida por cada sequência.

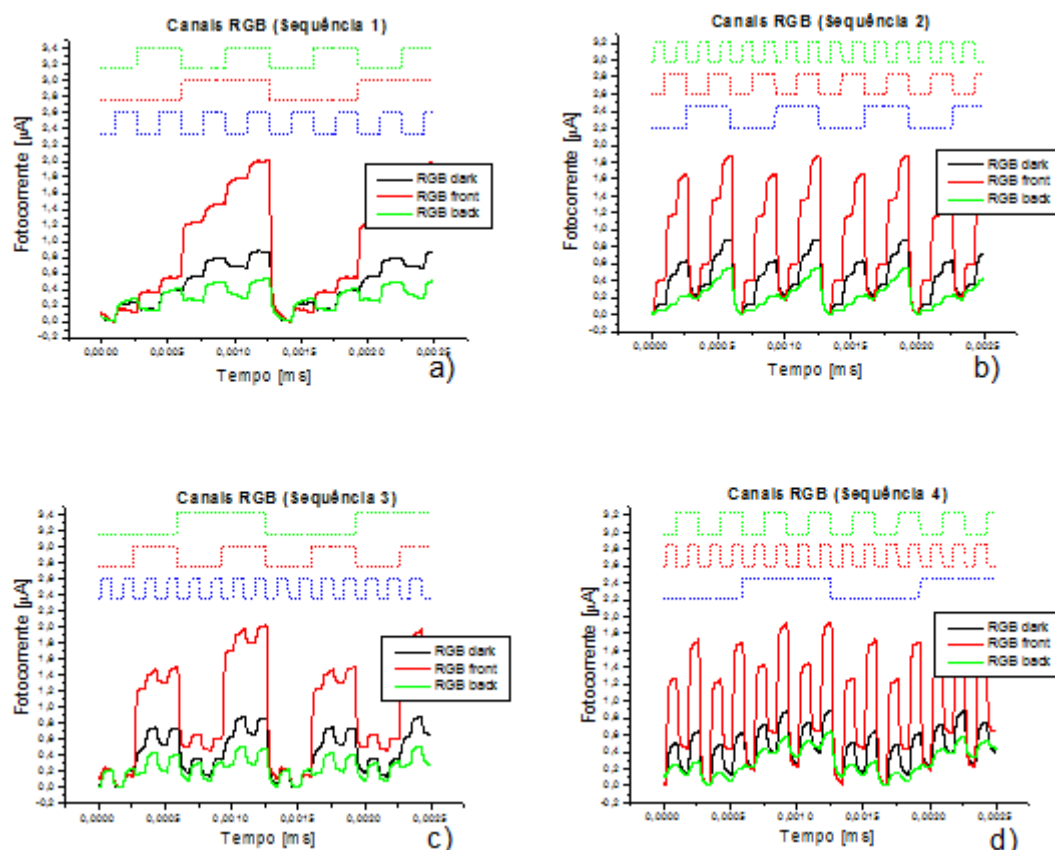


Figura 50 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGB com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, ao contrário do que resultava das combinações anteriores de apenas dois canais existem agora oito níveis de fotocorrente, correspondentes às oito (2^3) combinações ON/OFF possíveis entre os três canais. Tal como se viu também nos resultados anteriores, a aplicação da radiação de fundo produz efeitos diferentes na fotocorrente, quando pelo lado frontal ou posterior. Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos três canais (RGB=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos três canais (RGB=OFF).

Sobre radiação de fundo pelo lado frontal é possível agrupar os diferentes níveis de fotocorrente em duas classes, devido à forte amplificação do vermelho, Figura 51. Assim, os quatro níveis (2^2) com maior fotocorrente correspondem à presença do canal vermelho (R=ON) e os quatro níveis com menor fotocorrente correspondem à sua ausência (R=OFF). Como sobre radiação frontal o canal verde também é amplificado,

então os dois níveis (2^1) com maior fotocorrente correspondem à presença do verde (G=ON) e os dois níveis com menor fotocorrente à sua ausência (G=OFF). Por sua vez para cada grupo de duas entradas existem também duas subclasses, a primeira, onde o nível de maior fotocorrente corresponde à presença do azul (B=ON) e a segunda, onde nível de menor fotocorrente corresponde à ausência do azul (B=OFF).

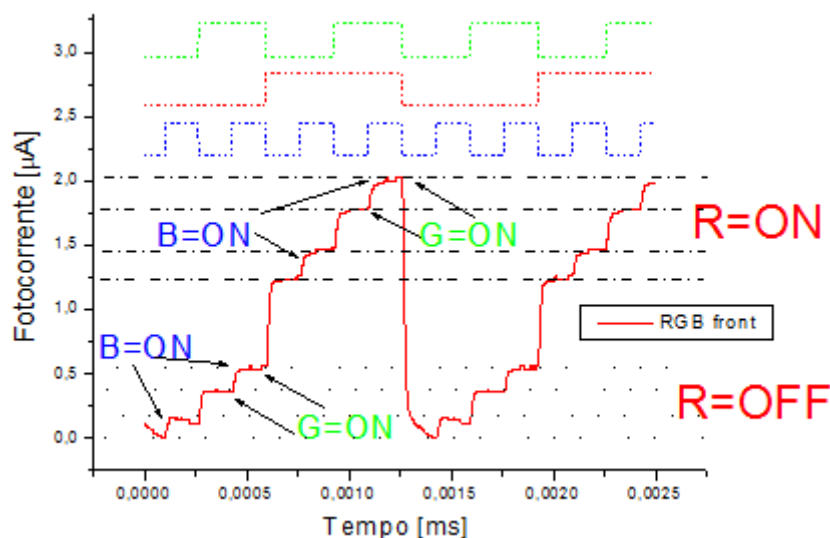


Figura 51 – Decodificação dos canais na combinação RGB sobre radiação de fundo frontal.

Sob a presença de radiação de fundo pelo lado posterior, apesar dos canais serem atenuados à exceção do azul, que é ligeiramente amplificado, continuam a existir 8 níveis de fotocorrente muito próximos. Assim, agrupando os níveis em dois grupos de quatro níveis, Figura 52, em que um grupo contém os quatro níveis de maior fotocorrente e outro grupo os quatro níveis de menor fotocorrente, é possível determinar a presença do canal azul (B=ON) no grupo dos quatro níveis de maior fotocorrente. Em cada grupo, os dois subníveis de maior fotocorrente determinam a presença do canal vermelho (R=ON) e os dois de menor fotocorrente à sua ausência (R=OFF). Por fim, o nível de maior fotocorrente em cada grupo corresponde à presença do verde (G=ON).

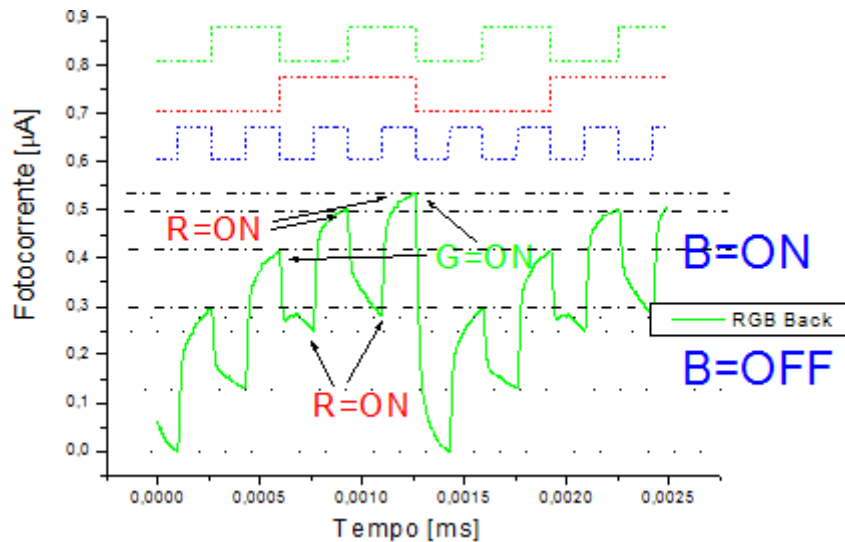


Figura 52 - Descodificação dos canais na combinação RGB sobre radiação de fundo posterior.

4.1.8 Canais RBV

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais RBV, utilizaram-se apenas os LEDs vermelho, azul e violeta nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 53 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais R, B e V, definida por cada sequência.

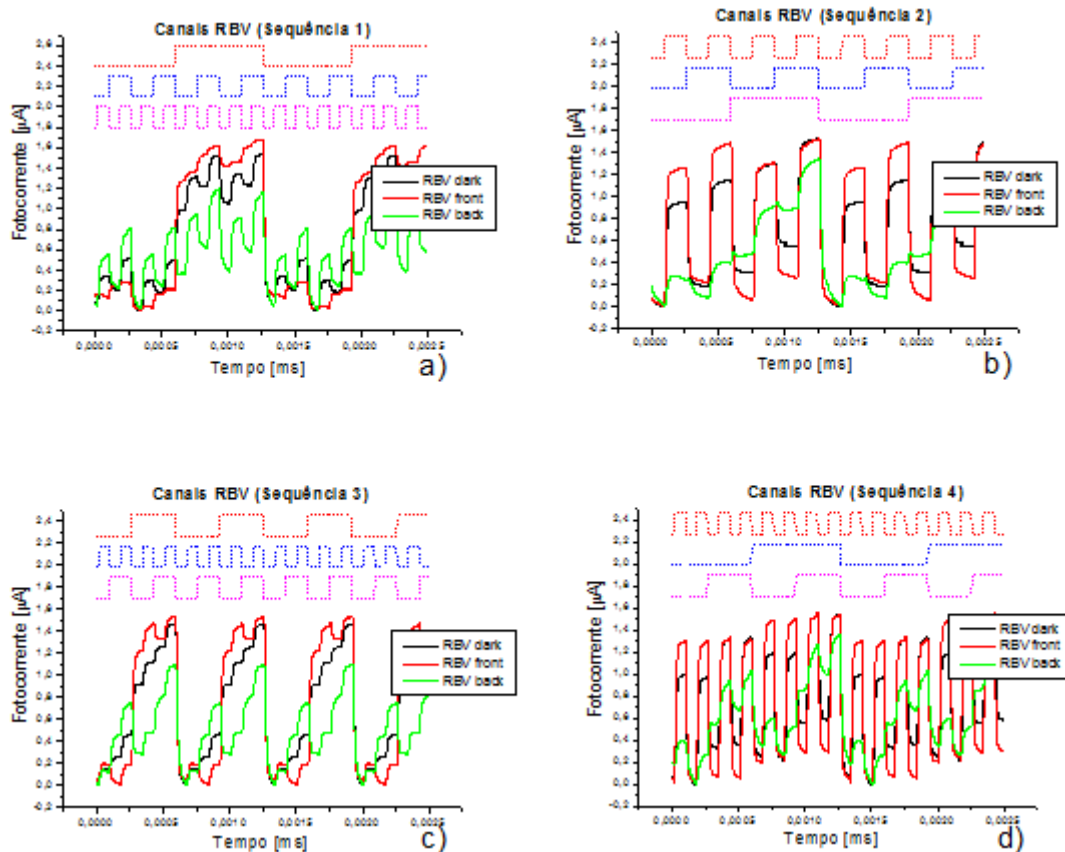


Figura 53 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RBV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas seqüências: a) seqüência 1, b) seqüência 2, c) seqüência 3 e d) seqüência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro seqüências, existem também oito níveis de fotocorrente, correspondentes às oito (2^3) combinações ON/OFF possíveis entre os três canais. Mais uma vez a aplicação da radiação de fundo frontal ou posterior produz efeitos diferentes na fotocorrente. Em cada seqüência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos três canais (RBV=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos três canais (RBV=OFF).

Sobre radiação de fundo pelo lado frontal é possível agrupar os diferentes níveis de fotocorrente em dois grupos, devido à forte amplificação do vermelho, Figura 54. Assim, os quatro níveis (2^2) com maior fotocorrente correspondem à presença do canal vermelho (R=ON) e os quatro níveis com menor fotocorrente correspondem à sua ausência (R=OFF), tal como se verificou para a combinação RGB. Como o canal azul é ligeiramente amplificado, os dois níveis de maior fotocorrente em cada grupo correspondem à presença do azul (B=ON) enquanto que os dois de menor nível à sua

ausência (B=OFF). Note-se que na combinação RGB este era o comportamento do canal verde. O canal violeta, por sua vez, é atenuado pela luz de fundo do lado frontal. Assim à semelhança do que se considerou na combinação anterior para o canal azul, cada grupo com quatro níveis pode dividir-se em grupos de dois níveis, um com os dois níveis de maior fotocorrente desse grupo e outro com os dois níveis de menor fotocorrente. Em cada um destes grupos de dois níveis, o de maior fotocorrente corresponde à presença do violeta (V=ON) e o de menor fotocorrente à sua ausência (V=OFF).

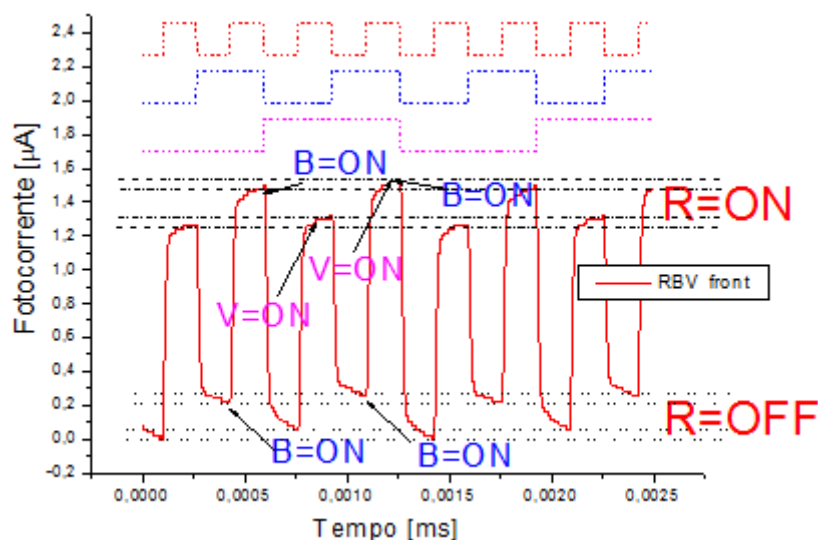


Figura 54 - Decodificação dos canais na combinação RBV sobre radiação de fundo frontal.

Sob a presença de radiação de fundo pelo lado posterior, apesar dos canais serem atenuados à exceção do violeta, que é bastante amplificado, continuam a existir 8 níveis de fotocorrente. Assim, agrupando os níveis em dois grupos de quatro níveis, Figura 55, em que um grupo contém os quatro subníveis de maior fotocorrente e outro grupo os quatro níveis de menor fotocorrente, é possível determinar a presença do canal violeta (V=ON) no grupo dos quatro níveis de maior fotocorrente. Em cada grupo, os dois subníveis de maior fotocorrente determinam a presença do canal vermelho (R=ON) e os dois de menor fotocorrente à sua ausência (R=OFF). Por fim, cada grupo pode dividir-se em sub-grupos de dois níveis em que o nível de maior fotocorrente em cada um desses grupos corresponde à presença do azul (B=ON).

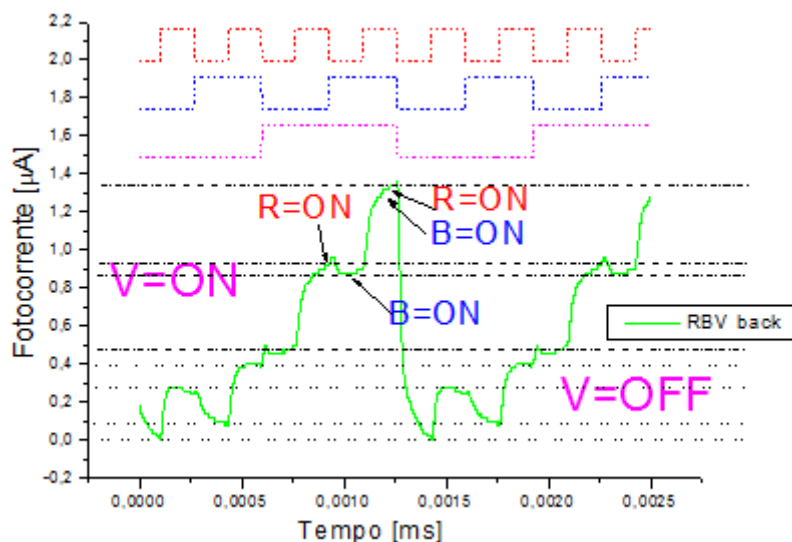


Figura 55 - Descodificação dos canais na combinação RBV sobre radiação de fundo posterior.

Verifica-se assim que o método de descodificação é igual ao utilizado na combinação anterior, com a ressalva de que a ordem dos canais é diferente.

4.1.9 Canais GBV

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais GBV, utilizaram-se apenas os LEDs verde, azul e violeta nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 56 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais G, B e V, definida por cada sequência.

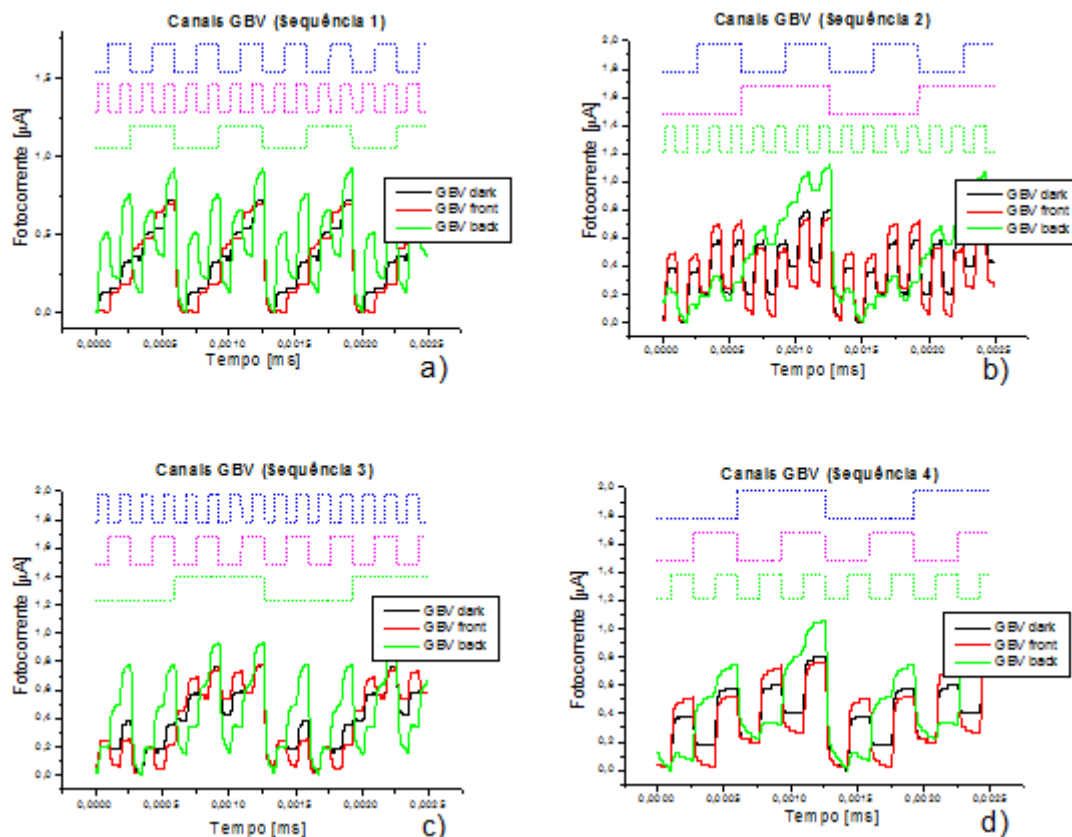


Figura 56 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais GBV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, ao contrário existem também oito níveis de fotocorrente, correspondentes às oito (2^3) combinações ON/OFF possíveis entre os três canais. Tal como se viu também nos resultados anteriores, a aplicação da radiação de fundo produz efeitos diferentes na fotocorrente, quando pelo lado frontal ou posterior. Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos três canais (GBV=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos três canais (GBV=OFF).

Sobre radiação de fundo pelo lado frontal é possível agrupar os diferentes níveis de fotocorrente em dois grupos, neste caso devido à forte amplificação do verde, Figura 57. Assim, os quatro níveis (2^2) com maior fotocorrente correspondem à presença do canal verde (G=ON) e os quatro níveis com menor fotocorrente correspondem à sua ausência (G=OFF). O canal azul é ligeiramente amplificado, então os dois níveis (2^1) de maior fotocorrente em cada grupo correspondem à presença do azul (B=ON) enquanto

que os dois de menor nível à sua ausência (B=OFF). O canal violeta é atenuado pela luz de fundo pelo lado frontal, então à semelhança do que se considerou na combinação anterior, cada grupo com quatro níveis pode dividir-se em grupos de dois níveis, um com os dois níveis de maior fotocorrente desse grupo e outro com os dois níveis de menor fotocorrente. Em cada um destes grupos de dois níveis, o nível de maior fotocorrente corresponde à presença do violeta (V=ON) e o de menor fotocorrente à sua ausência (V=OFF).

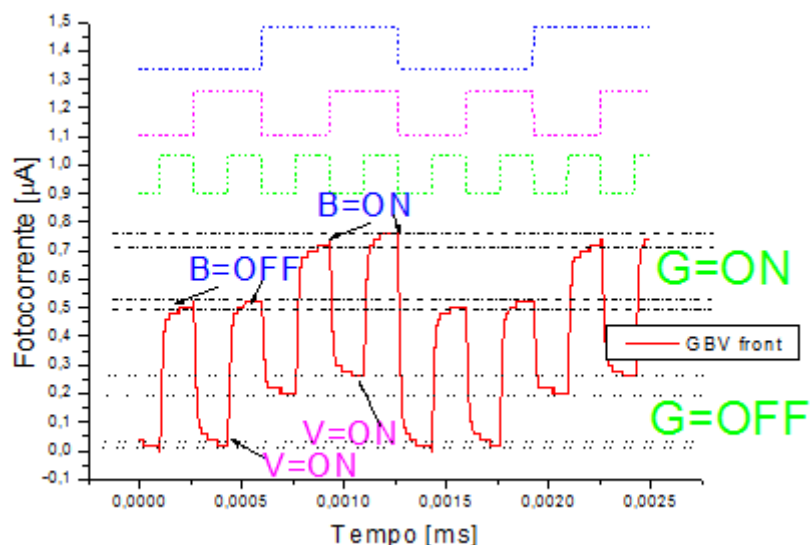


Figura 57 - Descodificação dos canais na combinação GBV sobre radiação de fundo frontal.

Sob a presença de radiação de fundo pelo lado posterior, como se tem verificado existem os oito níveis de fotocorrente, Figura 58. Assim, agrupando os níveis em dois grupos de quatro níveis, em que um grupo contém os quatro níveis de maior fotocorrente e outro grupo os quatro níveis de menor fotocorrente, é possível determinar a presença do canal violeta (V=ON) no grupo dos quatro níveis de maior fotocorrente e a sua ausência (V=OFF) no restante grupo. Em cada grupo, os dois níveis de maior fotocorrente determinam a presença do canal azul (B=ON) e os dois de menor fotocorrente à sua ausência (B=OFF). Por fim, cada grupo pode dividir-se em grupos de dois níveis em que o nível de maior fotocorrente em cada um desses grupos corresponde à presença do azul (B=ON).

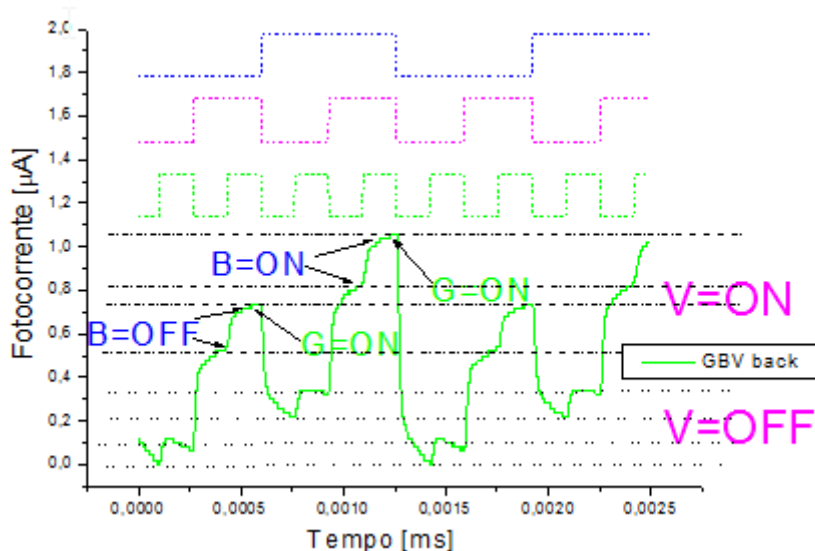


Figura 58 - Decodificação dos canais na combinação GBV sobre radiação de fundo posterior.

4.1.10 Canais RGV

Para analisar o resultado da fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGV, utilizaram-se apenas os LEDs vermelho, verde e violeta nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 59 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais R, G e V, definida por cada sequência.

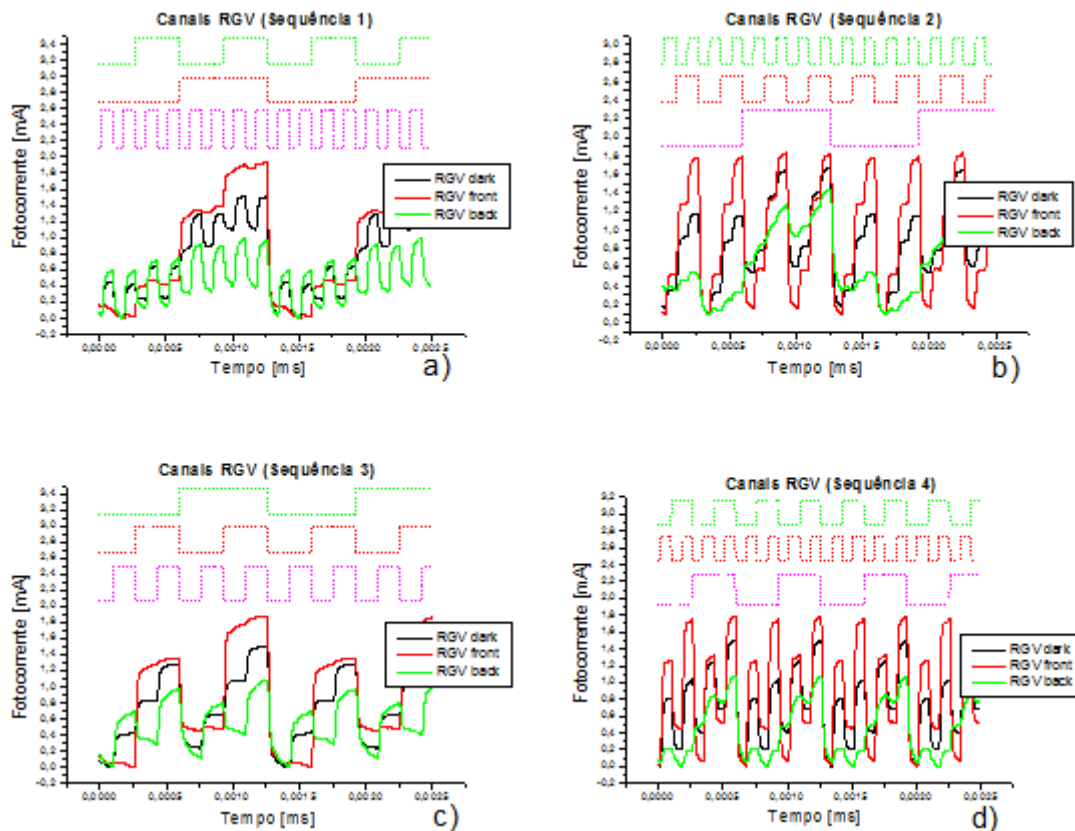


Figura 59 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas seqüências: a) seqüência 1, b) seqüência 2, c) seqüência 3 e d) seqüência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro seqüências, ao contrário existem também oito níveis de fotocorrente, correspondentes às oito (2^3) combinações ON/OFF possíveis entre os três canais. Tal como se viu também nos resultados anteriores, a aplicação da radiação de fundo produz efeitos diferentes na fotocorrente, quando pelo lado frontal ou posterior.

Em cada seqüência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos três canais (RGV=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos três canais (RGV=OFF).

Sobre radiação de fundo pelo lado frontal é possível agrupar os diferentes níveis de fotocorrente em dois grupos, devido à forte amplificação do vermelho, Figura 60. Assim, os quatro níveis (2^2) com maior fotocorrente correspondem à presença do canal vermelho (R=ON) e os quatro níveis com menor fotocorrente correspondem à sua ausência (R=OFF). O canal verde também é amplificado, então os dois níveis (2^1) de

maior fotocorrente em cada grupo correspondem à presença do verde (G=ON) enquanto que os dois de menor nível à sua ausência (G=OFF). O canal violeta é atenuado pela luz de fundo pelo lado frontal, então, cada grupo com quatro níveis pode dividir-se em grupos de dois níveis, um com os dois níveis de maior fotocorrente desse grupo e outro com os dois níveis de menor fotocorrente. Em cada um destes grupos de dois níveis, o nível de maior fotocorrente corresponde à presença do violeta (V=ON) e o de menor fotocorrente à sua ausência (V=OFF). Note-se que a presença do canal violeta é praticamente desprezível.

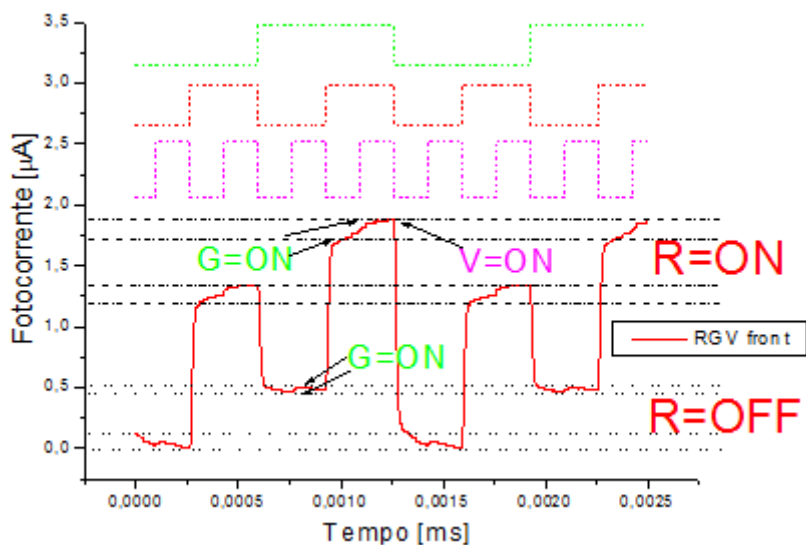


Figura 60 - Decodificação dos canais na combinação RGV sobre radiação de fundo frontal.

Sob a presença de radiação de fundo pelo lado posterior, como se tem verificado existem os oito níveis de fotocorrente, Figura 61. Assim, agrupando os níveis em dois grupos de quatro níveis, em que um grupo contém os quatro níveis de maior fotocorrente e outro grupo os quatro níveis de menor fotocorrente, é possível determinar a presença do canal violeta (V=ON) no grupo dos quatro níveis de maior fotocorrente e a sua ausência (V=OFF) no restante grupo. Em cada grupo, os dois níveis de maior fotocorrente determinam a presença do canal vermelho (R=ON) e os dois de menor fotocorrente à sua ausência (R=OFF). Por fim, cada grupo pode dividir-se em grupos de dois níveis em que o nível de maior fotocorrente em cada um desses grupos corresponde à presença do verde (G=ON).

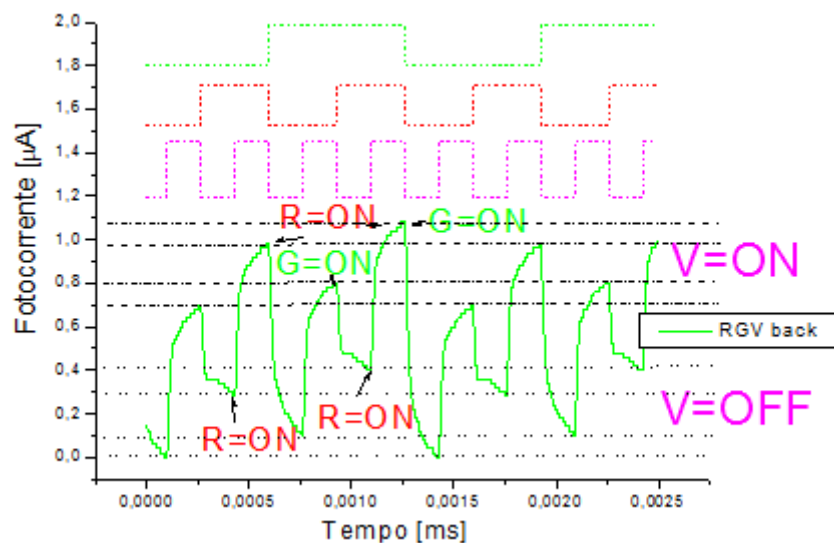


Figura 61 - Decodificação dos canais na combinação RGV sobre radiação de fundo posterior.

4.1.11 Canais RGBV

Por fim analisou-se o resultado da fotocorrente gerada pela combinação de todos os canais, utilizando os LEDs vermelho, verde, azul e violeta nas combinações binárias definidas pelas sequências padrão. A análise realizou-se com o dispositivo no escuro e quando foi iluminado frontalmente e posteriormente pelo fundo violeta. A Figura 62 mostra o resultado das medições de fotocorrente para as quatro sequências. No topo de cada gráfico mostra-se a combinação binária dos canais R, G, B e V, definida por cada sequência.

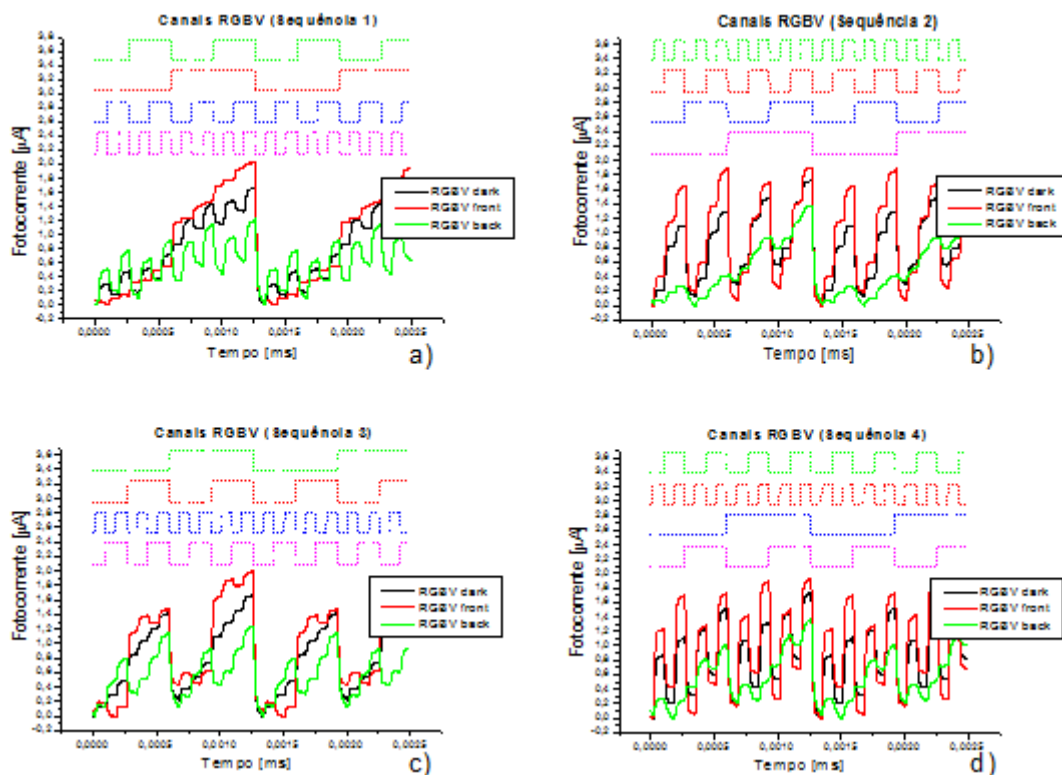


Figura 62 - Fotocorrente gerada pela combinação dos canais RGBV com radiação de fundo frontal e posterior de cor violeta nas sequências: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Das medidas realizadas verifica-se que, para as quatro sequências, neste caso existem dezasseis níveis de fotocorrente, correspondentes às dezasseis (2^4) combinações ON/OFF possíveis entre os quatro canais. Tal como se viu também nos resultados anteriores, a aplicação da radiação de fundo produz efeitos diferentes na fotocorrente, quando pelo lado frontal ou posterior.

Em cada sequência, o patamar com maior fotocorrente corresponde à presença dos quatro canais (RGBV=ON) e o patamar com menor fotocorrente à ausência dos quatro canais (RGBV=OFF).

Sobre radiação de fundo pelo lado frontal é possível agrupar os diferentes níveis de fotocorrente em dois grupos, devido à forte amplificação do vermelho, Figura 63. Assim, os oito níveis (2^3) com maior fotocorrente correspondem à presença do canal vermelho (R=ON) e os oito níveis com menor fotocorrente correspondem à sua ausência (R=OFF). O canal verde também é amplificado, então os quatro níveis (2^2) de maior fotocorrente em cada grupo correspondem à presença do verde (G=ON) enquanto

que os quatro de menor nível à sua ausência (G=OFF). O canal azul também é ligeiramente amplificado, então cada quatro níveis de cada grupo podem-se agrupar em dois subgrupos (2^1), onde os dois níveis de maior fotocorrente correspondem à presença do canal azul (B=ON) e os dois níveis de menor fotocorrente à sua ausência (B=OFF). O canal violeta é atenuado, então em cada dois níveis muito próximos, o de maior fotocorrente corresponde à presença do violeta (V=ON) e o de menor fotocorrente à sua ausência.

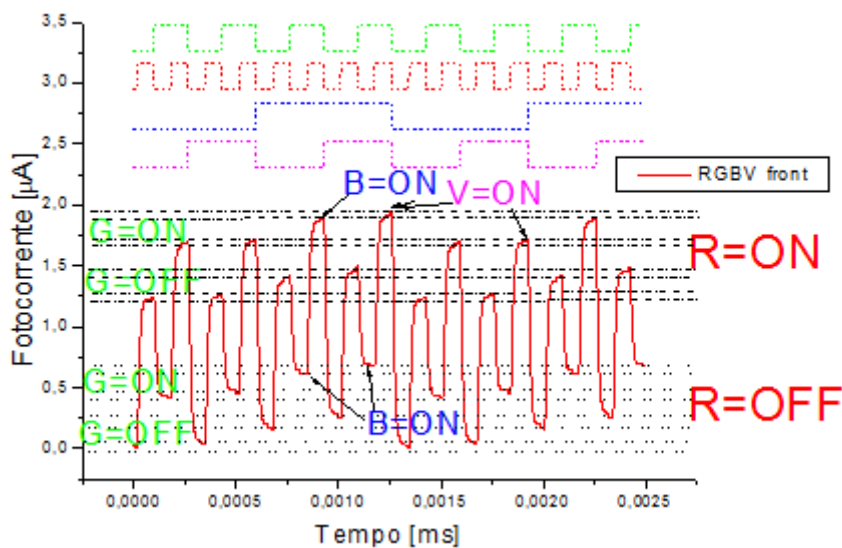


Figura 63 - Descodificação dos canais na combinação RGBV sobre radiação de fundo frontal.

Sob a presença de radiação de fundo pelo lado posterior, existem também os dezasseis níveis de fotocorrente, neste caso devido à amplificação do violeta, Figura 64. Assim, agrupando os níveis em dois grupos de oito (2^3) níveis, em que um grupo contém os oito níveis de maior fotocorrente e outro grupo os oito níveis de menor fotocorrente, é possível determinar a presença do canal violeta (V=ON) no grupo dos oito níveis de maior fotocorrente e a sua ausência (V=OFF) no restante grupo. Em cada grupo, os quatro (2^2) níveis de maior fotocorrente determinam a presença do canal azul (B=ON) e os dois de menor fotocorrente à sua ausência (B=OFF). Em cada quatro níveis de cada grupo podem-se agrupar em dois subgrupos (2^1), onde os dois níveis de maior fotocorrente correspondem à presença do canal vermelho (R=ON) e os dois níveis de menor fotocorrente à sua ausência (R=OFF). Por fim, o canal verde é descodificado no nível de maior fotocorrente (G=ON) a cada dois níveis.

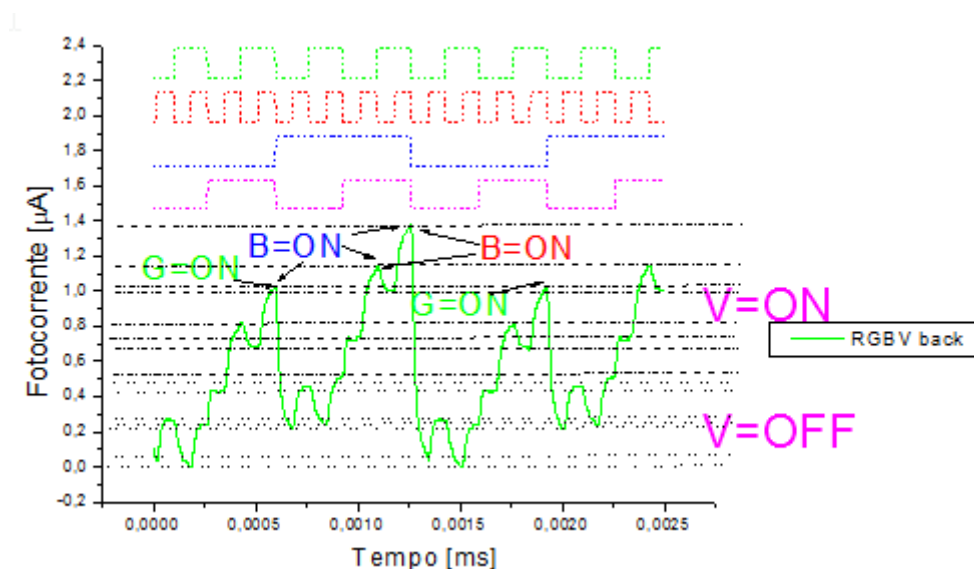


Figura 64 - Decodificação dos canais na combinação RGBV sobre radiação de fundo posterior.

4.2 Aplicações

Após análise dos sinais aplicados de forma individual e combinada sobre o dispositivo semiconductor, na presença de radiação de fundo de cor violeta é necessário avaliar o dispositivo do ponto de vista de aplicação numa rede de transmissão ótica.

A implementação de um dispositivo WDM requer que os comprimentos de onda dos vários canais sejam filtrados. A aplicação de filtros *add/drop* é usual para filtrar comprimentos de onda específicos em determinados pontos da rede de transmissão. No dispositivo que é alvo de estudo nesta dissertação a filtragem de comprimentos de onda é possível através da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal ou posterior.

O estudo realizado no capítulo 3 permite concluir que a radiação de fundo de cor violeta aplicada pelo lado frontal amplifica os comprimentos de onda médios e longos e atenua os curtos, pelo lado posterior amplifica bastante os comprimentos de onda curtos e atenua os médios e longos. Assim, é possível que capacidade de filtragem seja alcançável através da alternância de lado por onde é aplicado a radiação de fundo.

Ao longo deste capítulo é feita uma comparação entre o padrão de fotocorrente resultante da combinação dos quatro canais RGBV com a combinação dos canais RGB, GBV e RBV. A análise é efetuada tendo em conta as condições de teste especificadas

no capítulo 3, sendo que se tem em consideração o lado por onde é aplicado a radiação de fundo separadamente.

Para analisar a filtragem do canal violeta comparou-se a fotocorrente gerada pelo dispositivo para as combinações RGBV e RGB, sob a presença de radiação de fundo pelo lado frontal. Na Figura 65 apresenta-se, para cada sequência binária, a fotocorrente dos canais combinados.

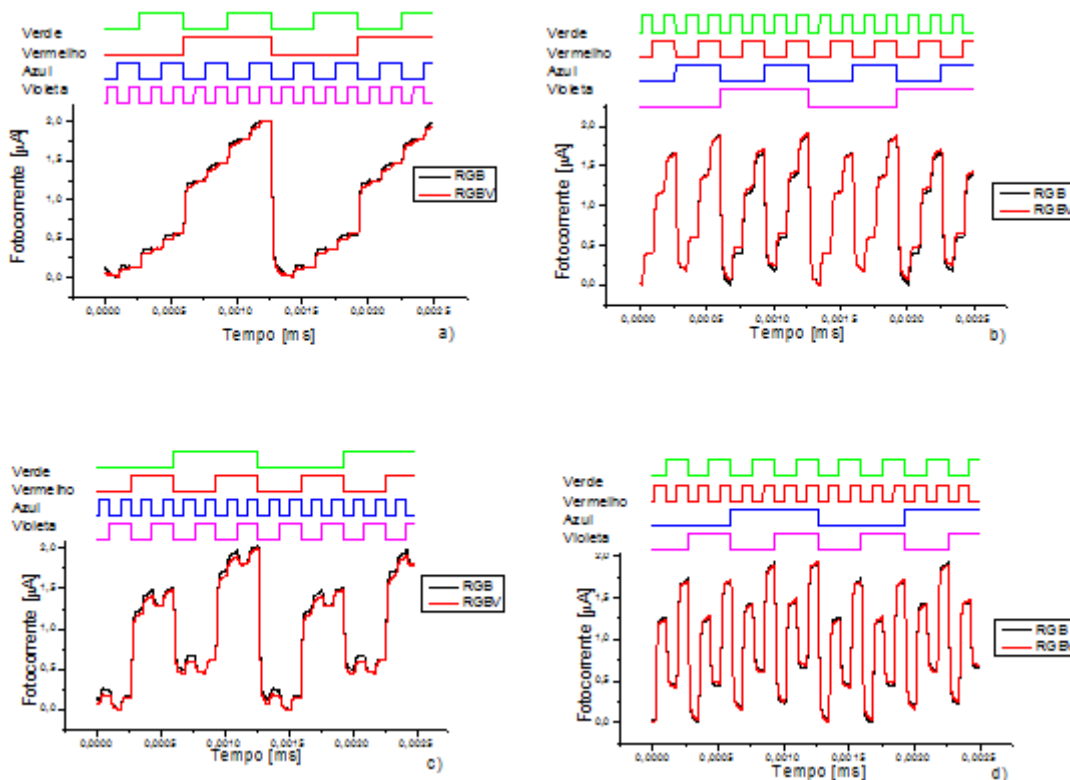


Figura 65 – Comparação de fotocorrente entre as combinações RGBV e RGB, sobre radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Pela comparação da fotocorrente dos canais combinados RGBV e RGB verifica-se que sobre radiação de fundo pelo lado frontal a presença do canal violeta é praticamente desprezável. Os níveis de fotocorrente gerados pela combinação RGBV são praticamente os mesmos que da combinação RGB. Ou seja, para a combinação RGBV pode-se considerar que existem oito níveis de fotocorrente correspondentes às oito combinações possíveis entre os canais RGB. Assim, o canal violeta pode ser filtrado do canal de comunicação enquanto que os restantes mantêm-se.

Para analisar a filtragem do canal vermelho comparou-se a fotocorrente gerada pelo dispositivo para as combinações RGBV e GBV, sob a presença de radiação de fundo pelo lado posterior. Na Figura 66 apresenta-se, para cada sequência binária, a fotocorrente dos canais combinados.

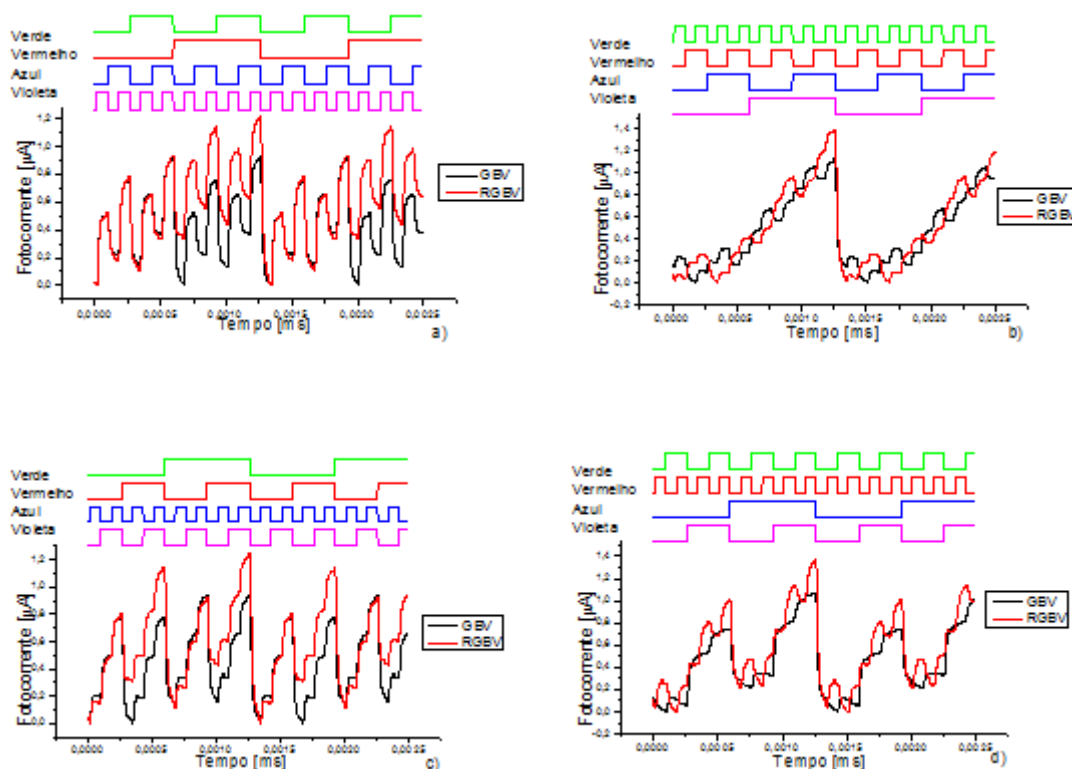


Figura 66 - Comparação de fotocorrente entre as combinações RGBV e GBV, sobre radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Pela comparação da fotocorrente dos canais combinados RGBV e GBV verifica-se que sobre radiação de fundo pelo lado posterior a presença do canal vermelho não é desprezável. Neste caso, apesar de se ter concluído que a radiação de fundo pelo lado posterior atenua o canal vermelho, a fotocorrente gerada pelo dispositivo semiconductor na presença do canal vermelho, para a combinação RGBV, é superior à fotocorrente gerada pela combinação GBV. Assim, continuam a existir dezasseis níveis de fotocorrente correspondentes às dezasseis combinações possíveis dos canais RGBV, não sendo possível filtrar o canal vermelho.

Para analisar a filtragem do canal verde comparou-se a fotocorrente gerada pelo dispositivo para as combinações RGBV e RBV, sob a presença de radiação de fundo

pelo lado posterior. Na Figura 67 apresenta-se, para cada sequência binária, a fotocorrente dos canais combinados.

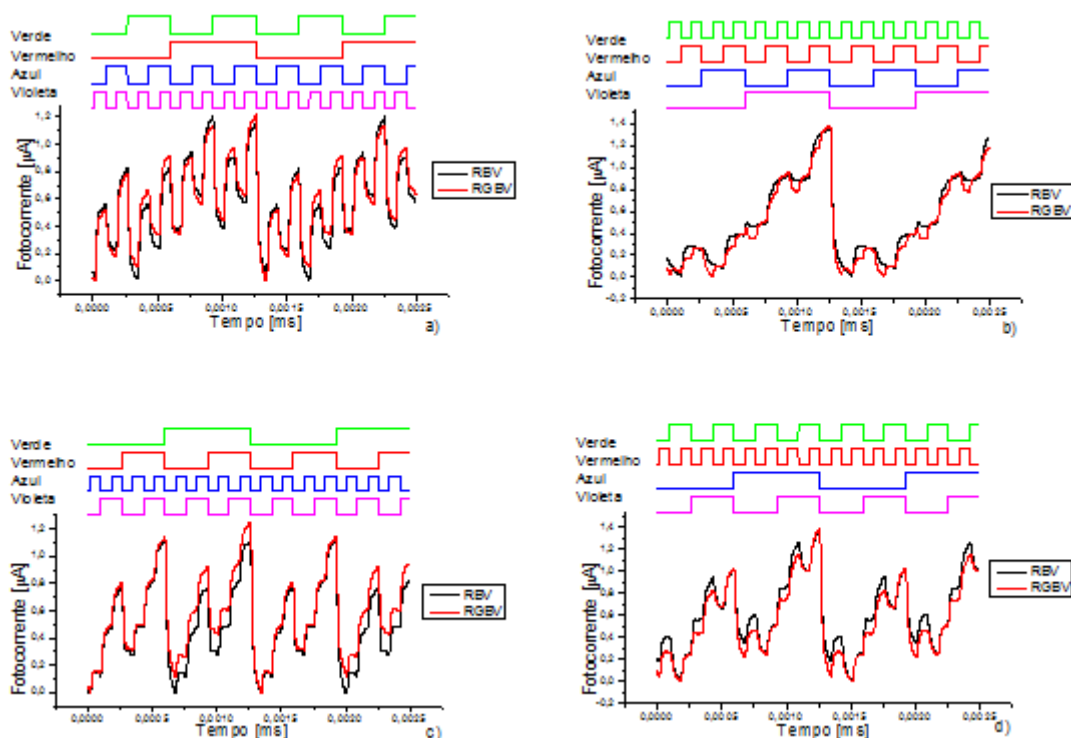


Figura 67 - Comparação de fotocorrente entre as combinações RGBV e RBV, sobre radiação de fundo de cor violeta pelo lado posterior: a) sequência 1, b) sequência 2, c) sequência 3 e d) sequência 4.

Pela comparação da fotocorrente dos canais combinados RGBV e RBV verifica-se que sobre radiação de fundo pelo lado posterior a presença do canal os níveis das duas combinações estão mais próximas do que se verificou na tentativa de filtragem do canal vermelho. No entanto, apesar da proximidade dos níveis de fotocorrente continua-se a verificar os dezasseis níveis de fotocorrente dos canais RGBV.

Os resultados aferidos na tentativa de filtragem dos canais vermelho, verde e violeta só se mostraram positivos na filtragem do sinal de cor violeta.

4.3. Referências bibliográficas

- [1] Louro, P., Vieira, M., Vieira, M. A., Fernandes, M., Costa, J., “Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications”, *Advances in Photodiodes*, 2010;
- [2] Ferraz, Hugo, “Fotodetector e dispositivo WDM integrados”, ISEL, 2012;
- [3] T. A. Silva, “Tese de dissertação de Mestrado em Implementação de WDM com dispositivos semicondutores”, ISEL, 2011;
- [4] N. Massa, “Fiber Optic Telecommunication”, University of Connecticut, Massachusetts, 2000;
- [5] V. A. Manuel, M. Vieira, J. Costa, P. Louro, M. Fernandes, A. Fantoni, “Double Pin Photodiodes with two optical gate connections for light triggering: A capacitive two-phototransistor model”, in *Sensors & Transducers Journal*, 2011;
- [6] M. Haupt and U. Fischer-Hirchert, “WDM Key Element in the visible spectrum for standard SI-POF”, *Fachhochschule Schmalkalden*, 2010;
- [7] M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, A. Fantoni, V. Silva, “SiC multilayer add/drop filter for optical interconnects”, 2013;
- [8] J. Wilson, J. Hawkes, “Optoelectronics – An introduction”, Prentice Hall, London, 1998;
- [9] C. Petit, M. Blaser, “Photodiodes with Integrated Optical Fiber for Optical Network Applications”, *Workshop on Optical Components for broadband Communication*, Proc. of SPIE Vol.6350, 63500I, 2006;
- [10] Hsiung-Kuang Tsai, Si-Chen Lee, “Amorphous SiC/Si Three-color detector”, *Applied Physics Letters Volume 52*, 2009;
- [11] M. Vieira, “Three Transducers for One Photodetector: essays for optical communications”, *Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa*, 2012.

Capítulo 5 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

A tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é uma prática bastante utilizada nas redes de transmissão de longa distância, através de fibras óticas de sílica. A sua utilização constitui uma importante alternativa na expansão das redes de transmissão. A tecnologia WDM é uma alternativa à instalação de mais fibra ótica, como forma para suportar mais serviços ou novos utilizadores.

As fibras óticas de plástico vêm explorar a região visível do espectro eletromagnético e constituem numa boa alternativa para as ligações a curtas distâncias, podendo substituir por exemplo os convencionais cabos coaxiais, os de redes locais Ethernet ou mesmo as fibras óticas de sílica multimodo. Torna-se então necessário aproveitar tecnologias utilizadas nas fibras óticas de sílica, que operam no domínio do infravermelho, às fibras óticas de plástico.

Esta dissertação consiste na continuação do estudo de um dispositivo WDM baseado numa estrutura semicondutora que consiste num fotodíodo PIN frontal baseado em a-SiC:H e um fotodíodo PIN posterior baseado em a-Si:H. Tendo como objetivo a aplicação do dispositivo em sistemas de comunicação, através de fibras óticas de plástico. A sensibilidade espectral do dispositivo, na região do visível, é modulada pelo sinal de tensão elétrico aplicado e/ou pela presença de polarização ótica adicional, pela incidência de luz. Os resultados dos estudos anteriores relevaram-se essenciais para as opções tomadas e considerações iniciais na realização do estudo desta dissertação.

Tendo por base essas considerações, neste trabalho avaliou-se a influência da aplicação de radiação de fundo de cor violeta sob o dispositivo face aos comprimentos de onda incidentes e para vários ritmos binários de modulação dos sinais. Com base neste estudo, foi possível caracterizar o dispositivo no que diz respeito ao ganho ótico produzido pela influência da radiação de fundo, quer pelo lado frontal ou posterior, bem como a influência sob a duração do tempo de subida na transição de OFF para ON do sinal. No estudo utilizou-se quatro LED (*Light Emitting Diode*) de cor diferente como fonte ótica, que transmitem sinais de diferentes comprimentos de onda (violeta – 400 nm, azul – 470 nm, verde – 525 nm, vermelho – 626 nm). Nesta opção evoluiu-se relativamente aos estudos anteriores, onde apenas os comprimentos de onda da cor vermelha, verde e azul são utilizados.

Tendo em vista a análise do efeito que a aplicação de radiação de fundo tem sob o dispositivo mediu-se a fotocorrente para cada uma dos canais RGBV de forma individual e para diferentes frequências de modulação, com a presença de radiação de fundo e na sua ausência.

A aplicação de radiação de fundo pelo lado frontal amplifica consideravelmente os comprimentos de onda longos, no espectro do visível, como o vermelho e o verde. Por sua vez, os comprimentos de onda curtos como o azul e o violeta são pouco amplificados ou até mesmo atenuados, no caso do violeta. Verifica-se que alteração da frequência de modulação tem mais expressão no canal vermelho, sendo que o ganho ótico aumenta ligeiramente com o aumento da frequência de modulação.

A aplicação de radiação de fundo pelo lado posterior tem o comportamento oposto ao observado sob fundo frontal. Ou seja, há uma forte amplificação dos comprimentos de onda curtos, sobretudo do canal violeta. Verifica-se também que a frequência de modulação tem bastante impacto no ganho ótico do canal violeta. O aumento da frequência de modulação diminui bastante o ganho ótico. O canal azul é ligeiramente amplificado e o canal vermelho e verde são atenuados com razões muito próximas. Apesar do canal vermelho ser ligeiramente mais atenuado que o verde, ainda assim apresenta valores de fotocorrente superiores.

Conclui-se assim que, a radiação de fundo violeta é absorvida no fotodíodo frontal, aumentando o campo elétrico no fotodíodo posterior, onde os fótons de cor vermelha e parte dos verdes são absorvidos. Sobre radiação de fundo posterior, o campo elétrico aumenta no fotodíodo frontal onde os fótons de cor violeta e parte dos azuis são absorvidos.

Relativamente à análise dos tempos de subida, verifica-se que diminui nos quatro canais com o aumento da frequência de modulação. Constata-se ainda que o tempo de subida tende a decrescer mais abruptamente com a diminuição do comprimento de onda do canal. Na frequência de modulação mais elevada ambos os canais têm aproximadamente o mesmo tempo de subida, contudo, nas frequências de modulação mais lenta verifica-se que os canais com comprimento de onda mais baixo apresentam maior duração do tempo de subida. Pela aplicação de radiação de fundo verifica-se que quando é pelo lado frontal regista-se um aumento no tempo de subida do

canal vermelho e verde, por sua vez quando é pelo lado posterior verifica-se que o tempo de subida aumenta nos canais azul e violeta.

Com base nos resultados do estudo é possível prever o comportamento da estrutura semicondutora, nomeadamente no que diz respeito à descodificação dos sinais transmitidos. Assim, realizou-se outro estudo que incidiu na análise dos sinais dos canais óticos de forma combinada dois a dois, três a três e quando todos são utilizados. Conclui-se que é possível fazer a descodificação dos sinais incidentes, contribuindo para isso a amplificação do canal vermelho com a radiação pelo lado frontal e a amplificação do canal violeta com a radiação pelo lado posterior. Chegou-se, ainda, à conclusão que o código de descodificação pelo lado frontal tem a forma de RGBV e pelo lado posterior tem a forma de VBGR.

A implementação de um dispositivo WDM requer que os comprimentos de onda dos vários canais sejam filtrados. A aplicação de filtros *add/drop* é usual para filtrar comprimentos de onda específicos em determinados pontos da rede de transmissão. No dispositivo que é alvo de estudo nesta dissertação a filtragem de comprimentos de onda é possível através da aplicação de radiação de fundo de cor violeta pelo lado frontal ou posterior. Assim, comparou-se o padrão de fotocorrente resultante da combinação dos quatro canais RGBV com a combinação dos canais RGB, GBV e RBV.

Os resultados demonstram que para a configuração de polarização utilizada apenas a filtragem do sinal de cor violeta tem resultados positivos. A comparação do padrão de fotocorrente da combinação RGBV, em que é aplicado radiação de fundo pelo lado frontal, mostra que existem praticamente oito níveis de fotocorrente tal como se verifica na combinação RGB. Assim o sinal do canal violeta é desprezável. Por sua vez, a comparação do padrão de fotocorrente da combinação RGBV com GBV e RBV, em que é aplicado radiação de fundo pelo lado posterior, mostra que existem dezasseis níveis bem distintos, o que complica a filtragem do canal vermelho e verde, respetivamente.

O estudo desenvolvido nesta dissertação permite identificar o comportamento do dispositivo sob a aplicação de radiação de fundo de cor violeta. Os resultados permitem concluir que o dispositivo pode ser utilizado como WDM de quatro canais, contudo é interessante avaliar as condições de filtragem de todos os canais. Outro

desenvolvimento muito interessante é, testar as capacidades de filtragem do dispositivo quando é utilizado fibras POF (*Plastic Optical Fiber*).

O desenvolvimento de um algoritmo em *software* para decodificação dos sinais transmitidos tem também do ponto de vista da aplicação todo o interesse.

Capítulo 6 – Anexos

Os documentos anexos estão disponíveis para consulta no CD anexado ao relatório.

Anexo 1 Resumo submetido para participação na Conferência de Eletrônica, Telecomunicações e Computadores de 2013 (CETC 2013) – ficheiro ‘*Abstract_cect13.pdf*’.

Anexo 2 Artigo aceite para apresentação em *poster* na conferência CETC 2013. Artigo submetido para apreciação pela revista *Procedia Technology (Elsevier)* – ‘*paper_cetc13.pdf*’.

Anexo 3 Poster apresentado na conferência CETC 2013 – ficheiro ‘*POSTER_WDM_2013.pdf*’.

