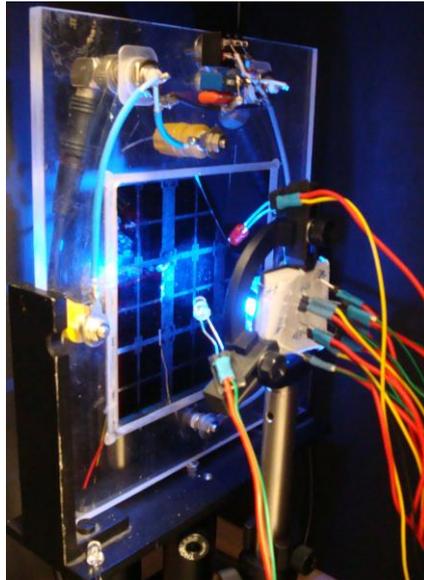


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores



Sistema WDM de 4 canais

Fábio André Rosário Sousa

(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 Luís Miguel Tavares Fernandes

Prof.^a Doutora Paula Maria Garcia Louro Antunes

Novembro de 2014

*“Deus quer,
o homem sonha,
a obra nasce.”*

Fernando Pessoa, Mensagem

Agradecimentos

O presente trabalho representa o culminar de um percurso académico de esforço e dedicação. Gostaria de agradecer a todos aqueles que, duma forma direta ou indireta, contribuíram para a finalização do trabalho apresentado.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer há minha mãe e ao meu pai pelo amor, motivação e compreensão que sempre tiveram para comigo. Agradecer o tempo que abdicaram da minha presença e os sacrifícios que fizeram. O seu incentivo e presença constantes foram um grande contributo para a finalização deste curso.

À minha noiva, pelo amor, força e paciência ao longo de todo este percurso. Agradecer a dedicação, apoio e tempo despendido em tudo o que foi necessário.

À Professora Doutora Paula Louro Antunes e à Professora Doutora Manuela Vieira, na qualidade de professoras orientadoras, as quais sempre me proporcionaram um enorme apoio e suporte ao longo de todo o trabalho. Agradeço o facto de me terem proporcionado a realização deste trabalho, a paciência e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

A todos os meus amigos e colegas que ao longo destes anos me apoiaram tanto a nível pessoal como académico. Agradeço a compreensão pela falta de tempo em estar com eles.

A todos, muito obrigado!

Resumo

O presente relatório apresenta uma análise optoeletrónica de uma heteroestrutura semicondutora empilhada de fotodíodos PIN, baseada numa liga de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H – *Hydrogenated Amorphous Silicon*) e silício de carbeto 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 analisar as capacidades da heteroestrutura nas redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), para transmissão de sinais óticos a curta distância, com fibra óticas de plástico (POF – *Plastic Optical Fiber*) como meio de transmissão. O trabalho desenvolvido surge na sequência de trabalhos anteriormente desenvolvidos, onde foi realizada uma caracterização optoelectrónica da estrutura semicondutora sob diferentes condições de iluminação, variando o comprimento de onda e a radiação de fundo.

A transmissão é feita através de quatro dispositivos LED (*Light Emitting Diode*) com as cores: violeta (400nm), azul (470nm), verde (525nm) e vermelho (626nm). 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.

A caracterização optoeletrónica da estrutura semicondutora demonstra a influência da radiação de fundo de cor violeta nos canais de transmissão. A análise aos canais individuais verifica, além da influência da radiação de fundo, os níveis de potência ótica de cada canal. Para cada canal é calculado o ganho ótico obtido através da radiação de fundo pelo lado posterior e frontal. Pelos resultados obtidos é possível verificar que a radiação de fundo pelo lado frontal amplifica a fotocorrente dos canais vermelho e verde e atenua os restantes. Por sua vez, a radiação de fundo pelo lado posterior amplifica os canais violeta e azul e atenua os restantes.

No complemento da análise individual é realizada uma análise WDM na qual é possível combinar os canais dois a dois, três a três e na presença de todos os canais. As medidas são realizadas sobre a presença e ausência da radiação de fundo de cor violeta para as quatro sequências binárias distintas e com diferentes níveis de modulação. A influência da radiação de fundo pelo lado posterior e frontal e o ganho produzido através dos mesmos, permite descodificar as combinações binárias dos sinais transmitidos.

Palavras-chave: Optoeletrónica, multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), dispositivos semicondutores, fibra ótica de plástico (POF), multiplexagem/desmultiplexagem ótica.

Abstract

This report presents an optoelectronic analysis of a stacked semiconductor heterostructure with PIN photodiodes, based on hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H), and a hydrogenated amorphous silicon carbide (a-SiC:H), that were optimized to detect optical signals in the visible spectrum.

The aim of this thesis is to analyze the hetero-structure capabilities in WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks for the transmission of short range optical signals, using plastic optical fibers (POF) to propagate the signal. The work arises from previously developed studies, where a characterization of the optoelectronic semiconductor structure was performed, under different lighting conditions, and varying the wavelength and background radiation.

The transmission is done using four visible LED (Light Emitting Diode) devices with the following colors: Violet (400 nm), Blue (470 nm), Green (525 nm) and Red (626 nm). A violet front and back background radiation was used, because recent researches demonstrated that it was the most effective in signal detection.

The optoelectronic characterization of the semiconductor structure verifies the influence of the violet background radiation in transmissions. Besides the influence of the violet background radiation, the analysis made to the individual channels also allows the measurement of their optical flux. For each channel, it is calculated the optical gain obtained from the exposure to front and back background radiation, and those results reveal that the front background radiation intensifies the photocurrent of the red and green channels while the other short wavelength channels are attenuated. On the other hand, the back background radiation amplifies the violet and blue channels, while the others are attenuated.

Complementing the individual analysis, it is also done a transient signal analysis using multiple simultaneous signals, that showed that it is possible to combine the channels in pairs, in trios and altogether. The measurements were made under the presence and absence of violet background radiation, using different four binary sequences with distinct modulation frequencies. The influence of the background radiation (on both front and back device side), and the gain produced allowed the decoding of the binary combinations of the transmitted signals.

Keywords: Optoelectronics, Wavelength Division Multiplexing (WDM), Semiconductor Devices, Plastic Optical Fiber (POF), Optical Multiplexing/Demultiplexing.

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.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
1.4. Referências bibliográficas	4
Capítulo 2 – Tecnologia WDM.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Princípio de Operação	6
2.3. Características	6
2.4. Tipos de Dispositivos	7
2.5. WDM baseado em semicondutores.....	11
2.5.1. Estrutura do dispositivo.....	11
2.5.2. Influência da tensão na resposta espectral	12
2.5.3. Resposta espectral do dispositivo.....	13
2.5.4. Dispositivo WDM controlado pela tensão	15
2.5.5. Influência da taxa de transmissão.....	16
2.5.6. Influência da potência ótica incidente	17
2.5.7. Influência da polarização ótica na resposta espectral.....	18
2.6. Referências bibliográficas	20
Capítulo 3 – Fibras Óticas de Plástico.....	23
3.1. Introdução	23

3.2.	Estrutura física.....	23
3.3.	Materiais constituintes.....	24
3.4.	Propagação nas fibras óticas	25
3.4.1.	Refração e reflexão da luz na fibra ótica.....	25
3.4.2.	Ângulo de aceitação	26
3.4.3.	Abertura Numérica.....	27
3.5.	Tipos de fibras óticas de plástico	27
3.5.1.	Monomodo e multimodo.....	27
3.5.2.	Índice em degrau (SI-POF)	28
3.5.3.	Índice Gradual (GI-POF)	28
3.5.4.	Multinúcleo (MC-POF).....	29
3.5.5.	Multi-Degraus (MSI-POF).....	29
3.6.	Atenuação.....	29
3.7.	Dispersão.....	30
3.7.1.	Dispersão intramodal.....	30
3.7.2.	Dispersão intermodal.....	31
3.8.	Referências bibliográficas	31
Capítulo 4 – Caracterização Optoeletrônica.....		33
4.1.	Descrição do dispositivo	33
4.2.	Descrição Experimental	34
4.3.	Fontes Óticas.....	35
4.4.	Estudo dos canais individuais: Influência da potência ótica de transmissão.....	39
4.4.1.	Análise do canal vermelho (R).....	39
4.4.2.	Análise do canal Verde (G).....	40
4.4.3.	Análise do canal Azul (B).....	41
4.4.4.	Análise do canal Violeta (V).....	42
4.5.	Análise dos ganhos.....	43
4.6.	Referências	45
Capítulo 5 – Análise dos canais WDM		47

5.1.	Calibração	47
5.2.	Análise WDM	48
5.3.	Canais Individuais.....	48
5.3.1.	Canal Vermelho.....	49
5.3.2.	Canal Verde.....	50
5.3.3.	Canal Azul.....	51
5.3.4.	Canal Violeta.....	52
5.4.	Canais combinados.....	53
5.4.1.	Canais RG	53
5.4.2.	Canais RB.....	54
5.4.3.	Canais RV	55
5.4.4.	Canais GB	56
5.4.5.	Canais GV	57
5.4.6.	Canais BV	58
5.4.7.	Canais RGB.....	59
5.4.8.	Canais RGV.....	61
5.4.9.	Canais RBV.....	63
5.4.10.	Canais GBV.....	65
5.4.11.	Canais RGBV	67
5.5.	Referências.....	70
Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros.....		71

Lista de Figuras

Figura 1 – Funcionamento do WDM, operação de multiplexação e demultiplexação [11].	6
Figura 2 – <i>Optical add-drop multiplexer</i> [5].	8
Figura 3 – Demultiplexador baseado num prisma [6] (adap.).	8
Figura 4 – Dispositivo demultiplexador baseado em filtros interferentes [6] (adap.).	9
Figura 5 – Dispositivo baseado em grelhas de <i>Bragg</i> [7].	9
Figura 6 – Interferómetro de <i>Mach-Zehnder</i> .	10
Figura 7 – Dispositivo baseado em grelhas de difração [6] (adap.).	10
Figura 8 – Dispositivo baseado em AWG [6] (adap.).	11
Figura 9 – Estrutura do dispositivo semiconductor [10] (adap.).	12
Figura 10 – Resposta espectral para diferentes valores de tensão de polarização [9].	12
Figura 11 – Resposta espectral para diferentes frequências do sinal incidente [9].	13
Figura 12 – a) Resposta espectral com diferentes valores de polarização; b) Características da fotocorrente-tensão para os diversos comprimentos de onda medida com LEDs de alto brilho. [9]	13
Figura 13 – Variação da fotocorrente aplicada sob diferentes polarizações. a, c) dependência da fotocorrente com a tensão aplicada em função do comprimento de onda para os fotodíodos frontal e posterior; b, d) característica corrente-tensão do fotodíodo frontal e posterior.	14
Figura 14 – Sinais multiplexados com a tensão de polarização. a) 2 canais: vermelho e azul, b) 3 canais: vermelho, verde e azul, c) dependência do comprimento de onda dos canais de entrada com a tensão de polarização [9].	15
Figura 15 – Variação dos sinais multiplexados com a tensão de polarização [9].	16
Figura 16 – Multiplexação por divisão de comprimento de onda a -5V sob diferentes frequências de modulação [9].	17
Figura 17 – Variação da fotocorrente com a polarização ótica medida para cada canal ótico [9].	17
Figura 18 – Fotocorrente espectral sob polarização inversa e direta, aplicando as radiações óticas com o fundo. a) vermelho, b) verde, c) azul, d) sem polarização de fundo [9].	18
Figura 19 – Fotocorrente espectral a uma frequência de 600Hz. a) polarização inversa com e sem radiação de fundo, b) polarização direta com e sem radiação de fundo [9].	19
Figura 20 – Razão entre a fotocorrente com e sem radiação de fundo [9].	19
Figura 21 – Estrutura física de uma POF.	24
Figura 22 – Evolução dos materiais utilizados nas POF [3] (adap.).	25
Figura 23 – Reflexão e refração do raio de luz na interface entre dois meios.	26
Figura 24 – Propagação dos raios de luz na fibra ótica com a reflexão total [1] (adap.).	26

Figura 25 – Ângulo de abertura e diâmetro do núcleo de GOF e POF [3] (adap.).	27
Figura 26 – Propagação da luz na SI-POF.	28
Figura 27 – Estrutura da SI-POF [7].	28
Figura 28 – Propagação da luz na GI-POF.	28
Figura 29 – Estrutura da GI-POF [7].	28
Figura 30 – Exemplo da MC-POF.	29
Figura 31 – Estrutura da MC-POF [7].	29
Figura 32 – Estrutura da MSI-POF [7].	29
Figura 33 – Diagrama esquemático da estrutura do dispositivo semiconductor [3].	33
Figura 34 – Diagrama de blocos da montagem para o estudo da resposta espectral.	35
Figura 35 – Leitura das fontes óticas (primeiro cenário).	36
Figura 36 – Potencia ótica nos canais RGBV.	36
Figura 37 – Leitura das fontes óticas (segundo cenário).	37
Figura 38 – Espectro do canal vermelho para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.	37
Figura 39 – Espectro do canal verde para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.	37
Figura 40 – Espectro do canal azul para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.	37
Figura 41 – Espectro do canal violeta para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.	37
Figura 42 – Fotocorrente normalizada no canal vermelho (626nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.	39
Figura 43 – Fotocorrente normalizada no canal verde (525 nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.	40
Figura 44 – Fotocorrente normalizada no canal azul (470 nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.	41
Figura 45 – Fotocorrente normalizada no canal violeta (400 nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.	42
Figura 46 – Ganho nos canais RGBV através da radiação frontal.	44
Figura 47 – Ganho nos canais RGBV através da radiação posterior.	44
Figura 48 – Calibração dos canais RGBV.	47
Figura 49 – Fotocorrente normalizada no canal vermelho (626 nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 3; b) sequência 2 e 4.	49
Figura 50 – Fotocorrente normalizada no canal verde (525 nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 2; b) sequência 3 e 4.	50

Figura 51 – Fotocorrente normalizada no canal azul (470 nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 2; b) sequência 3 e 4.	51
Figura 52 – Fotocorrente normalizada no canal violeta (400 nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 3; b) sequência 2 e 4.	52
Figura 53 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RG com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	53
Figura 54 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RB com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	54
Figura 55 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 3; b) sequência 2 e 4.	55
Figura 56 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais GB com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 2; b) sequência 3 e 4.	56
Figura 57 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais GV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	57
Figura 58 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais BV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	58
Figura 59 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RGB com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	60
Figura 60 – Descodificação dos canais RGB sobre a radiação frontal.	61
Figura 61 – Descodificação dos canais RGB sobre a radiação posterior.	61
Figura 62 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RGV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	62
Figura 63 – Descodificação dos canais RGV sobre a radiação frontal.	63
Figura 64 – Descodificação dos canais RGV sobre a radiação posterior.	63
Figura 65 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RBV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	64
Figura 66 – Descodificação dos canais RBV sobre a radiação frontal.	65
Figura 67 – Descodificação dos canais RBV sobre a radiação posterior.	65
Figura 68 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais GBV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	66
Figura 69 – Descodificação dos canais GBV sobre a radiação frontal.	67
Figura 70 – Descodificação dos canais GBV sobre a radiação posterior.	67
Figura 71 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RGBV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.	68
Figura 72 – Descodificação dos canais RGBV sobre a radiação frontal.	69
Figura 73 – Descodificação dos canais RGBV sobre a radiação posterior.	69

Lista de tabelas

Tabela 1 – Análise espectral: comprimento de onda central, intensidade de pico e largura à meia altura.....	38
Tabela 2 – Ganhos dos canais individuais com radiação de fundo pelo lado frontal e posterior.	43
Tabela 3 – Definição das frequências de modulação para os canais de transmissão.	48
Tabela 4 – Combinações RGBV com base nas sequências padrão.....	48
Tabela 5 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal vermelho.	49
Tabela 6 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal verde.	50
Tabela 7 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal azul.....	51
Tabela 8 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal violeta.	52

Lista de acrónimos e termos

Acrónimo/termo	Descrição
a-Si:H	<i>Hydrogenated Amorphous Silicon</i>
a-SiC:H	<i>Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide</i>
AGC	<i>Asahi Glass</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
AWG	<i>Arrayed Waveguide Gratings</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
CYTOP	<i>Cyclic Transparent Optical Polymer</i>
DEMUX	<i>Demultiplexer</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
FTTH	<i>Fiber-to-the-Home</i>
GI	<i>Graded-index</i>
GIAMOS	Grupo de Investigação Aplicada em Microeletrónica, Optoeletrónica e Sensores
ID	Índice Degrau
IPTV	<i>IP Television</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
ITO	<i>Indium-Tin Oxide</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MC	<i>Multi Core</i>
MM	<i>Multi-mode</i>
MSI	<i>Multi Step Index</i>
MUX	<i>Multiplexer</i>
NA	<i>Numerical Aperture</i>
OADM	<i>Optical Add-drop Multiplexer</i>
PC	<i>PolyCarbonate</i>

PE	<i>PolyEthylene</i>
PF	<i>PerFluorinated</i>
PMMA	<i>Poli Metil Meta Acrilato</i>
POF	<i>Plastic Optical Fiber</i>
PS	<i>PolyStyrene</i>
PVC	<i>PolyVinyl Chloride</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SI	<i>Step-index</i>
SM	<i>Single-mode</i>
VOIP	<i>Voice Over IP</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

Capítulo 1 - Introdução

Atualmente, com o crescimento da tecnologia e das redes de telecomunicações, surge, a cada dia que passa, a necessidade de uma maior largura de banda na transmissão de dados. O crescimento do número de utilizadores de serviços de telecomunicações, tal como a dimensão dos dados transmitidos, levam a uma menor utilização dos cabos coaxiais e de pares entrelaçados, uma vez que estes apresentam um débito baixo.

A fibra ótica surge como meio de transmissão de dados, devido à sua enorme largura de banda e ao fato de não ser tão suscetível a interferências. As fibras óticas de sílica são o exemplo mais comum de fibra utilizado, no entanto, são também muito mais caras. Os elevados custos levam a uma procura de materiais mais baratos como o polímero. As fibras óticas de plástico, do inglês *Plastic Optical Fiber* (POF), são compostas pelo polímero e representam uma possível solução de mais baixo custo para o uso das fibras óticas.

As POFs não têm como objetivo substituir a fibra de sílica, uma vez que as suas características não são as melhores para transmissões a longa distância. No entanto, para curtas distâncias podem ser uma boa escolha. As POFs não sofrem interferência eletromagnética produzida pelos cabos de cobre, podendo ser instaladas junto dos mesmos. São mais leves e finas, flexíveis e resistentes, o que permite a sua instalação em ambientes apertados onde uma fibra de sílica não seria aplicável. Possuem uma abertura numérica maior que as de sílica, com um núcleo com valores compreendidos entre 120 e 1000 μ m.

As POFs são bastante utilizadas na indústria automóvel, dado que as suas características de resistência ao contacto com altas temperaturas são uma mais-valia. Podem, também, ser encontradas em algumas habitações, através da tecnologia *Fiber-to-the-Home* (FTTH), permitindo a interligação de residências e fornecimento de transmissão de dados, *Voice Over IP* (VOIP) e *IP Television* (IPTV).

Nas comunicações em fibra ótica, o WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é a tecnologia de multiplexagem que permite a transmissão de vários comprimentos de onda numa única fibra, fazendo uso de dois elementos indispensáveis: o *multiplexer* e o *demultiplexer*. Tem a vantagem de evitar instalação de mais fibras óticas, uma vez que suporta mais serviços e utilizadores. Este facto leva o WDM a ter uma alta velocidade de transmissão de dados (na ordem dos 40 a 100 Gbps).

A tecnologia WDM pode ser aplicada às POF. No entanto, as POF *standard* utilizam, apenas, um único canal. Assim, para aumentar a largura de banda para esta tecnologia é necessário aumentar a taxa de dados, o que reduz a relação sinal-ruído. As POF apresentam um comportamento de atenuação diferente com melhor eficiência no domínio da luz visível. Desta maneira, com a aplicação de dispositivos WDM no domínio visível do espectro eletromagnético consegue-se melhorar a largura de banda nas POF.

1.1. Enquadramento

A fibra ótica é utilizada como canal de transmissão nos sistemas de comunicação ótica, nestes sistemas são utilizados díodos LASER como emissor. Os canais de transmissão operam na região infravermelha do espectro eletromagnético, uma vez que as fibras óticas de sílica apresentam uma menor atenuação e dispersão. Utilizam o WDM para ter uma maior capacidade de transmissão na fibra ótica. Esta multiplexagem permite a transmissão simultânea de vários sinais, cada um com o seu comprimento de onda. Utiliza o *multiplexer* acoplado ao meio transmissor, de modo a juntar os vários sinais óticos na fibra e um *demultiplexer* junto aos equipamentos recetores para fazer a separação de cada comprimento de onda. [5]

A estrutura semicondutora apresentada nesta tese é baseada em fotodíodos PIN de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H) e funciona como filtro de cor na região do visível, ou seja, entre os 400nm e os 700nm. O comportamento deste filtro de cor é regulado pela polarização ótica que permite controlar a seletividade espectral do dispositivo relativamente ao canal de transmissão. Este modo de operação deve-se à existência de duas zonas com diferente coeficiente de absorção, podendo ser sintonizado através da variação da polarização elétrica aplicada ou através da variação da polarização ótica. [4]

As fibras óticas de plástico são utilizadas no domínio do espectro visível, pois sofrem uma menor atenuação. Estas fibras oferecem maior eficiência, flexibilidade e um custo menor, quando comparadas com as de sílica. Através destas características as POF pretendem implementar a sua utilização para as comunicações a curtas distâncias.

1.2. Objetivo

O presente trabalho utiliza um dispositivo composto por uma estrutura semicondutora baseada nos fotodíodos PIN de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H – *Hydrogenated Amorphous Silicon*) e silício de carbeto amorfo hidrogenado (a-SiC:H – *Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide*), com sensibilidade espectral na região do visível, isto é, entre os 400 nm e os 700 nm. É modulado pela tensão elétrica aplicada e pela polarização ótica adicional, ou seja, radiação de fundo.

Como fonte ótica utilizaram-se 4 LEDs (*Light Emitting Diode*) de cor diferente, os quais transmitem sinais de diferentes comprimentos de onda (violeta – 400nm, azul – 470nm, verde – 525nm e vermelho – 626nm).

Pretende-se efetuar o estudo do desempenho do dispositivo como *multiplexer/demultiplexer* dos sinais transmitidos pelos 4 LEDs, podendo estar os mesmos sujeitos a uma polarização ótica com ou sem radiação de fundo. Assim, é possível avaliar o desempenho do dispositivo como dispositivo WDM nas redes POF.

Recorreu-se ao uso das POF pelo facto de operarem na região do visível, ao contrário das fibras óticas convencionais que transmitem o sinal ótico no domínio do infravermelho.

Este trabalho surge no seguimento de outras dissertações realizadas anteriormente no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), onde se elaborou o estudo sobre o dispositivo apresentado. As conclusões tiradas servem como base para a pesquisa realizada para este trabalho.

1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, sendo que no primeiro é feita uma breve introdução ao tema, seguido de um enquadramento do mesmo. São definidos os objetivos e sintetizados os conceitos do WDM e transmissão de sinais utilizando dispositivos semicondutores.

O segundo capítulo aborda a técnica de multiplexagem WDM, o seu princípio de operação e as suas características. São apresentados os dispositivos de transmissão e sua aplicabilidade tendo em conta os seus dois elementos: o *multiplexer* e o *demultiplexer*. É apresentado o WDM, utilizando dispositivos semicondutores, tendo por base os resultados obtidos em trabalhos anteriores. Destaca-se a caracterização optoeletrónica do dispositivo sob diferentes condições de iluminação, variando os comprimentos de onda do sinal, a tensão de polarização e a iluminação de fundo.

No terceiro capítulo são abordadas as fibras óticas de plástico, a sua estrutura física e os materiais que a constituem. São apresentados conceitos sobre a transmissão de luz numa fibra ótica tais como a reflexão, a refração, o ângulo de aceitação numérica e a sua abertura numérica. Apresentam-se os tipos de fibras óticas de plástico existentes, os quais são classificados de acordo com o material constituinte, número de núcleos e distribuição do índice do núcleo. Explica-se, ainda, a influência da atenuação no meio de transmissão e a dispersão que um sinal sofre, sendo que esta pode ser classificada como intramodal ou intermodal.

O quarto capítulo faz a caracterização do dispositivo semicondutor, apresentando uma descrição do dispositivo e dos cenários experimentais usados para a caracterização optoeletrónica do dispositivo. São estudadas as fontes óticas e a sua influência no sinal de fotocorrente do

dispositivo quando se utilizam diferentes canais de transmissão. A análise realizada recorre a um conjunto de quatro LEDs com as cores vermelho, verde, azul e violeta. É estudado o comportamento individual de cada canal, quando sujeito à presença de radiação de fundo posterior e frontal. Com base nesta análise individual são calculados os ganhos óticos e realizada uma análise dos mesmos.

No quinto capítulo é feita a descrição do dispositivo semiconductor e analisados os sinais de fotocorrente WDM do dispositivo semiconductor. São utilizados quatro canais: o vermelho, verde, azul e violeta, sendo os mesmos submetidos à presença de uma radiação de fundo pelo lado frontal e posterior. Estes são emitidos numa configuração de canais individual e combinada. Na análise dos canais individuais é calculado o ganho ótico. Nos canais combinados é testada a descodificação da sequência binária transmitida.

Por último, o sexto capítulo apresenta as conclusões sobre o estudo realizado e apresentam-se sugestões de trabalho para desenvolver no futuro.

1.4. Referências bibliográficas

- [1] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, J. Costa, “Use of a-Si:H Photodiodes in Optical Communications Applications”, *Advances in Photodiodes*, 2010;
- [2] Pedro M. Soares, “Avaliação do desempenho das fibras óticas de plástico”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2012, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2189>;
- [3] M. Haupt, U. Fischer-Hirchert, "WDM Key Element in the visible spectrum for Standard SI-POF". *Fachhochschule Schmalkalden*, 2010;
- [4] J. O. Pinto, C. P. Machado, “DWDM em redes metropolitanas”, *CAT-Informática*, 2002;
- [5] H. Ferraz, “Fotodetector e dispositivo WDM integrados”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2012, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2180>;
- [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

O presente capítulo apresenta o WDM e as suas principais características. É abordada a evolução das tecnologias de multiplexagem, o princípio de funcionamento e as vantagens da sua utilização.

2.1. Introdução

O WDM aborda, de uma forma mais eficiente, as capacidades das fibras óticas, através da divisão pelo comprimento de onda, permitindo que vários sinais possam ser transmitidos na mesma fibra. Salienta-se que no WDM, a multiplexação é a capacidade de transmitir, num único suporte físico, dados provenientes de vários emissores. O *multiplexer* (MUX) é o equipamento que permite combinar os sinais que são provenientes dos emissores, para fazer a transmissão sobre o meio. O *demultiplexer* (DEMUX) tem a função inversa do *multiplexer*. [13]

O uso do WDM nos sistemas de transmissão em fibra ótica na região do infravermelho faz parte de uma solução existente no mercado com resultados e benefícios demonstrados. De modo a fazer face às limitações da largura de banda na “última milha”, tem-se vindo a optar pelo uso das POF. Estas apresentam melhores níveis de atenuação na região do visível e, por isso, é importante projetar dispositivos como o WDM. [14]

Os sistemas WDM podem ser classificados de acordo com o espaçamento dos comprimentos de onda multiplexados. Podem ser *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM) ou *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM).

O CWDM é uma tecnologia WDM de baixa densidade e o seu princípio de funcionamento é igual ao WDM. Utiliza um maior espaçamento de canais para permitir uma maior ocupação espectral, suportando poucos canais de transmissão. Exige menos controlo do comprimento de onda e tem uma elevada qualidade de serviço. Utiliza LASERS como transmissores e não necessita de amplificadores óticos. Possui uma flexibilidade suficiente para ser empregue numa conexão ponto-a-ponto. [13]

O DWDM é uma tecnologia WDM com um número de comprimentos de onda superior, pois tem um espaçamento menor entre eles, apresentando uma maior capacidade total. São sistemas que aumentam a complexidade da rede e introduzem novos desafios para testes e

equipamentos de medida. Possibilitam a adaptação do número de canais de acordo com as necessidades da rede. [10]

Atualmente existem equipamentos e operadoras de telecomunicações que possuem soluções híbridas entre o CWDM e o DWDM. Na parte mais próxima da rede de acesso é utilizado o CWDM e, na parte do núcleo, o DWDM.

2.2. Princípio de Operação

O WDM tem o objetivo de tornar a utilização das fibras óticas o mais eficiente possível, aumentando a capacidade de transmissão e conseqüentemente a largura de banda. O seu princípio consiste em juntar, numa única fibra ótica, vários sinais de luz com comprimentos de onda diferentes, sendo cada um gerado pelo seu dispositivo. O sistema utiliza um *multiplexer* no transmissor para juntar os sinais e enviá-los através da fibra ótica. Ao chegarem ao recetor, os sinais são separados e entregues. [13, 10]

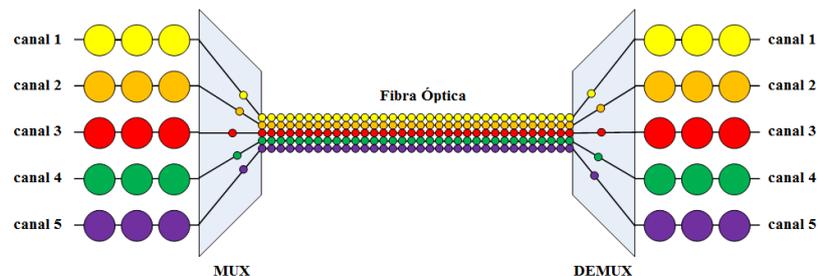


Figura 1 – Funcionamento do WDM, operação de multiplexação e desmultiplexação [11].

Na parte da transmissão, por norma, utilizam-se dois tipos de emissores: os *light amplification by stimulated emission radiation* (LASERS) ou os LED. Os LEDs apresentam uma larga largura espectral, sendo utilizados em comunicações de fibras óticas multimodo e adequados para taxas de transmissão menores que 1 Gb/s. Os LASERS são mais utilizados em fibras monomodo, sendo capazes de emitir comprimentos de onda precisos. Têm uma largura espectral inferior e uma potência elevada.

Para a receção são utilizados fotodíodos, sendo que os mais usados são os fotodíodos PIN e os fotodíodos de avalanche (APD). Os PIN apresentam um custo mais baixo e podem trabalhar com larguras de banda na ordem dos 10 GHz ou mais. Os APD têm uma maior sensibilidade e precisão, apresentando um custo mais elevado. [13]

2.3. Características

A tecnologia WDM suporta cada dia mais projetos de alto desempenho, tais como telemedicina, laboratórios remotos e ambientes corporativos. Por este motivo, o WDM utiliza

paralelamente algumas tecnologias de rede como o *multicast*, engenharia de tráfego e a qualidade de serviço (QoS). [1, 2]

A grande vantagem do WDM é o fato de não ser necessário tratar o sinal eletricamente para o amplificar e multiplexar, sendo tudo isto feito ópticamente, o que permite atingir grandes distâncias. Possui, ainda, um baixo custo e a possibilidade de modulação do aumento da capacidade de transmissão. [3]

O sistema WDM apresenta algumas das seguintes características:

- **Transparência:** Sendo o WDM uma arquitetura da camada física pode suportar, de forma transparente, os vários formatos de dados, tais como o *Asynchronous Transfer Mode* (ATM), *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH), *Gigabit Ethernet*, entre outros. Estes dados são transportados de maneira independente, levando a que cada um tenha a sua própria largura de banda.
- **Flexibilidade no aumento da capacidade:** A flexibilidade no aumento da capacidade surge com o intuito de ir ao encontro das necessidades de tráfego, podendo levar a uma migração na ordem de Mbps para Gbps. A migração pode ser realizada sem existir troca de amplificadores e *multiplexers*, preservando assim a rede existente. Representa uma forma muito eficiente de aumentar a largura de banda da rede.
- **Modular:** O sistema pode ser projetado para a transmissão de um determinado número de canais e ser expandido através da adição de novos equipamentos terminais.
- **Escalável:** O WDM pode tirar partido de recursos abundantes de redes de fibra numa dada região para satisfazer rapidamente necessidades de capacidade em ligações ponto-a-ponto.

2.4. Tipos de Dispositivos

Os sistemas WDM usados na faixa dos infravermelhos nas comunicações de longa distância precisam de combinar vários comprimentos de onda oriundos de diversas fontes emissoras e transmiti-los numa única fibra. Para que tal aconteça, o WDM utiliza dois elementos imprescindíveis: o MUX e o DEMUX. Os MUXs são responsáveis por combinar os vários sinais provenientes de fontes emissoras num único sinal. No receptor, o DEMUX separa os vários comprimentos de onda e faz o acoplamento às fibras individuais.

Os MUX e DEMUX podem ser classificados como passivos ou ativos. Os passivos são baseados no uso de prismas, redes de difração ou filtros. Os ativos baseiam-se no uso de filtros seletores do comprimento de onda. Estes dispositivos têm o objetivo de minimizar a diafonia (*cross-talk*), aumentando a separação entre eles.

Em seguida, são apresentados alguns dispositivos mais utilizados na multiplexação e desmultiplexação dos sinais.

a) Dispositivos baseados em *optical add-drop multiplexer (OADM)*

Existe um tipo de MUXs conhecido por *add-drop multiplexer*. Para além de executarem funções de MUX comum, permitem a remoção ou inserção de um ou mais comprimentos de onda em qualquer ponto ao longo deste período.

Todos os componentes de onda que passam pelo MUX *add-drop* têm uma pequena perda de potência. Estes dispositivos facilitam a evolução dos *links* óticos DWDM ponto-a-ponto, uma vez que os canais de transmissão têm a mesma origem e destino. [1]

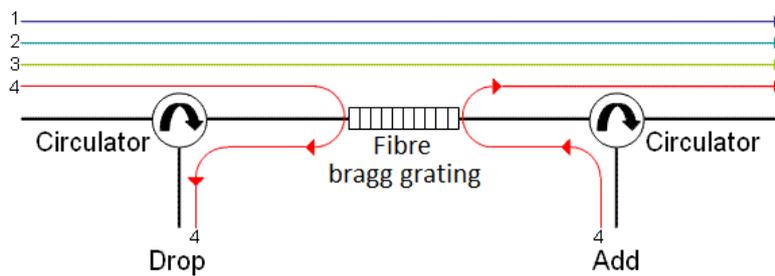


Figura 2 – *Optical add-drop multiplexer* [5].

b) Dispositivos baseados em um prisma

O prisma pode ser usado de modo a dividir a luz nas suas diversas componentes numa espécie de efeito arco-íris. Desta forma, é possível utilizar o prisma para desmultiplexar diferentes comprimentos de onda. Um dispositivo baseado em prismas utilizados nos sistemas de transmissão tradicional é bastante complexo.

A primeira lente utilizada produz um feixe de luz paralelo com os diversos comprimentos de onda. Cada canal é difratado num ângulo diferente através do prisma, sendo que cada comprimento de onda sai do prisma com diferentes direções. Fazendo uso de uma outra lente, os canais pode ser redirecionados para pontos desejados, onde é possível estar uma fibra ótica ou mesmo um detetor. [4]

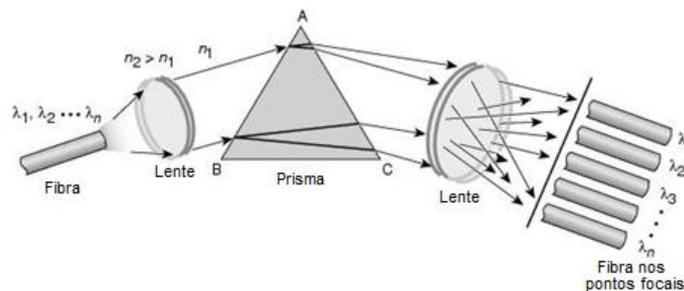


Figura 3 – Desmultiplexador baseado num prisma [6] (adap.).

c) Dispositivos baseados em filtros dielétricos

Os filtros dielétricos ou filtros multicamada são, por norma, fabricados com dois materiais diferentes (geralmente dielétricos), os quais têm índices de refração diferentes. Assim, é proporcionada uma alteração no índice de refração, o que faz com que uma parte da luz seja transmitida e outra refletida. As ondas transmitidas são as que sofrem interferência destrutiva pelas camadas, o que depende da largura da camada, dos índices de refração dos materiais e do ângulo de incidência da luz. Quanto maior for o número de camadas usadas no filtro maior é a resolução alcançada. Cada um dos filtros deixa passar, apenas, um comprimento de onda e reflete os restantes. Com o uso de mais filtros é possível filtrar todos os comprimentos de onda.

Estes dispositivos apresentam um projeto complexo, uma vez que a luz tem de ser extraída, focada através da lente, passada pelo filtro e introduzida na fibra. Este processo torna difícil o acoplamento destes dispositivos à fibra e é uma solução relativamente dispendiosa. [4]

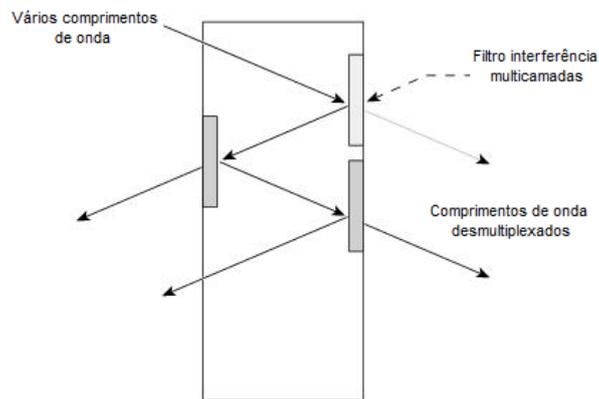


Figura 4 – Dispositivo desmultiplexador baseado em filtros interferentes [6] (adapt.).

Numa aplicação prática de sistema baseado nesta tecnologia, a ordem com que se inserem os comprimentos de onda no MUX e a ordem de extração no DEMUX deve ser inversa uma da outra, de modo a existir um equilíbrio de potência ótica entre os comprimentos de onda na receção.

d) Dispositivos baseados em grelhas de Bragg

As grelhas de Bragg filtram o comprimento de onda desejado, deixando que os restantes passem. Pode-se dizer que funcionam como filtros óticos. Têm uma implementação bastante usual nos sistemas de transmissão por fibra ótica, devido ao seu fácil acoplamento. A sua maior dificuldade é a reflexão da luz, a qual pode danificar a fonte ótica. No entanto, esta dificuldade pode ser contornada através de circuladores óticos.

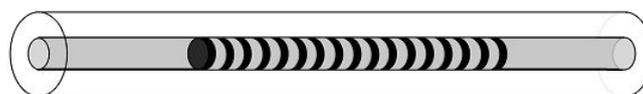


Figura 5 – Dispositivo baseado em grelhas de Bragg [7].

e) Dispositivos baseados em interferómetros de *Mach-Zehnder*

Recorrendo a acopladores direcionais de 3dB é possível obter-se um interferómetro de *Mach-Zehnder*. Basta, para isso, ligar-se as guias de saída do acoplador direcional às guias de entrada de outro acoplador direcional. Este dispositivo é bastante seletivo com o comprimento de onda quando o caminho ótico que liga os dois acopladores não é igual, isto é, quando não está balanceado. [4]

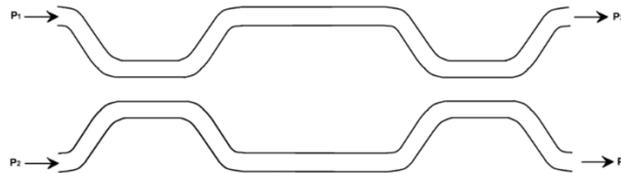


Figura 6 – Interferómetro de *Mach-Zehnder*.

f) Dispositivos baseados em grelhas de difração

Os dispositivos baseados nas grelhas de difração têm um princípio de funcionamento idêntico ao do prisma, uma vez que separam a luz incidente de acordo com o comprimento de onda. No entanto, nestes dispositivos, a capacidade de separação é superior.

Tal como o nome indica, esta técnica tem por base os princípios da difração e interferência ótica, onde cada comprimento de onda é composto por um feixe de luz policromática que, ao incidir numa grelha de difração, é difratado em diferentes ângulos. De modo a focar estes feixes dentro da fibra, são utilizadas lentes.

Por norma, estes dispositivos funcionam apenas nos sistemas WDM, uma vez que a separação dos canais com comprimentos de onda próximos é ineficiente. Esta desvantagem acaba por ser tornar numa vantagem quando utilizada para instrumentação de medidas, pois, assim, a ineficiente separação permite medir toda a banda espectral. [2, 8]



Figura 7 – Dispositivo baseado em grelhas de difração [6] (adap.).

g) Dispositivos baseados em *Arrayed Waveguide Gratings*

Os *arrayed waveguide*, usualmente conhecidos como AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*), são dispositivos que se baseiam, também, nos princípios de difração. Estes sistemas

consistem numa matriz com canais curvos onde existe uma diferença fixa no caminho entre os canais adjacentes. Os AWGs são conectados aos terminais de entrada e saída, tanto na emissão como na receção. O feixe luminoso policromático vai incidir no terminal de entrada do AWG e é difratado dividindo a luz nos guias de onda da matriz. Na matriz os guias de onda curvos fazem a luz percorrer distâncias diferentes, sendo que a diferença do comprimento de onda ótico produz uma diferença de fase no terminal da saída, isto quando montado numa matriz de fibras coletoras. O resultado são diferentes comprimentos de onda com máximos de interferência em diferentes lugares correspondentes às portas de saída. [2]

Os AWGs por norma são caros e apresentam uma perda considerável relativamente a outras técnicas de DEMUX, no entanto, têm a vantagem de poder desmultiplexar um grande número de canais num único dispositivo.

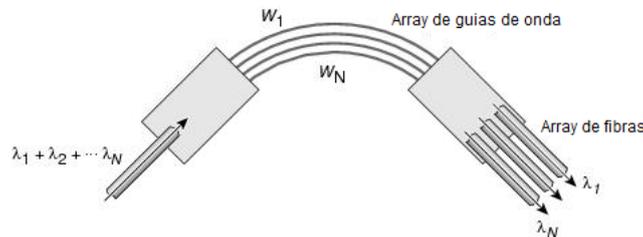


Figura 8 – Dispositivo baseado em AWG [6] (adap.).

2.5. WDM baseado em semicondutores

A presente secção apresenta o conhecimento atual sobre a utilização do dispositivo semiconductor para realizar a desmultiplexagem na região do visível.

Existe, no ISEL, um grupo de investigação, denominado Grupo de Investigação Aplicada em Microeletrónica, Optoeletrónica e Sensores (GIAMOS), cuja linha de investigação atual se centra na utilização de dispositivos semicondutores para aplicação como dispositivo WDM na região do espectro visível. Nestes trabalhos foram analisadas diversas estruturas semicondutoras baseadas nos fotodíodos PIN de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H e/ou a-SiC:H). Estudada a influência da tensão de polarização na resposta espectral do dispositivo, tal como a possibilidade de efetuar desmultiplexagem dos sinais transmitidos.

2.5.1. Estrutura do dispositivo

As estruturas do dispositivo são compostas por várias camadas: uma camada de vidro (substrato) na qual incidem os múltiplos canais monocromáticos, um eléctrodo transparente frontal (Índium-Tin Oxide, ITO), a estrutura semicondutora PIN-PIN e, por último, um eléctrodo transparente posterior. As camadas dopadas dos dois fotodíodos PIN têm uma espessura de 20nm.

Neste trabalho é analisada a estrutura NC5, a qual consiste num semiconductor com duas zonas de características distintas: um fotodíodo PIN frontal que tem, por base, um a-SiC:H, e um fotodíodo PIN posterior baseado em a-Si:H. O fotodíodo frontal é adequado para a deteção dos sinais compreendidos entre os 400nm e os 590nm, com um valor máximo que ronda os 470nm, sendo que acima dos 590nm, não é possível obter qualquer resposta espectral. Assim, o fotodíodo frontal é indicado para absorver o violeta (400nm), o azul (470nm) e o verde (525nm). O fotodíodo posterior obtém um valor máximo de fotocorrente em torno dos 600nm e deixa de gerar fotocorrente acima dos 700nm. Este fotodíodo é indicado para absorver o vermelho (626nm). Concluindo, os fotodíodos agem como filtros óticos, confinando o canal violeta, azul e vermelho, sendo que o canal verde é absorvido por ambos. [9]

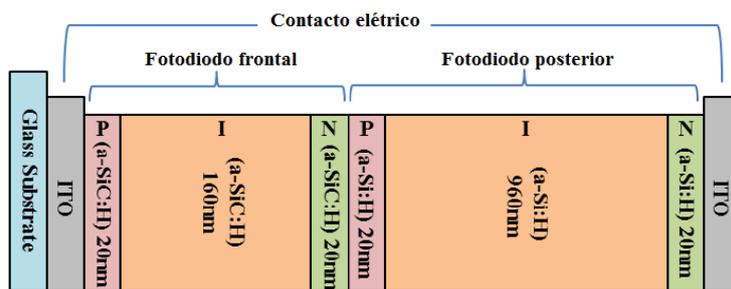


Figura 9 – Estrutura do dispositivo semiconductor [10] (adap.).

2.5.2. Influência da tensão na resposta espectral

O dispositivo foi caracterizado pela análise da resposta espectral entre 400nm e 800nm, tendo-se, para o efeito, realizado as medidas da variação da fotocorrente com o comprimento de onda sobre diferentes tensões de polarização (-10V a +2V, Figura 10) e variando a frequência do sinal incidente (15Hz a 2000Hz, Figura 11).

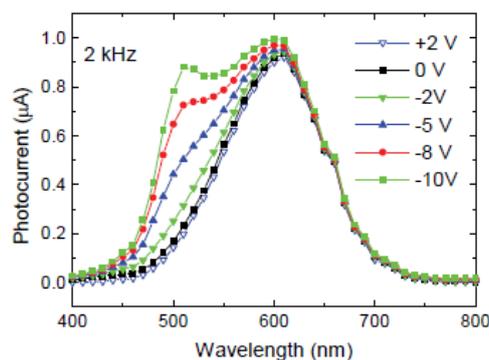


Figura 10 – Resposta espectral para diferentes valores de tensão de polarização [9].

Através da resposta espectral apresentada na Figura 10, pode verificar-se que o valor de fotocorrente aumenta com o comprimento de onda do sinal incidente até um valor máximo de 600nm, valor no qual começa a decrescer. Verifica-se que o dispositivo gera mais fotocorrente para valores de polarização inversa, tendo sido definido um valor de tensão ideal de -8V.

Constata-se que, para comprimentos de onda acima dos 600nm, o sinal de fotocorrente obtido é independente da tensão aplicada, enquanto para os valores abaixo dos 600nm se verifica uma grande dependência da tensão aplicada.

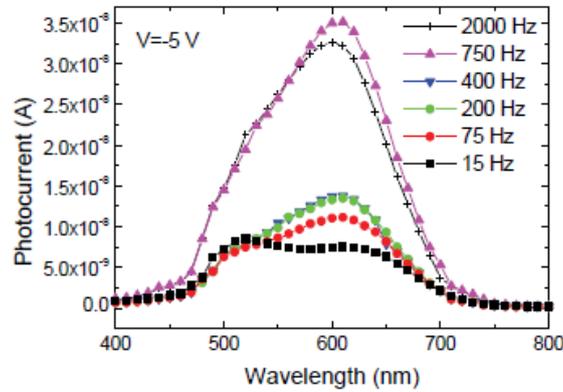


Figura 11 – Resposta espectral para diferentes frequências do sinal incidente [9].

Na resposta espectral da Figura 11 observa-se que o dispositivo gera uma maior fotocorrente através do aumento da frequência do sinal incidente, atingindo o máximo nos 750Hz. No entanto, até aos 400Hz a fotocorrente é relativamente baixa e constante nos comprimentos de onda mais baixos (400nm a 530nm), sendo que acima dos 750Hz a fotocorrente volta a decrescer. Salienta-se que, para as variações entre o sinal medido a 750Hz e 2000Hz, são mais notórias nos comprimentos de onda em torno dos 600nm. [10]

2.5.3. Resposta espectral do dispositivo

De modo a analisar a influência do dispositivo na resposta espectral, utilizaram-se três canais RGB monocromáticos. Definiu-se uma potência ótica de $19\mu\text{W}/\text{cm}^2$ e obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 12.

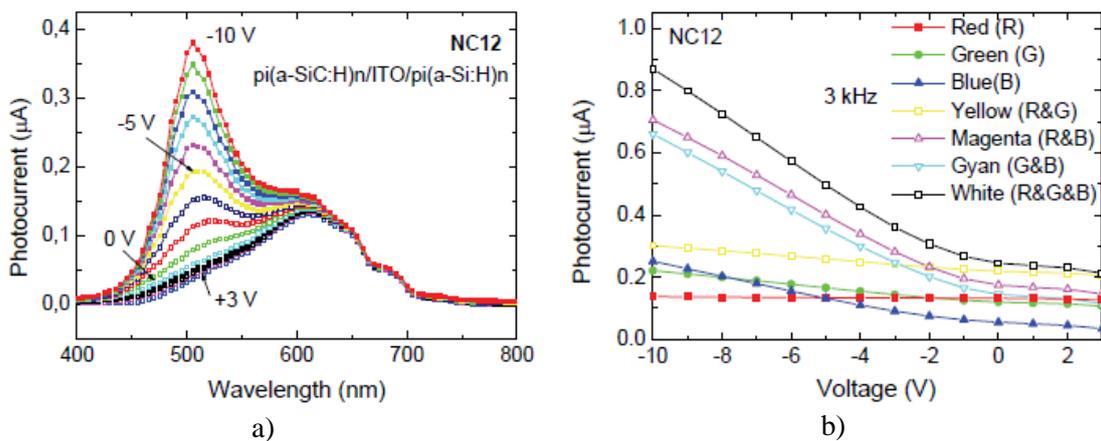


Figura 12 – a) Resposta espectral com diferentes valores de polarização; b) Características da fotocorrente-tensão para os diversos comprimentos de onda medida com LEDs de alto brilho. [9]

Através da Figura 12 – a), conclui-se que, na resposta espectral, o dispositivo apresenta um pico de fotocorrente próximo dos 500nm, existindo uma forte dependência da fotocorrente

gerada com a tensão de polarização aplicada através do efeito do fotodíodo frontal. A contribuição do fotodíodo posterior leva os comprimentos de onda próximos dos 600nm a uma menor variação da fotocorrente quando existe variação da tensão de polarização. Verifica-se uma dependência dos vários comprimentos de onda face a fotocorrente gerada, sendo esta mais acentuada nos comprimentos inferiores, isto é, o azul e o verde. Existe uma fraca dependência da fotocorrente nos comprimentos superiores, isto é, na cor vermelha.

Na Figura 12 – b), verifica-se o comportamento da estrutura face a cada comprimento de onda. A resposta face à iluminação com cor vermelha é independente do valor da tensão aplicada, sendo que o mesmo não acontece com a cor azul e verde. Nas combinações compostas, o valor da fotocorrente é superior aos valores individuais de cada uma, onde a combinação RGB obtém o valor mais alto. A presença da cor verde sob a polarização inversa tem um comportamento semelhante ao da cor azul, mas sob polarização direta é semelhante à cor vermelha. Com a contribuição individual de cada fotodíodo, confirma-se que os fotodíodos frontal e posterior atuam como filtros óticos nas regiões do espectro da cor azul e vermelho. [9, 12]

A Figura 13 apresenta a variação da fotocorrente através da aplicação de diferentes valores de polarização e a característica fotocorrente-tensão dos diversos comprimentos de onda de cada uma das estruturas PIN que constituem o dispositivo PIN-PIN.

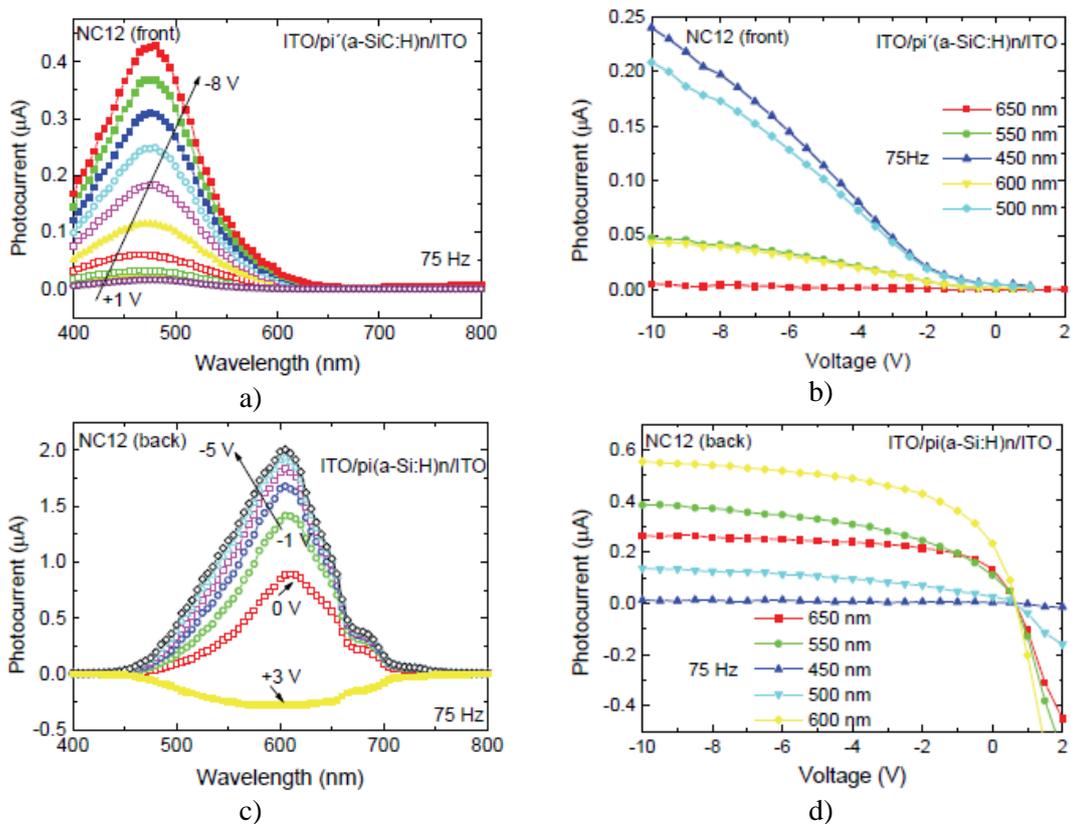


Figura 13 – Variação da fotocorrente aplicada sob diferentes polarizações. **a, c)** dependência da fotocorrente com a tensão aplicada em função do comprimento de onda para os fotodíodos frontal e posterior; **b, d)** característica corrente-tensão do fotodíodo frontal e posterior.

Estes resultados confirmam que, tanto o fotodíodo frontal como o posterior funcionam como filtros óticos nas regiões do espectro azul e vermelho. Cada fotodíodo apresenta as respostas típicas como uma única estrutura PIN.

2.5.4. Dispositivo WDM controlado pela tensão

Foi estudado o efeito da tensão de polarização ($-5V < V < +2V$) sobre o sinal de saída, tendo por base o funcionamento do dispositivo como desmultiplexador.

A Figura 14 apresenta a leitura de sinais de fotocorrente gerada através do efeito simultâneo de um, dois ou três canais monocromáticos (RGB), medida sob diferentes tensões aplicadas. Na parte superior de cada figura são apresentados os canais individuais dos LEDs que resultam no sinal multiplexado.

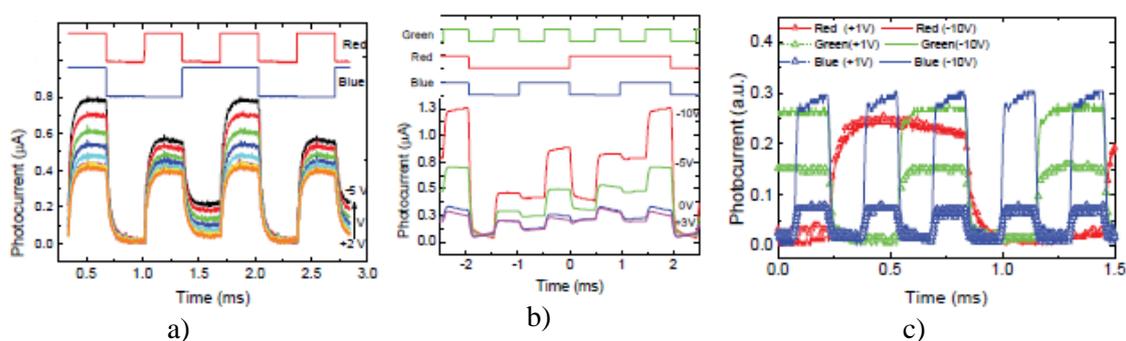


Figura 14 – Sinais multiplexados com a tensão de polarização. a) 2 canais: vermelho e azul, b) 3 canais: vermelho, verde e azul, c) dependência do comprimento de onda dos canais de entrada com a tensão de polarização [9].

Na Figura 14 – a) pode-se visualizar a multiplexagem do canal azul e vermelho com as frequências 750Hz e 1500Hz, respetivamente. Garante-se as quatro combinações possíveis, correspondentes aos dois canais a OFF, apenas o canal vermelho a ON, apenas o canal vermelho a OFF e ambos os canais a ON. O nível de fotocorrente mais elevado ocorre quando ambos os canais se encontram a ON, e o mais baixo quando ambos estão a OFF. Quando existe apenas um canal ligado, o canal vermelho apresenta valores maiores que o azul. Verifica-se, ainda, que quando o sinal se encontra multiplexado, são apresentados valores superiores de fotocorrente quando a tensão aplicada converge para valores negativos, em especial na presença da cor azul.

A Figura 14 – b) apresenta a combinação dos canais RGB com diferentes valores de tensão aplicadas que vão desde -10V a +3V. Ao aplicar-se uma tensão de -10V observam-se oito níveis distintos de fotocorrente que correspondem a cada um dos canais. Com a diminuição da tensão aplicada, a fotocorrente tende a baixar. Quando se aplica uma tensão de +3V existe uma atenuação da cor azul e o sinal deixa de apresentar os oito níveis de fotocorrente distintos.

Com a aplicação de uma luz monocromática, os valores de fotocorrente são superiores para o canal azul, depois para o canal verde, e por fim, para o vermelho. Os maiores valores de

fotocorrente sob iluminação de duas luzes monocromáticas são obtidos para o verde e azul, posteriormente para vermelho e azul e, por último, para o vermelho e verde.

A Figura 14 – c) apresenta a dependência dos sinais individuais com a tensão de polarização. O canal vermelho mantém-se praticamente inalterado com a variação da tensão, sendo que o canal azul e verde diminuem com o aumento da tensão.

Pode concluir-se que o sinal multiplexado depende da tensão aplicada, do comprimento de onda e de cada transmissão de dados de cada canal de entrada. Através da polarização inversa podem existir oito níveis distintos, dependendo do número dos canais de entrada. [9]

A Figura 15 apresenta os sinais multiplexados sob polarização inversa e direta, obtida com sequências de bit RGB e com uma taxa de bit de 2 kbps.

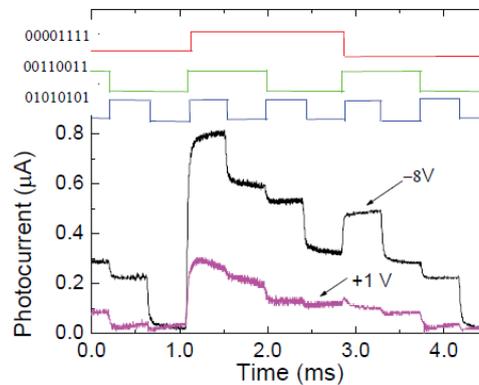


Figura 15 – Variação dos sinais multiplexados com a tensão de polarização [9].

Verifica-se que existe uma relação síncrona de ON-OFF nos estados ao longo de cada ciclo. A fotocorrente sob polarização inversa apresenta oito níveis diferentes que correspondem a diferentes estados de cada polarização ótica. Com o aumento da tensão de polarização, os diferentes níveis que contêm a cor azul ficam menos definidos, o que dificulta a detecção e decodificação dos sinais de entrada. O resultado combinado dos sinais multiplexados pode ser utilizado para identificar os canais de entrada fazendo uso do sinal de fotocorrente obtida sob os sinais do fotodíodo frontal e posterior, comparando a amplitude da variação em cada estado ótico.

2.5.5. Influência da taxa de transmissão

Um dos fatores a ter em conta no processo de desmultiplexagem é a influência da taxa de transmissão do sinal. A Figura 16 apresenta os sinais adquiridos na presença de dois sinais de entrada, vermelho e verde sob diferentes valores de modulação (1 kHz, 10 kHz e 100 kHz) e com uma tensão de polarização de -5V. No topo da figura é apresentada a sequência de bits do sinal de entrada.

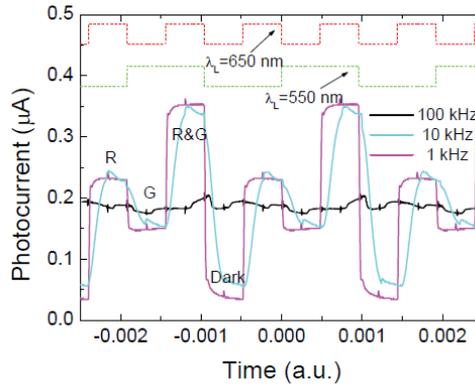


Figura 16 – Multiplexação por divisão de comprimento de onda a -5V sob diferentes frequências de modulação [9].

Verifica-se que, para a maior frequência de modulação (100 kHz), o sinal aparece distorcido, ou seja, os níveis de fotocorrente não se encontram bem definidos. Para a menor frequência (1 kHz), os níveis de fotocorrente já são perceptíveis. Com esta análise é possível definir os limites das frequências para as quais o dispositivo tem um comportamento indesejado.

O sinal multiplexado mostra que, em cada ciclo, ao aplicar frequências diferentes, se verifica a presença de quatro níveis de fotocorrente.

2.5.6. Influência da potência ótica incidente

De modo a identificar os diferentes canais de entrada, é necessário proceder a uma calibração do sinal de transmissão, tendo em vista o conhecimento da resposta dispositivo para cada sinal. Uma vez que a atenuação do sinal no meio de transmissão causa uma redução da intensidade ótica, foi necessário analisar este efeito. O sinal multiplexado foi adquirido com sinais de entrada de intensidade ótica diferentes, isto é, a -8V e a +1V. A Figura 17 apresenta a saída da variação da fotocorrente com a polarização ótica medida para cada canal ótico.

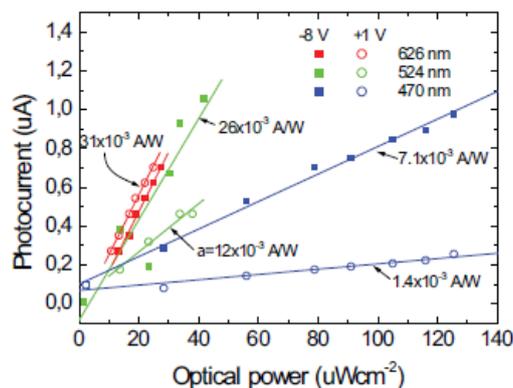


Figura 17 – Variação da fotocorrente com a polarização ótica medida para cada canal ótico [9].

Observa-se que, sobre o canal vermelho, a amplitude do sinal multiplexado é quase independente da polarização aplicada. A amplitude cresce com a intensidade da potência ótica, tendo um comportamento linear. Com o canal verde e azul, a dependência da tensão de

polarização é maior que no canal vermelho. A fotocorrente aumenta com a intensidade ótica de cada canal, tanto na polarização direta como na inversa. A taxa de crescimento depende da tensão aplicada, sendo maior sob a polarização inversa.

2.5.7. Influência da polarização ótica na resposta espectral

Outro fator estudado foi a influência da existência da polarização ótica na resposta espectral. A Figura 18 apresenta a variação da fotocorrente com os diversos comprimentos de onda sob uma polarização inversa e direta, tendo a polarização ótica no sensor vermelho (a), verde (b), azul (c) e sem polarização de fundo (d).

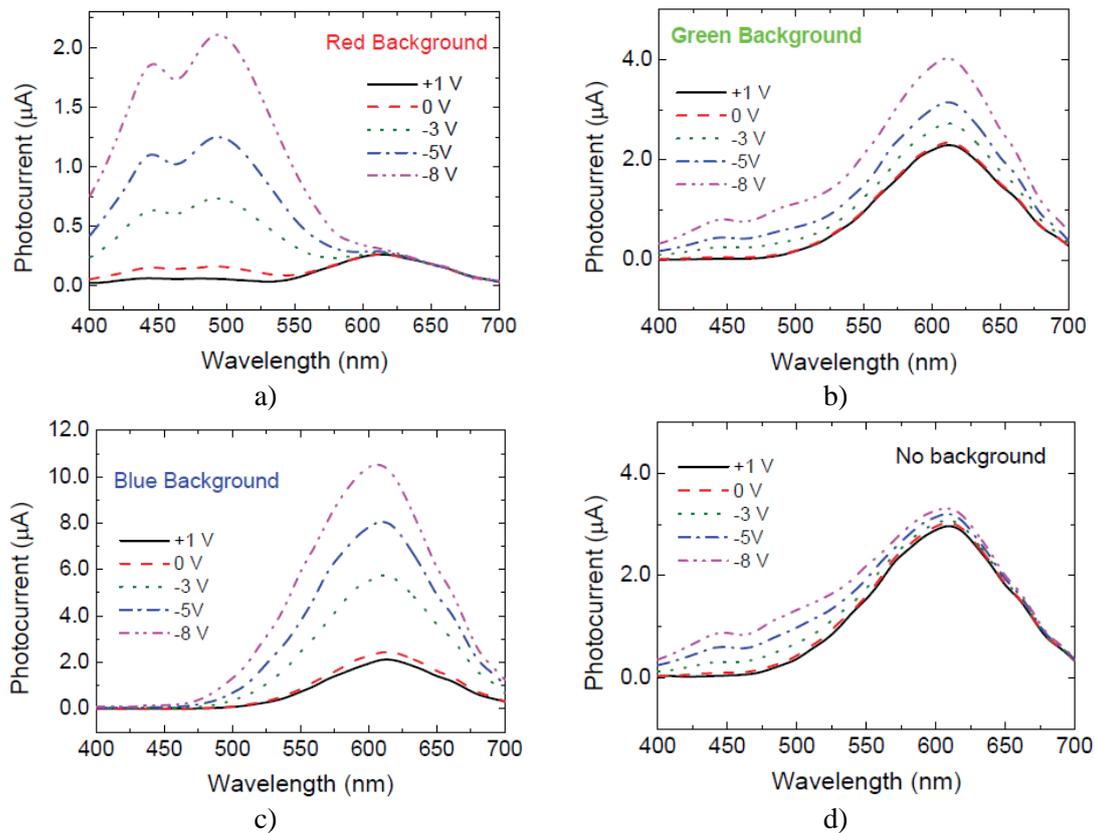


Figura 18 – Fotocorrente espectral sob polarização inversa e direta, aplicando as radiações óticas com o fundo. a) vermelho, b) verde, c) azul, d) sem polarização de fundo [9].

Observa-se que, com a polarização no sensor azul, a sensibilidade espectral aumenta na faixa dos comprimentos de onda longos. No entanto, com a polarização aplicada no fundo vermelho observa-se o comportamento oposto, uma vez que a sensibilidade espectral só aumenta na faixa de comprimentos de onda curtos. Com a polarização no sensor verde, a fotocorrente aumenta com a tensão aplicada em todos os comprimentos de onda.

Na Figura 19 visualiza-se o sinal de fotocorrente em função do comprimento de onda medido sob polarização elétrica inversa e direta, com e sem radiação de fundo.

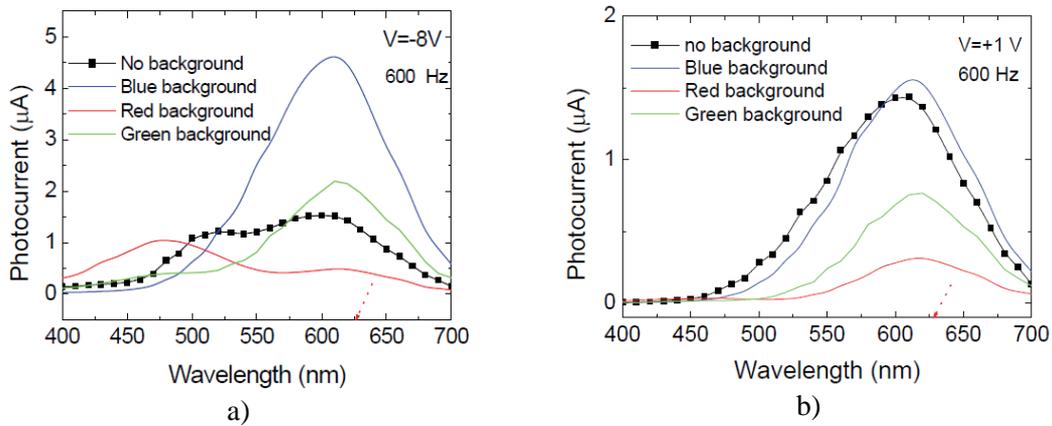


Figura 19 – Fotocorrente espectral a uma frequência de 600Hz. a) polarização inversa com e sem radiação de fundo, b) polarização direta com e sem radiação de fundo [9].

Verifica-se que, sob a polarização ótica do canal azul, existe um aumento da sensibilidade espectral nas faixas do comprimento de onda longo e uma redução na zona do comprimento de onda curto. Com a polarização ótica no canal vermelho existe um efeito oposto, isto é, uma redução da corrente na região do vermelho e verde. Verifica-se uma amplificação na zona do azul. Aplicando a polarização ótica no canal verde, existe uma redução dos comprimentos de onda intermédios, mantendo os outros inalterados. A dependência da tensão de polarização e da polarização ótica através da radiação de fundo controla a luz e permite a variação da sensibilidade espectral do dispositivo.

A Figura 20 apresenta a razão entre a fotocorrente com e sem radiação de fundo no canal vermelho, verde e azul.

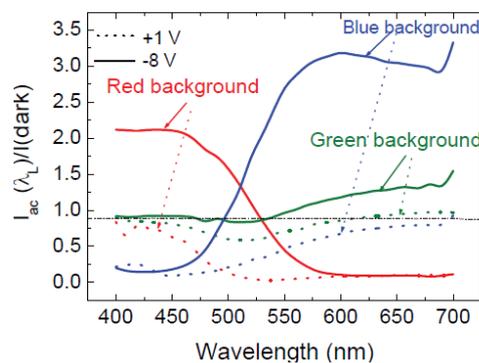


Figura 20 – Razão entre a fotocorrente com e sem radiação de fundo [9].

Verifica-se que, com a polarização inversa e abaixo dos 500nm, o sinal é amplificado pelo fundo vermelho. Para comprimentos de onda superiores, o sinal é amplificado pelo fundo azul e atenuado pelo vermelho. A razão de amplificação no fundo vermelho é inferior à razão de amplificação para o fundo azul. O fundo verde nos comprimentos de onda curtos não têm influência, mas nos comprimentos de onda longos têm uma ligeira amplificação.

Com a polarização direta, o fundo vermelho atenua qualquer comprimento de onda, sendo mais relevante nos comprimentos de onda a partir dos 500nm. Nos comprimentos de onda superiores a 600nm o sinal é amplificado ligeiramente pelos fundos verde e azul.

2.6. Referências bibliográficas

- [1] S. P. Silva, “Apostila de DWDM”, Florianópolis, 2006;
- [2] http://www.gta.ufrj.br/grad/04_1/wdm/work.html, consultado em 05.06.2014;
- [3] N. Massa, "Fiber Optic Telecommunication," University of Connecticut, Massachusetts, 2000;
- [4] D. Bischoff, “Wavelength multiplexing: WDM and DWDM systems”, Essay, 2009;
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_add-drop_multiplexer, consultado em 05.06.2014;
- [6] http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/optical/15000r7_0/dwdm/planning/guide/70epg.pdf, consultado em 05.06.2014;
- [7] <http://lunainc.com/products/fiber-optic-testing-solutions/about-optical-technology/about-distributed-sensing-technology/>, consultado em 05.06.2014;
- [8] G. P. Agrawal, “Fiber Optic Communications System”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Kai Chang – Series Editor, 1997;
- [9] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, J. Costa, "Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications". *Advances in Photodiodes*, 2010;
- [10] H. Ferraz, “Fotodetector e dispositivo WDM integrados”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2012, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2180>;
- [11] http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/multiplexage.html, consultado em 05.06.2014;
- [12] V. A. Manuel, M. Vieira, J. Costa, P. Louro, M. Fernandes, and A. Fantoni, "Double Pin Photodiodes with Two Optical Gate Connections for Light Triggering: A Capacitive Two-phototransistor Model," in *Sensors & Transducers Journal*, Belgium: Sensors Portal, 2011;
- [13] T. A. Silva, "Implementação de WDM com dispositivos semicondutores”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2011, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/1238>;
- [14] J. Reis, “Implementação de WDM com 4 canais no espectro do visível”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2013, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/3298>;

[15] Jean-Pierre Laude, “DWDM, Fundamentals, Components and Applications”, Artech House, 2002;

[16] William S. C. Chang, “Principles of Lasers and Optics” Cambridge 2007.

Capítulo 3 – Fibras Óticas de Plástico

Este capítulo apresenta as fibras óticas de plástico (POF), apresentando uma noção da sua estrutura, materiais utilizados, propagação da luz e os diversos tipos de POF. É abordada, também, a atenuação e a dispersão.

3.1. Introdução

A POF é um tipo de fibra ótica composta, essencialmente, por plástico. Contém um núcleo de *polimetil-metacrilato* e um revestimento de polímeros fluorados. Devido à sua composição plástica, é vista como uma alternativa menos dispendiosa à fibra ótica tradicional, para além de vários outros benefícios.

As POF surgem com a necessidade de transmissão de dados com débitos elevados, uma vez que estes têm vindo a crescer, assim como o número de utilizadores. Os meios de cabos metálicos apresentam algumas limitações e problemas, principalmente em transferências de dados em distâncias curtas. Os pares entrelaçados são uma opção económica, mas o seu alcance é limitado, bem como a largura de banda e o seu ritmo de transmissão. Estão sujeitos, inclusive, a interferências eletromagnéticas externas. No Cabo Coaxial verificam-se limitações ao nível de atenuação, ruído térmico e ruído de intermodulação. A fibra ótica de sílica veio resolver estes problemas, devido à sua capacidade elevada de transmissão de dados e alta transparência ótica, contudo, o seu custo elevado e a sua manipulação complexa são contrapartidas que, ainda hoje, se fazem presentes, devido aos equipamentos caros e recursos humanos especializados.

As POF começaram a chamar a atenção das áreas comerciais e científicas, devido à sua facilidade de instalação, baixo custo e não-exigência de técnicos especialistas no seu manuseio. No entanto, estas não surgem com o intuito de substituir as fibras óticas de sílica, uma vez que não são adequadas para transmissão a longa distância.

3.2. Estrutura física

As fibras óticas de plástico são guias altamente flexíveis compostas por materiais dielétricos quase transparentes (neste caso, por plástico). Diferenciam-se das fibras óticas usuais por serem construídas por material polimérico, por apresentarem um núcleo muito maior e por suportarem maior tensão mecânica.

Os materiais poliméricos utilizados para o seu fabrico são o poliestireno (PS), o poli metil meta acrilato (PMMA), o fluorpolímero (PF), o policarbonato (PC) e outros derivados de poliolefinas. Comercialmente, o mais utilizado é o PMMA.

Tendo uma estrutura de base cilíndrica, uma POF apresenta uma região central (núcleo), uma cobertura dessa mesma região central (bainha) e, ainda, uma proteção que garante a robustez do cabo e a segurança do interior (capa protetora). A bainha é, geralmente, feita de polietileno (PE) e pode ter, por vezes, um revestimento. A capa protetora é feita, usualmente, de policloreto de vinil (PVC). Esta estrutura é demonstrada através da Figura 21.

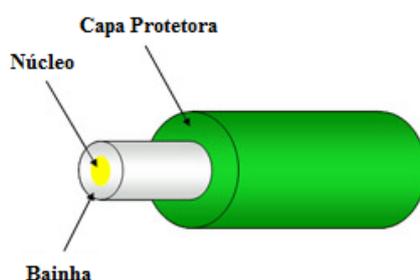


Figura 21 – Estrutura física de uma POF.

3.3. Materiais constituintes

O material mais utilizado na produção das POF é o PMMA mais conhecido por Plexiglas. O PMMA apresenta um índice de refração típico de 1,49 e a temperatura de transição vítrea situa-se entre os 95°C a 125°C. À temperatura ambiente e em atmosferas com 50% de humidade relativa, o material pode absorver até 1,5% de água.

Apresenta uma absorção máxima aos 620nm, tendo um coeficiente de atenuação de 440dB/km. Neste espectro, as janelas de transmissão situam-se em comprimentos de onda de 530, 570 e 650nm. As perdas típicas de 90dB/km para os 650nm e de 90dB/km para os 530nm e 570nm limitam a utilização da fibra a 100 metros.

Outro material utilizado nas fibras é o policarbonato (PC), inicialmente introduzido pela *Fujitsu*. No início, apresentava uma atenuação de cerca de 800 dB/km a 660nm e de 450 dB/km a 770nm com uma temperatura de operação máxima de 130°C. Mais tarde, a Asahi introduz outra fibra PC com uma atenuação de 600 dB/km a 600nm, a operar numa temperatura máxima de 125°C. A abertura numérica relativamente grande das fibras PC é explicada pelo elevado índice de refração com cerca de 1,58. A sua maior desvantagem deve-se à fraca estabilidade quando opera em ambientes com humidade [3].

Existe, também, o poliestireno (PS), que tem, teoricamente, uma atenuação mais baixa que o PMMA. Inicialmente possuía uma atenuação de mais de 1000 dB/km. No entanto, foi

A Figura 23 apresenta um raio incidente com um ângulo θ_1 a ser refratado com um ângulo θ_2 relativo à normal do ponto de incidência num meio transparente mais refringente. Parte da luz é, por sua vez, refletida na interface entre os dois meios com um ângulo θ_{1r} .

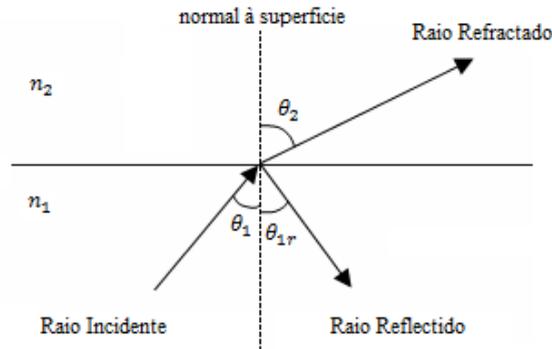


Figura 23 – Reflexão e refração do raio de luz na interface entre dois meios.

A refração é dada pela lei de Snell,

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \quad (3.2)$$

Através da lei de Snell é possível calcular o ângulo crítico,

$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right) * \sin \theta \right] \quad (3.3)$$

Se,

$$\theta_2 = 90^\circ, \text{ temos } \sin \theta_2 = 1 \quad (3.4)$$

Logo, o ângulo crítico é dado por,

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3.5)$$

3.4.2. Ângulo de aceitação

A fibra ótica é constituída por um núcleo com o índice de refração n_1 envolvido em uma bainha cujo índice de refração é n_2 . Considerando uma fonte de luz na entrada da fibra ótica, apenas os raios com ângulos inferiores ao ângulo de aceitação (θ_a) são propagados pelo interior da fibra ótica. Considerando o índice de refração do meio externo (n_0),

$$\theta_a = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \right) \quad (3.6)$$

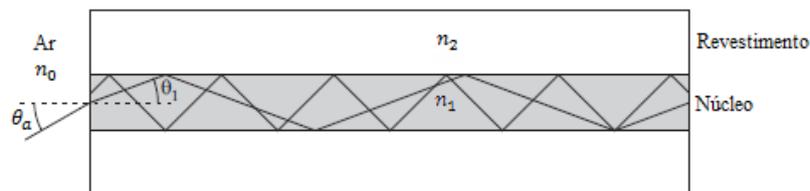


Figura 24 – Propagação dos raios de luz na fibra ótica com a reflexão total [1] (adap.).

3.4.3. Abertura Numérica

A abertura numérica (NA) é a medida da quantidade de luz recebida ou emitida através de um sistema ótico, seja ele uma fibra ótica, lente ou objetiva microscópica.

$$NA = n_0 * \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.7)$$

Considerando $n_0 = 1$,

$$NA = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 * \sqrt{2 * \Delta} \quad (3.8)$$

Relativamente às outras fibras óticas, as POF apresentam uma maior abertura numérica e um maior diâmetro no núcleo. Este pormenor traz uma grande vantagem as POF, uma vez que a conexão do cabo aos conectores é mais económica comparada com as GOF. Permite, ainda, uma maior capacidade para receber luz, facilitando o acoplamento a uma fonte ótica.

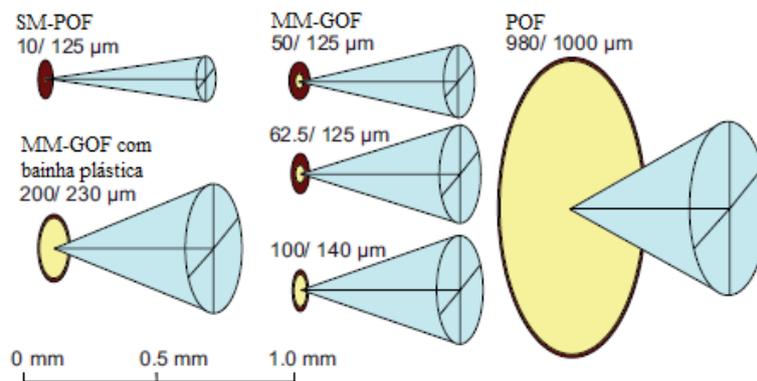


Figura 25 – Ângulo de abertura e diâmetro do núcleo de GOF e POF [3] (adap.).

3.5. Tipos de fibras óticas de plástico

Os vários tipos de POF podem ser classificados segundo vários critérios, tais como: material constituinte, número de núcleos, distribuição do índice de refração do núcleo, entre outros.

3.5.1. Monomodo e multimodo

Do ponto de vista de propagação de luz, as POF podem ser classificadas em dois regimes: monomodo (SM) e multimodo (MM). A fronteira entre estes dois tipos de fibra é determinada através do parâmetro V , designado por frequência normalizada. Este depende do raio do núcleo (a), do comprimento de onda (λ) e da abertura numérica (NA),

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} * NA \quad (3.9)$$

Quando V apresenta um valor inferior a 2.405, a fibra diz-se monomodo, dado que apenas é permitida a propagação de um modo; para valores superiores, diz-se multimodo.

3.5.2. Índice em degrau (SI-POF)

À semelhança das GOF, as primeiras POF desenvolvidas apresentavam um perfil de índice do tipo SI. O índice de refração do núcleo apresenta sempre o mesmo valor em qualquer ponto da sua secção transversal, onde existe uma transição abrupta na passagem da zona de fronteira entre o núcleo e a bainha. O degrau no índice de refração determina a abertura numérica. As POF apresentam valores elevados de abertura numérica o que leva a uma maior dispersão modal e conseqüente menor largura de banda. A velocidade de propagação é constante, pois o índice de refração do núcleo é uniforme. Os raios que viajam por caminhos mais longos acabam por chegar mais tarde dos que viajam por caminhos mais curtos.

Este tipo de fibras pode trabalhar em regime multimodo e monomodo.

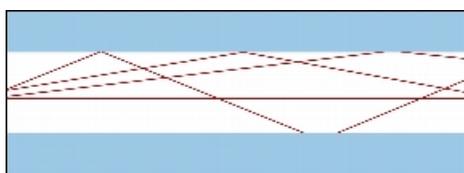


Figura 26 – Propagação da luz na SI-POF.

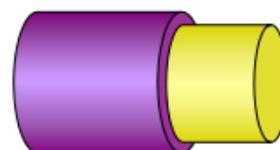


Figura 27 – Estrutura da SI-POF [7].

3.5.3. Índice Gradual (GI-POF)

Nas GI-POF, o índice de refração do núcleo decresce, gradualmente, do centro do núcleo para a zona de fronteira, à medida que a distância ao eixo da fibra aumenta, terminando com o mesmo valor do índice de refração da bainha.

Os raios, cuja propagação ocorre no centro da fibra ótica, percorrem uma menor distância e, como têm um maior índice de refração, possuem uma velocidade de propagação menor. Por sua vez, os raios que se propagam por caminhos mais longos, ou seja, junto da bainha, têm uma maior velocidade de propagação e percorrem distâncias maiores.

A variação pode assumir várias formas, mas as principais são a linear e a parabólica.

Estas fibras são utilizadas em regime multimodo, com dimensões típicas idênticas as fibras índice degrau (ID) para o regime idêntico.

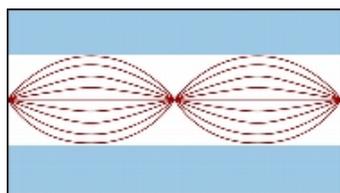


Figura 28 – Propagação da luz na GI-POF.



Figura 29 – Estrutura da GI-POF [7].

3.5.4. Multinúcleo (MC-POF)

Outro tipo de SI-POF desenvolvido por Asahi Kasei e constituído por núcleos múltiplos (MC) é a fibra ótica multinúcleo (MC-POF). Aqui, reúnem-se vários núcleos (até cerca de 200) durante o processo de fabrico, de tal modo que formam uma POF com diâmetro total de 1 mm. A figura abaixo representada mostra dois exemplos de MC-POF comercializadas pela *Asahi Chemical*.

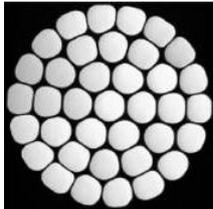


Figura 30 – Exemplo da MC-POF.



Figura 31 – Estrutura da MC-POF [7].

3.5.5. Multi-Degraus (MSI-POF)

As MSI-POF surgiram devido a problemas tecnológicos derivados da produção de GI-POF que apresentassem um perfil de índice de refração estável. O núcleo consiste em várias camadas, onde os raios luminosos não se propagam com trajetórias continuamente curvas, mas sim com trajetórias definidas pelas refrações nas zonas de interface. A Figura 32 – Estrutura da MSI-POF [7]. Figura 32 ilustra esta situação.

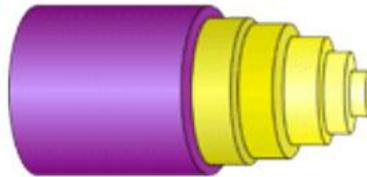


Figura 32 – Estrutura da MSI-POF [7].

3.6. Atenuação

A atenuação é a redução do sinal à medida que este se desloca no meio de transmissão. A atenuação na fibra ótica pode ser dada através da seguinte equação,

$$P_{out} = P_{in} * 10^{\frac{-\alpha L}{10}}$$

O coeficiente de atenuação nas fibras óticas é medido em dB/km e é definido como a razão entre a potência ótica de entrada P_{in} com a potencia ótica de saída P_{out} em uma fibra com o comprimento L.

$$\alpha [db/km] = \frac{10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)}{L}$$

A atenuação depende do diâmetro do núcleo, decrescendo à medida que o diâmetro aumenta. Este comportamento surge devido à ocorrência de maiores imperfeições estruturais e geométricas para diâmetros mais pequenos, sendo também que, quanto menor for o diâmetro maior é o número de reflexões na interface núcleo/bainha onde as imperfeições são mais frequentes.

Pode ainda, ser dependente da largura espectral e da abertura numérica. Quanto maiores estes parâmetros, maior o coeficiente de atenuação [2].

Os mecanismos básicos de atenuação são classificados em dois grupos: os intrínsecos e os extrínsecos.

Nos intrínsecos encontram-se as perdas causadas pelas características do material em estado puro. Estão classificadas como espalhamento de *Rayleigh* (decorrente da composição e flutuações da densidade) e absorção dos materiais (subdivida em absorção por ressonância molecular e absorção por ressonância eletrónica) [6].

Nos extrínsecos aparecem as variações que não existiam numa fibra ideal (pura). Estes fatores estão relacionados com as perdas causadas pela contaminação de impureza que o material da fibra experimenta durante o processo de fabrico. Temos a absorção causada pelos materiais (impurezas metálicas e orgânicas) e a absorção causada por partículas de poeira, bolhas e outras imperfeições na fibra (espalhamento de Mie). Temos, ainda, as perdas por radiação originadas pelas perturbações macroscópicas e pelas microscópicas [6].

3.7. Dispersão

A dispersão é o fenómeno que se traduz no resultado dos diferentes atrasos de propagação nos modos que transportam o raio de luz. Consiste num parâmetro importante, pois limita e determina a capacidade máxima de informação transmitida pela fibra. Na transmissão digital, o alargamento do impulso sobrepõem-se a impulsos adjacentes, causando o efeito conhecido por interferência intersimbólica (*Intersymbol Interference – ISI*).

Existem dois tipos de dispersão, a intramodal e a intermodal, sendo que a intramodal pode dividir-se na dispersão material e dispersão de guia de onda [4].

3.7.1. Dispersão intramodal

Relaciona-se com o modo de propagação e está dependente do comprimento de onda. É resultante da dependência da velocidade de grupo de propagação de um modo individual com relação ao comprimento de onda. A distorção do sinal aumenta com a largura espectral da fonte luminosa. Esta dispersão é subdividida em dispersão material e dispersão de guia de onda. Para

se estimar os efeitos da dispersão intramodal soma-se a dispersão material e a dispersão guia de onda [6].

3.7.1.1. Dispersão material

A existência desta dispersão está relacionada com o facto do índice de refração do material ser função do comprimento de onda. As várias componentes espectrais de um dado modo viajam a diferentes velocidades de propagação e o impulso alarga. A diversidade de componentes espectrais nos modos transmitidos é imposta pela fonte luminosa usada, sendo caracterizada pela emissão de luz policromática [4].

3.7.1.2. Dispersão guia de onda

A dispersão guia de onda é consequência do parâmetro V em relação ao comprimento de onda transmitido. Para um valor fixo de V , há um atraso de propagação diferente para cada modo, o que leva a uma distorção do sinal ótico na saída da fibra.

Esta dispersão é importante nas fibras monomodo de sílica, para as quais a dispersão material não é significativa, ou nos comprimentos de onda, para os quais a dispersão material tem um valor pequeno (aproximadamente de 1300nm). Nas fibras que comportam muitos modos, tal como as POF, esta dispersão é relativamente pequena comparada com a material, podendo ser desprezada [6].

3.7.2. Dispersão intermodal

A dispersão intermodal ocorre de acordo com os diferentes percursos efetuados pelos modos de propagação ao longo da fibra. É conhecida por afetar a transmissão nas fibras multimodo e resulta no facto de cada modo de propagação, para um mesmo comprimento de onda, ter uma velocidade de grupo diferente. Nas SI-POF, o modo de propagação de ordem mais baixo percorre o caminho mais curto dentro do núcleo da fibra, fazendo-o de forma mais rápida e chegando antes do modo de ordem mais alta. Nas GI-POF, o perfil gradual do núcleo realiza uma equalização nos tempos percorridos, onde os modos de propagação chegam em momentos muito próximos na extremidade final do guia, o que causa uma dispersão mínima no impulso ótico [4].

3.8. Referências bibliográficas

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan e G. H. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 3rd Edition, USA: Morgan Kaufmann, 2010;
- [2] L. M. Bilro, “Metrologia Ótica com Fibra Polimérica”, Tese de Doutoramento em Física, Departamento de Física da Universidade de Aveiro, 2011;
- [3] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow e D. Werner, *POF Handbook Optical Short Range Transmission Systems*, 2nd Edition ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008;

- [4] Pedro M. Soares, “Avaliação do desempenho das fibras óticas de plástico”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2012, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2189>;
- [5] P. Pinho, “Sistemas de Comunicação Ótica”, ADEETC-ISEL, 2012;
- [6] I. A. Oliveira, “Estudo e Caracterização de Fibras Óticas Plásticas para Aplicação em Telecomunicações,” Tese de Mestrado em Eng^a Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, 2004;
- [7] H. Poisel, O. Ziemann, “What is POF”, POF-AC Nurnberg, 2005;
- [8] <http://www.oakmead-electrical.co.uk/web/fibre%20intro.php>, consultado em 05.06.2014;
- [9] J. M. Senior, “Optical Fiber Communications – Principles and Practice – Second Edition”, Prentice Hall, 1992;
- [10] L. Kasovsky, S. Benedetto, A. Willner, “Optical Fiber Communications System”, Artech House, 1996;
- [11] L. A. Neto, “Transmissão de Sinais OFDM através de Fibras Óticas Poliméricas (POFs) utilizando LEDs de Iluminação”, Tese de Mestrado em Eng^a de Telecomunicações, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, 2009;
- [12] O. Ziemann, H. Poisel e J. Vinogradov, “Potential of High Speed, Short Distance Optical Data Communication on Large Diameter Optical Fibers,” *Polymer Optical Fiber Application Center*, p. 409, 2006;
- [13] H. J. R. Dutton, Understanding Optical Communications, 1st Edition ed., IBM Corporation, International Technical Support Organization, 1998;
- [14] E. H. Miguel, “Fiber-based Orthogonal Frequency Division Multiplexing Transmission Systems,” (Master Thesis), Escola Politècnica Superior de Castelldefels, Catalunya, 2010.

Capítulo 4 – Caracterização Optoeletrónica

O presente capítulo apresenta o dispositivo semiconductor utilizado na fotodeteção e desmultiplexagem dos sinais transmitidos através do canal ótico. Dá a conhecer as fontes óticas utilizadas, tal como os seus valores de intensidade. É feito um estudo da influência das potências óticas nos canais individuais, dando a conhecer o impacto nos mesmos.

4.1. Descrição do dispositivo

O dispositivo apresentado utiliza uma estrutura semicondutora composta por dois fotodíodos PIN. No lado frontal apresenta uma camada intrínseca muito fina com 200nm e um hiato energético de 2.1 eV, sendo baseada em a-SiC:H. Do lado posterior tem uma camada intrínseca mais espessa com 1000nm e um hiato energético de 1.8 eV baseado em a-Si:H. Os fotodíodos apresentam um revestimento de um eléctrodo transparente (ITO), o qual permite que os fotões penetrem o dispositivo e, simultaneamente, estabeleçam um bom contacto eléctrico para a medida da fotocorrente. Para além disso, também permite que possa ser aplicada uma tensão de polarização. [2, 3]

Existem duas zonas distintas de geração de fotocorrente: uma presente na zona dos 500nm e outra nos 626nm, dependentes da tensão de polarização aplicada. Estas zonas distintas resultam das propriedades associadas de cada camada intrínseca. Na Figura 33 visualiza-se a configuração do dispositivo.

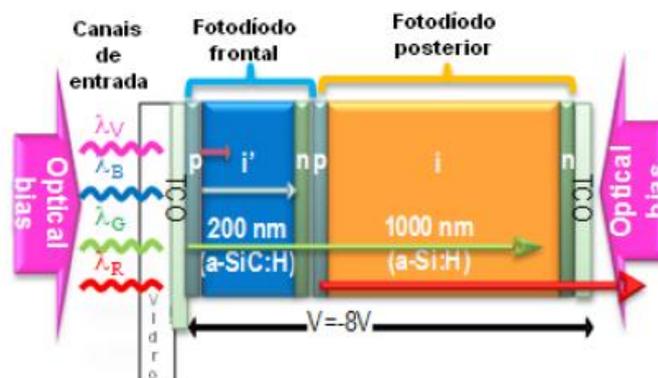


Figura 33 – Diagrama esquemático da estrutura do dispositivo semiconductor [3].

Através do estudo feito em trabalhos anteriores concluiu-se que o fotodíodo frontal gera uma fotocorrente até aos 600nm, tendo um máximo próximo dos 470 nm. O primeiro fotodíodo absorve os comprimentos de onda do violeta (400nm, 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). Esta situação ocorre devido 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.

No entanto, no fotodíodo posterior observa-se um máximo de fotocorrente gerada próximo de 600 nm, resultando na absorção da luz vermelha que o primeiro fotodíodo deixa passar. O fotodíodo posterior gera uma fotocorrente até aos 700 nm. Assim, verificamos que a estrutura de fotodíodos está desenvolvida de forma a favorecer o fotodíodo frontal com uma grande absorção da luz violeta e azul, e grande transparência à luz vermelha, enquanto o fotodíodo posterior favorece a absorção da luz vermelha. [3]

4.2. Descrição Experimental

A caracterização optoeletrónica do dispositivo consiste na análise do seu comportamento como desmultiplexador, através de vários comprimentos de onda dos LEDs geradores de sinais e de uma radiação de fundo.

Através de um osciloscópio digital de 4 canais foi possível medir a fotocorrente gerada sob uma tensão aplicada, utilizando LEDs com diferentes comprimentos de onda modulados a diferentes frequências, e com uma polarização ótica através da uma radiação frontal ou de fundo.

Os 4 LEDs utilizados para simular os diferentes canais de transmissão apresentam comprimentos de onda na região do visível, sendo eles: violeta (400 nm), azul (470 nm), verde (525 nm) e vermelho (626 nm). Devido ao facto de cada LED representar um canal ótico diferente, a polarização dos LEDs foi regulada através de um sinal elétrico quadrado.

É utilizado um microcontrolador, o qual é alimentado através de uma fonte de tensão DC com ligação em série ao computador que gera as sequências binárias presentes em cada canal de transmissão e controla as intensidades dos LEDs emissores. Os LEDs utilizados na polarização ótica posterior e frontal são alimentados por uma fonte de corrente DC.

Na saída do dispositivo utiliza-se um amplificador de baixo ruído para amplificar o sinal de fotocorrente, uma vez que o mesmo é bastante baixo. Serve, ainda, para efetuar a conversão da corrente para tensão.

Todos os gráficos que são extraídos, com auxílio do osciloscópio, estão normalizados, ou seja, o sinal é decomposto nas suas duas componentes de tempo e amplitude. Em amplitude é

somado, ao sinal, o mínimo do sinal, sendo este dividido pela diferença entre o máximo e o mínimo, de modo a obter um sinal normalizado.

A Figura 34 apresenta montagem experimental utilizada.

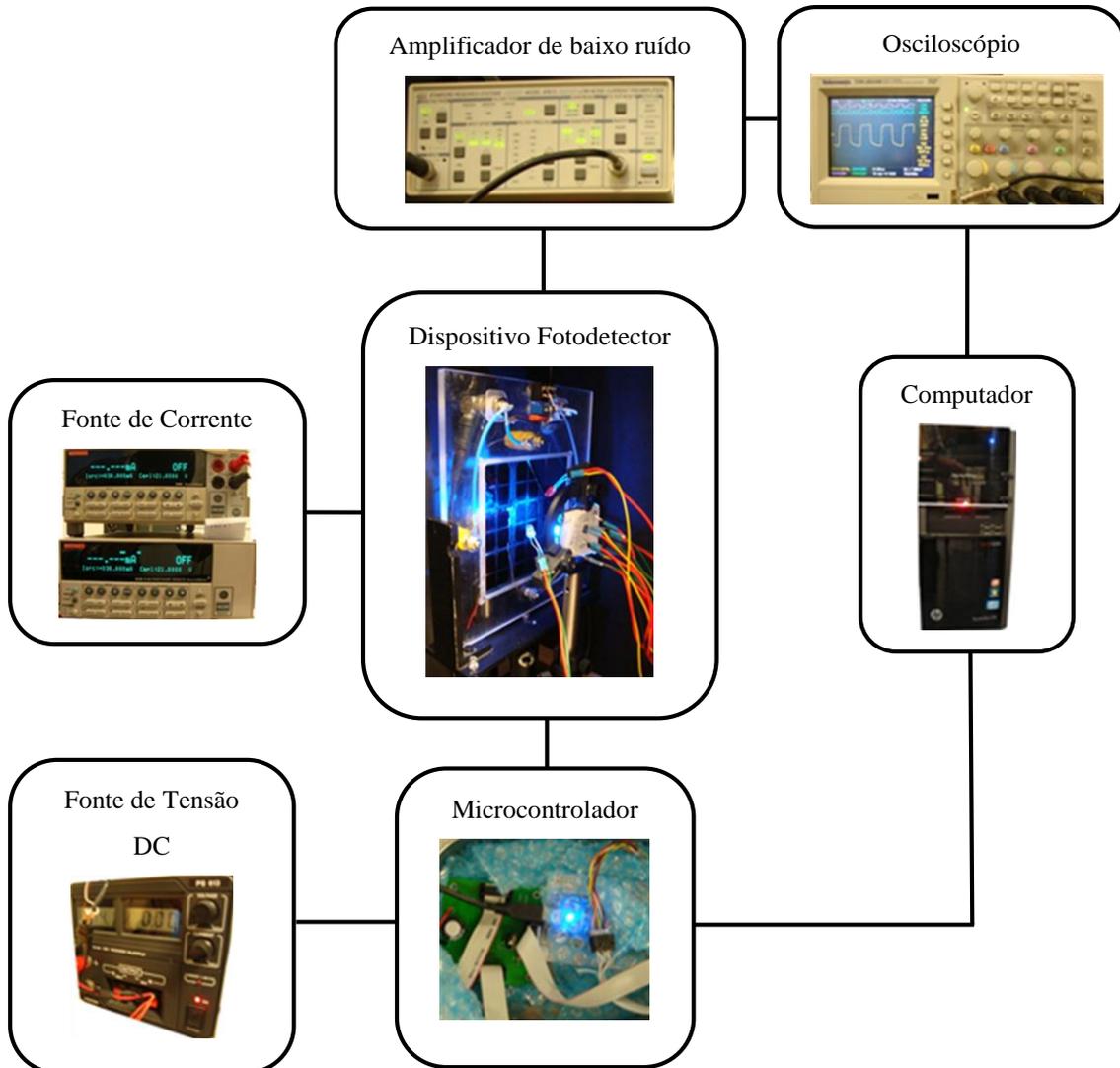


Figura 34 – Diagrama de blocos da montagem para o estudo da resposta espectral.

4.3. Fontes Óticas

Os LEDs são utilizados como fontes óticas na transmissão dos sinais. Como tal, é realizado o estudo dos mesmos, de modo a se conhecer os seus níveis de intensidade. Para este estudo são realizados dois cenários que, embora diferentes, ambos têm o objetivo de retirar os valores da potência ótica, sendo que um cenário acaba por complementar o outro.

O primeiro cenário recorre ao aparelho PM100, o qual permite a recolha dos valores da potência ótica. Este aparelho utiliza um sensor de leitura ótica que foi inserido num suporte de modo a ficar fixo. O suporte, por sua vez, é alinhado com outro suporte igual, sendo que neste novo suporte são colocados os LEDs sujeitos à medição da potência ótica. De modo a não existir

interferência da luz ambiente, é colocado um pano escuro sobre a montagem apresentada na Figura 35. Para a recolha dos valores é variada a corrente entre os 0 e os 30mA.

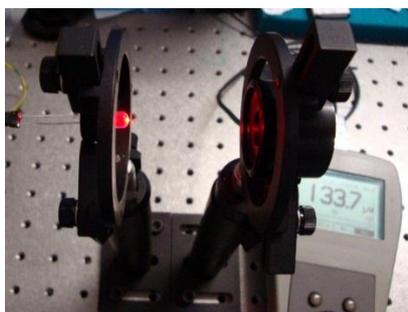


Figura 35 – Leitura das fontes óticas (primeiro cenário).

Neste primeiro cenário foi elaborada uma tabela com os valores de potência ótica para cada corrente, à medida que os valores desta eram alterados. Com a tabela preenchida é traçado o gráfico da Figura 36.

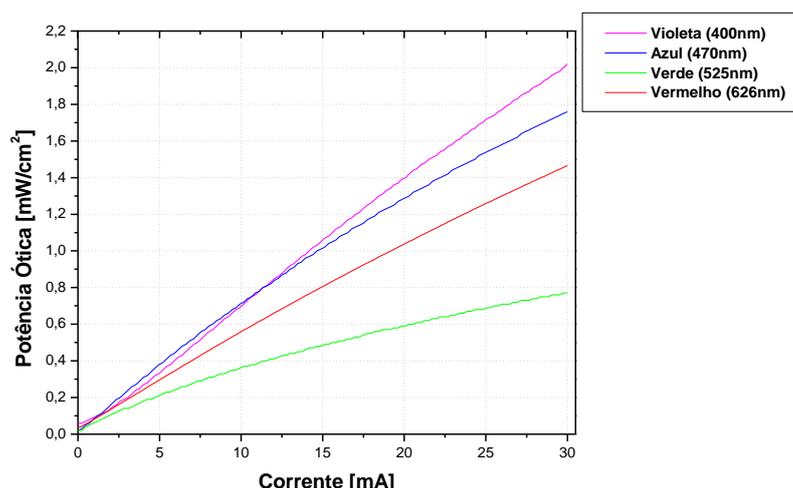


Figura 36 – Potencia ótica nos canais RGBV.

A potência ótica cresce com o aumento da corrente nos canais. O canal verde apresenta a menor potência ótica, sendo que acima deste se encontra o canal vermelho com a segunda menor potência. O canal violeta apresenta a maior potência, no entanto, esta só se verifica nas correntes acima dos 10mA. Até aos 10mA é o canal azul que tem a maior potência, embora a diferença para o canal violeta seja mínima. Aparentemente, a potência ótica em ambos os canais apresenta um comportamento linear, no entanto, numa análise mais pormenorizada, é possível verificar que isto não é verdade. Esta afirmação poderia ser mais facilmente visualizada caso fosse retirado um maior intervalo de valores de corrente e de potência ótica.

O segundo cenário recorre a um espectrómetro (CCS), o qual faz uso de uma fibra ótica para efetuar a leitura das potências. As medidas são realizadas nas mesmas condições do primeiro cenário, no entanto, para não existir influência da luz ambiente é colocado um tubo preto que une

a fibra aos LEDs a medir. Neste cenário foram usadas três correntes (10mA, 20mA e 30mA) e recolhidos os valores de potência para cada uma.

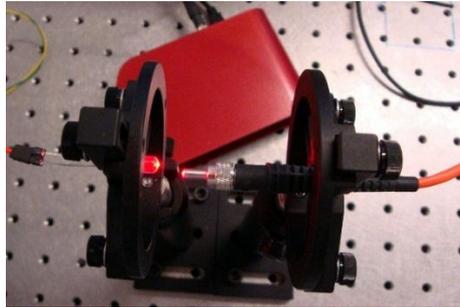


Figura 37 – Leitura das fontes óticas (segundo cenário).

O espectrômetro utiliza um *software* do seu fabricante (*Thorlabs*) para fazer a leitura do espectro de cada canal.

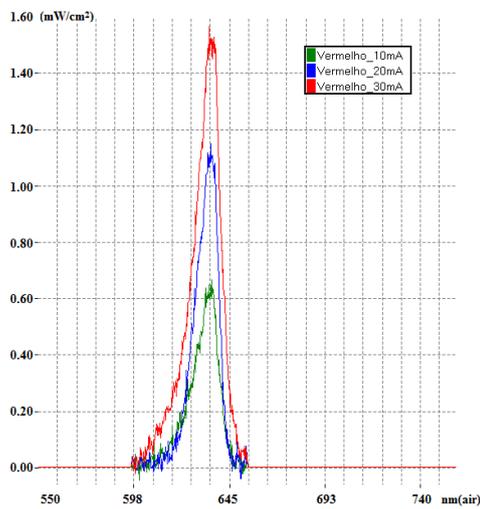


Figura 38 – Espectro do canal vermelho para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.

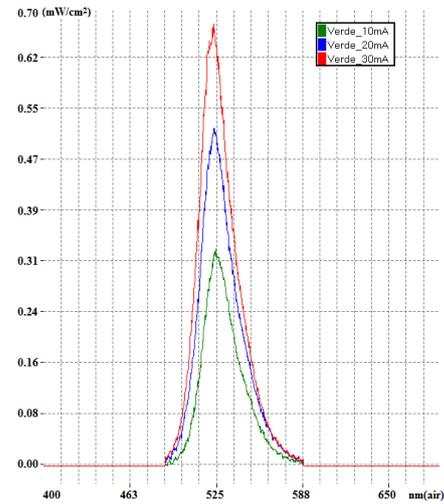


Figura 39 – Espectro do canal verde para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.

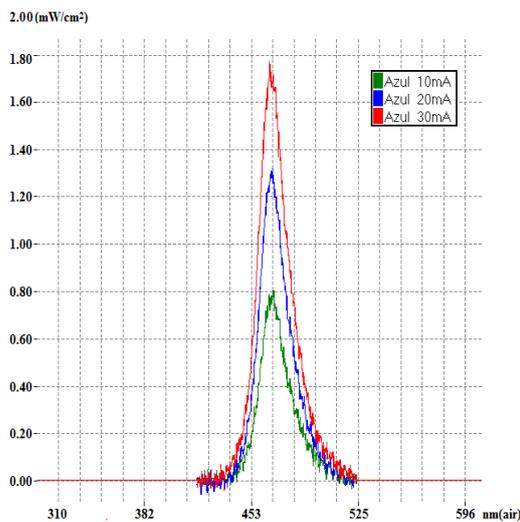


Figura 40 – Espectro do canal azul para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.

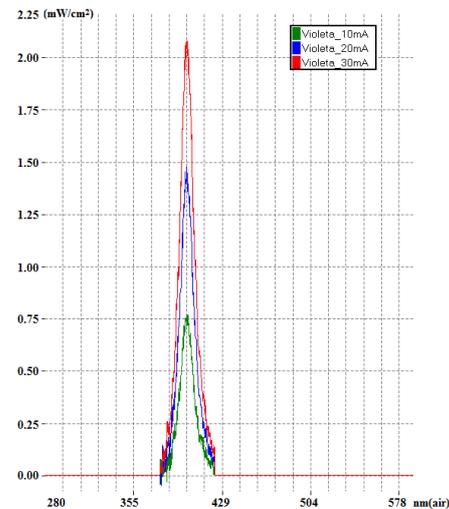


Figura 41 – Espectro do canal violeta para as correntes de 10mA, 20mA e 30mA.

Recorrendo aos gráficos apresentados, é possível retirar alguns valores para análise dos espetros. Os valores retirados são: o comprimento de onda central (nm), a intensidade de pico (mW/cm^2) e a largura à meia altura (nm).

Corrente		Comprimento de onda central [nm]	Intensidade de pico [mW/cm^2]	Largura à meia altura [nm]
Vermelho	10 mA	634.17	0.664	12.683
	20 mA	634.47	1.148	12.593
	30 mA	634.92	1.565	13.251
Verde	10 mA	526.9	0.329	25.977
	20 mA	525.595	0.514	27.146
	30 mA	524.422	0.672	27.882
Azul	10 mA	469.142	0.774	20.328
	20 mA	468.115	1.362	21.23
	30 mA	467.727	1.498	26.025
Violeta	10 mA	399.69	0.767	12.059
	20 mA	399.62	1.474	12.506
	30 mA	399.6	2.077	13.173

Tabela 1 – Análise espectral: comprimento de onda central, intensidade de pico e largura à meia altura.

O comprimento de onda central dos canais apresenta uma ligeira diferença perante o valor teórico especificado para cada canal. Ao se comparar a intensidade de pico (espectral) em cada canal com a intensidade medida através do leitor de intensidade ótica, é possível afirmar que ambas são idênticas, uma vez que os seus valores coincidem. A largura à meia altura varia um pouco de canal para canal, no entanto, individualmente em cada um deles apresenta uma variação mínima. Conclui-se que, seja qual for o método utilizado, os valores retirados vão ser bastantes idênticos, sendo que a variação mínima existente pode estar relacionada com o ambiente onde é feita a análise.

4.4. Estudo dos canais individuais: Influência da potência ótica de transmissão

Para o estudo da influência da potência ótica nos canais de transmissão utilizou-se uma sequência de bits com a combinação 0000111100001111.

É feita uma análise à fotocorrente gerada pelo dispositivo na ausência e na presença de uma polarização ótica. Na presença da polarização ótica recorreu-se a uma radiação de fundo pelo lado frontal e posterior. Através de resultados de estudos anteriores, conclui-se que o desempenho do dispositivo é favorecido pela utilização da radiação de fundo com a luz violeta e com uma polarização elétrica aplicada de -8V. [2]

4.4.1. Análise do canal vermelho (R)

De modo a analisar a influência da potência ótica quando apenas ocorre transmissão do sinal vermelho, mediu-se a fotocorrente para a sequência binária apresentada anteriormente, obtendo os resultados presentes na Figura 42. Na parte superior dos gráficos é apresentada a sequência binária.

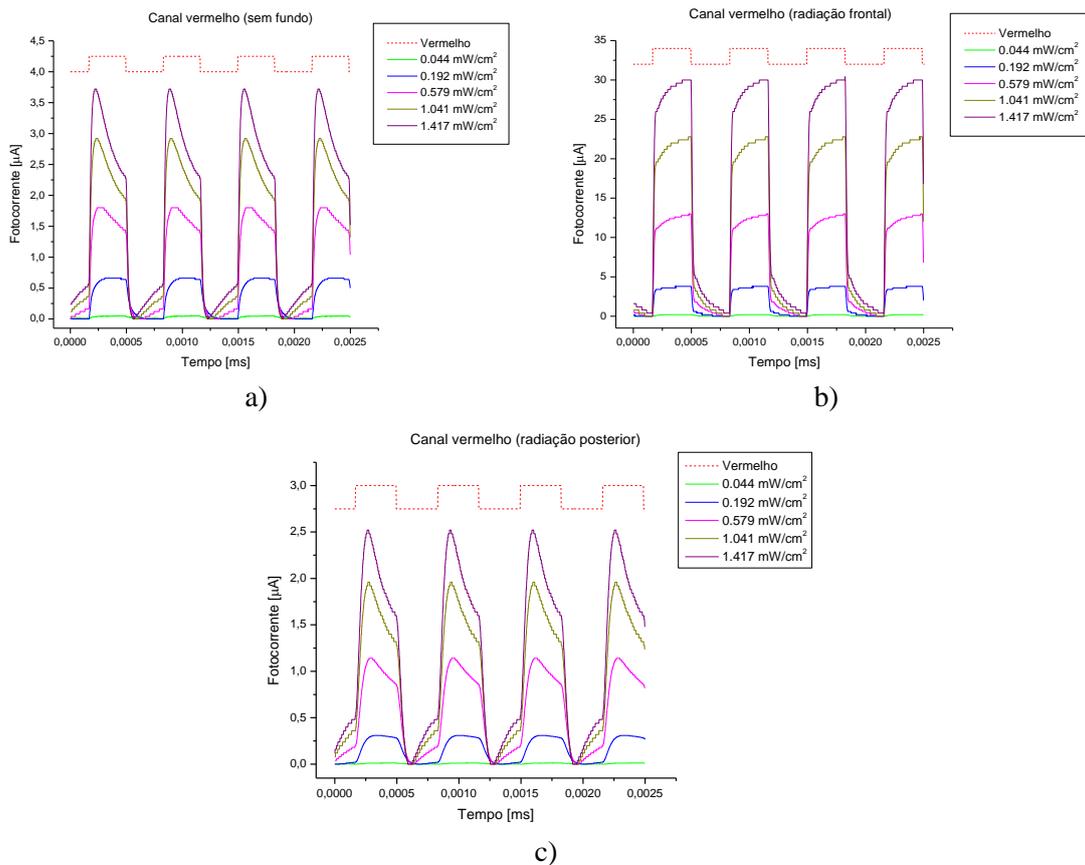


Figura 42 – Fotocorrente normalizada no canal vermelho (626nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.

Através das medidas efetuadas no canal vermelho, observa-se que a radiação de fundo influencia a fotocorrente de maneira diferente. Quando o dispositivo é sujeito a uma radiação frontal com a cor violeta, existe uma amplificação do valor da fotocorrente. No entanto, quando o dispositivo é sujeito a uma radiação posterior existe uma atenuação do valor da fotocorrente.

Verifica-se que a fotocorrente se enquadra com a sequência ótica transmitida quando ocorre o valor lógico de 1.

Observa-se um efeito capacitivo semelhante à carga e descarga de um condensador, ou seja, não é apresentada uma onda quadrada perfeita.

4.4.2. Análise do canal Verde (G)

Para análise da influência da potência ótica quando apenas ocorre transmissão do sinal verde, mediu-se a fotocorrente para a sequência binária apresentada anteriormente, obtendo os resultados apresentados na Figura 43. Na parte superior dos gráficos é apresentada a sequência binária.

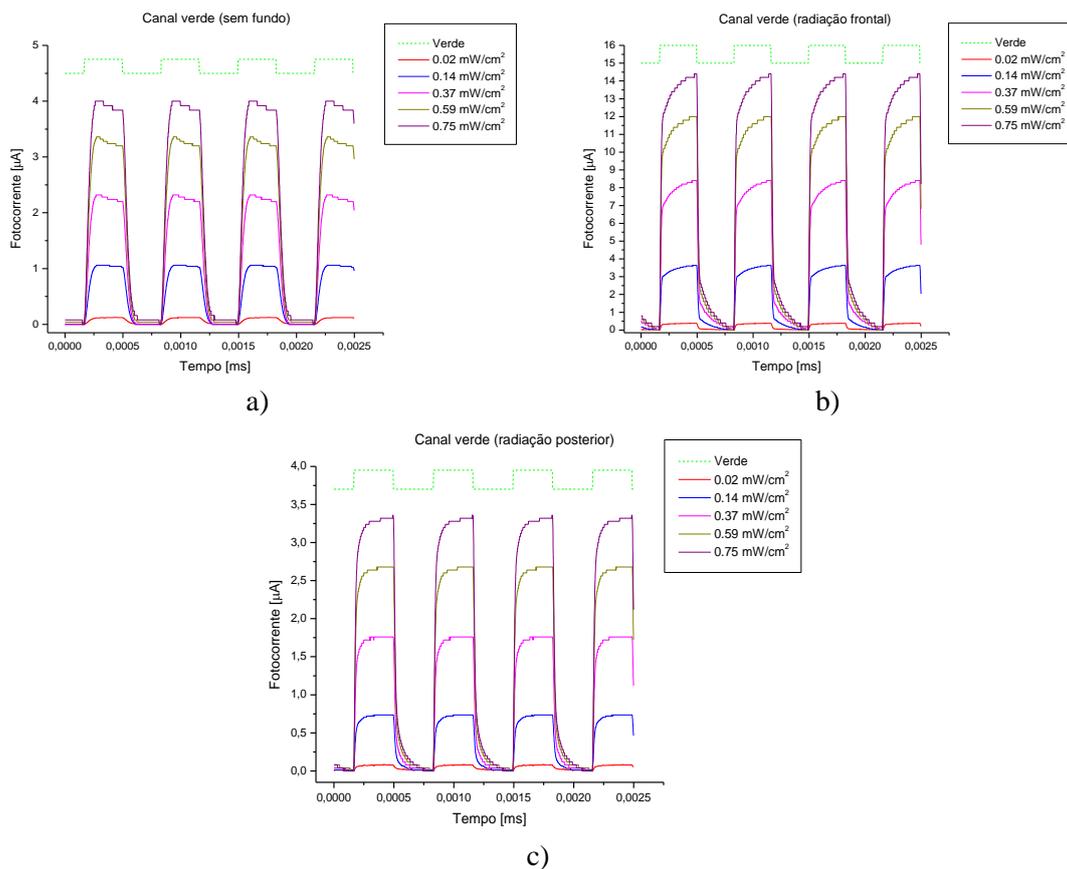


Figura 43 – Fotocorrente normalizada no canal verde (525 nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.

Através das medidas realizadas no canal verde observa-se que a radiação de fundo influencia a fotocorrente de maneira diferente, tal como no canal vermelho. Quando o dispositivo

é sujeito a uma radiação frontal com a cor violeta existe uma amplificação do valor da fotocorrente. No entanto, quando o dispositivo é sujeito a uma radiação de fundo posterior existe uma atenuação do valor da fotocorrente.

Verifica-se que a fotocorrente enquadra-se com a sequência ótica transmitida quando ocorre o valor lógico de 1.

Mais uma vez observa-se, ainda, um efeito capacitivo visível nos picos da fotocorrente quando há transições ON-OFF, que neste caso apresentam um efeito bastante menor comparado com o vermelho.

4.4.3. Análise do canal Azul (B)

Na análise da influência da potência ótica quando apenas ocorre transmissão do sinal azul, mediu-se a fotocorrente para a sequência binária apresentada anteriormente, obtendo os resultados apresentados na Figura 44. Na parte superior dos gráficos é apresentada a sequência binária.

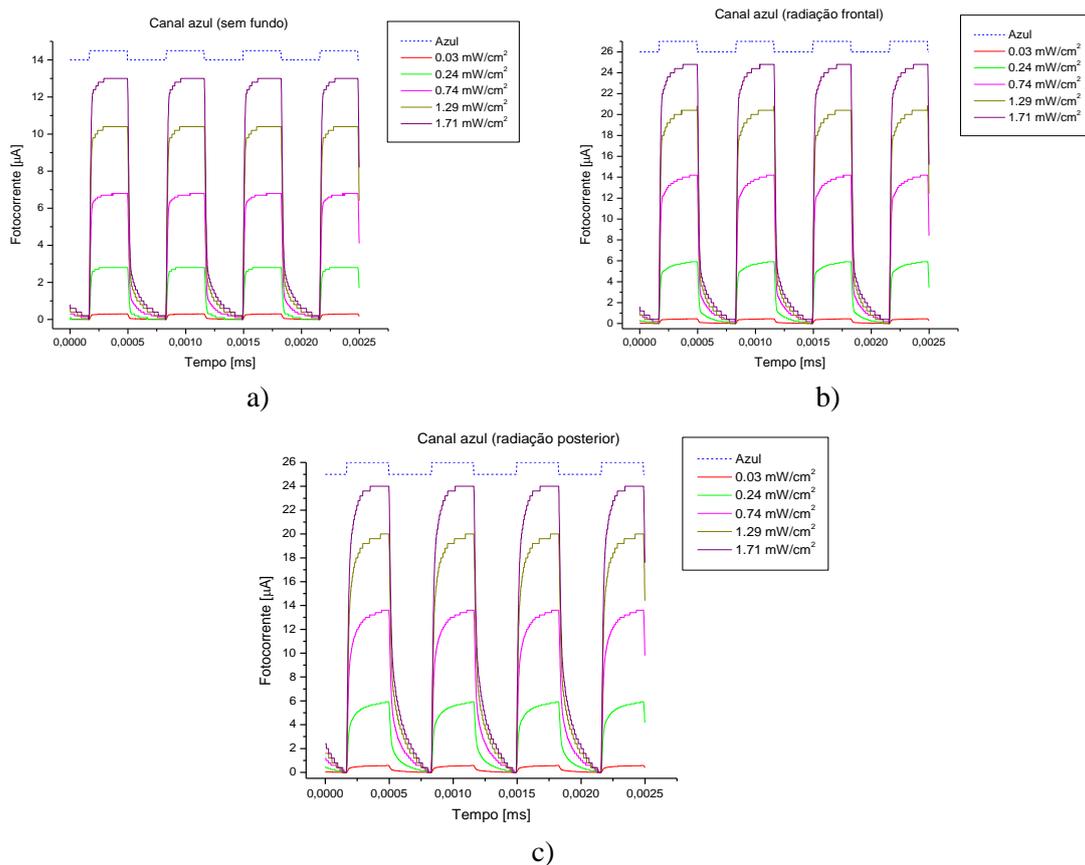


Figura 44 – Fotocorrente normalizada no canal azul (470 nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.

As medidas realizadas no canal azul demonstram que a radiação de fundo influencia a fotocorrente da mesma maneira. Quando o dispositivo é sujeito, quer a uma radiação frontal, quer a uma radiação posterior com a cor violeta, existe uma amplificação do valor da fotocorrente.

A fotocorrente encontra-se sincronizada com a sequência ótica transmitida quando ocorre o nível lógico de 1.

Observa-se um efeito capacitivo semelhante à carga e descarga de um condensador, ou seja, não é apresentada uma onda quadrada perfeita. Neste caso o efeito é bastante reduzido, sendo um pouco idêntico ao do canal verde.

4.4.4. Análise do canal Violeta (V)

Na análise da influência da potência ótica quando apenas ocorre transmissão do sinal violeta, mediu-se a fotocorrente para a sequência binária apresentada anteriormente obtendo os resultados apresentados na Figura 45. Na parte superior dos gráficos é apresentada a sequência binária.

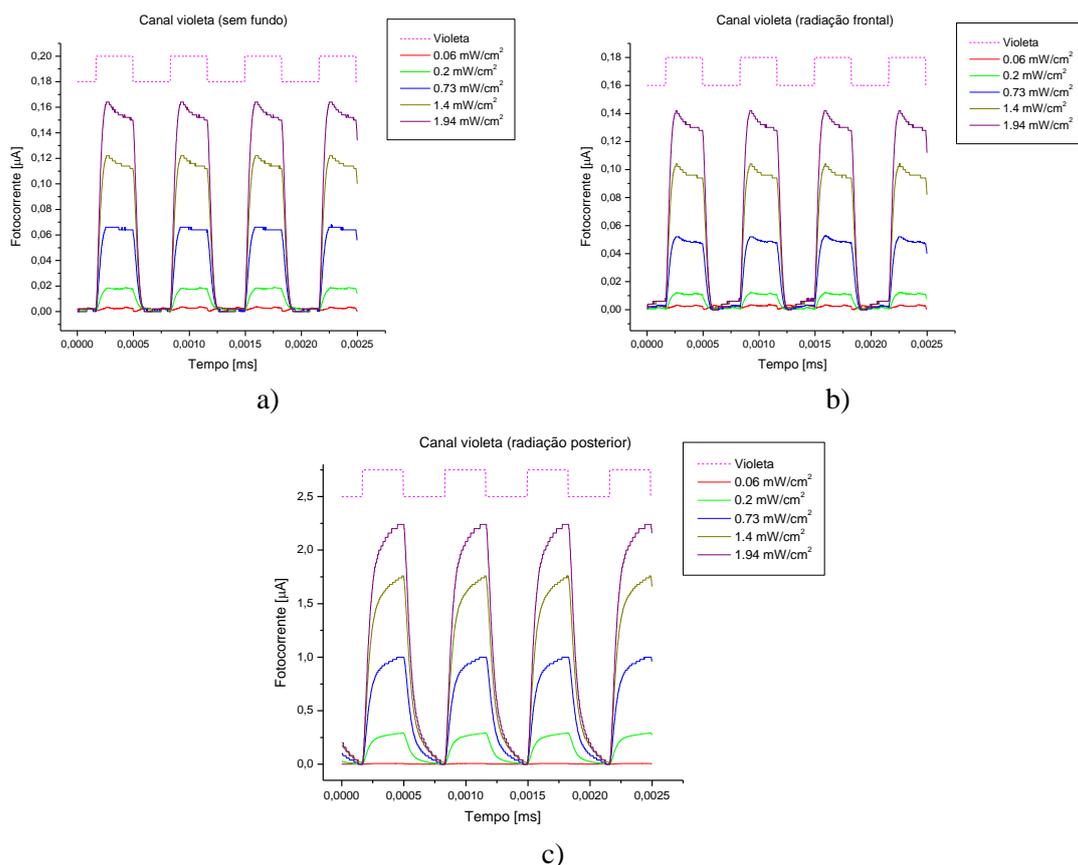


Figura 45 – Fotocorrente normalizada no canal violeta (400 nm). a) sem luz de fundo; b) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado frontal; c) com luz de fundo violeta (400 nm) pelo lado posterior.

Através das medidas realizadas no canal violeta observa-se que a radiação de fundo influencia a fotocorrente de maneira diferente. Quando o dispositivo é sujeito a uma radiação

frontal com a cor violeta existe uma ligeira atenuação do valor da fotocorrente. No entanto, quando o dispositivo é sujeito a uma radiação de fundo existe uma amplificação do valor da fotocorrente.

Verifica-se que a fotocorrente enquadra-se com a sequência ótica transmitida quando ocorre o valor lógico de 1.

Observa-se um efeito capacitivo semelhante à carga e descarga de um condensador, ou seja, não é apresentada uma onda quadrada perfeita. Neste caso, verifica-se um efeito bastante menor comparativamente ao canal vermelho.

4.5. Análise dos ganhos

A anterior análise da aplicação da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior sobre a fotocorrente de saída do dispositivo, permitiu retirar o valor da potência ótica em cada canal RGBV. Com este valor foi possível o cálculo dos respetivos ganhos.

A Tabela 2 apresenta a relação do ganho com a potência ótica para todos os canais RGBV.

	Vermelho					Verde				
Potência ótica	0.044	0.192	0.579	1.041	1.417	0.02	0.14	0.37	0.59	0.75
Ganho Frontal	4	5.454	7.561	9.167	10.14	3	3.321	3.616	3.580	3.469
Ganho Posterior	0.25	0.469	0.609	0.633	0.694	0.642	0.694	0.786	0.827	0.837
	Azul					Violeta				
Potência ótica	0.03	0.24	0.74	1.29	1.71	0.06	0.2	0.73	1.4	1.94
Ganho Frontal	1.462	2.029	2.059	1.962	1.877	1	0.611	0.727	0.828	0.848
Ganho Posterior	1.862	2.029	1.97	1.885	1.846	3	14.89	14.24	13.97	13.33

Tabela 2 – Ganhos dos canais individuais com radiação de fundo pelo lado frontal e posterior.

Com estes valores é possível traçar o primeiro gráfico relativo à radiação de fundo pelo lado frontal (Figura 46).

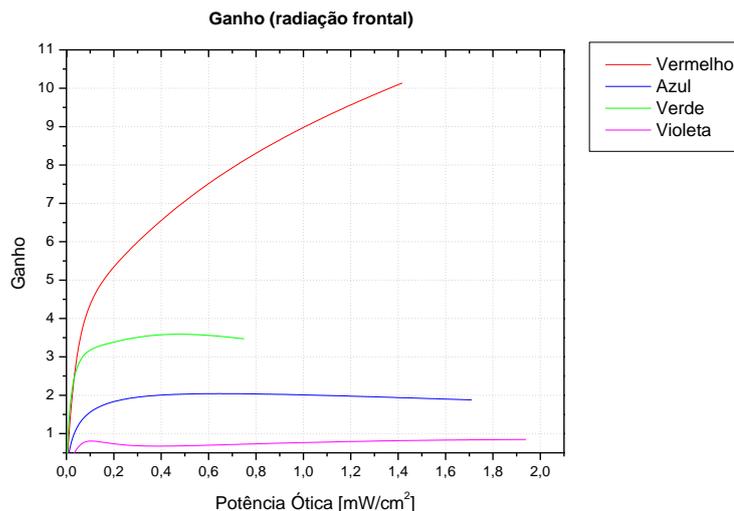


Figura 46 – Ganho nos canais RGBV através da radiação frontal.

É possível verificar que o canal vermelho apresenta um maior ganho que os restantes. Como foi analisado anteriormente, este canal tem uma grande amplificação na radiação de fundo pelo lado frontal. Ao canal vermelho segue-se o verde, o azul e o violeta.

À medida que a potência ótica aumenta, todos os canais à exceção do canal vermelho tendem a entrar na saturação. Acredita-se que este canal a partir de determinados valores de potência ótica apresente um comportamento não linear que o leve a entrar na saturação.

Ao nível da potência ótica, esta é maior para o canal violeta e menor para o canal verde.

Tendo por base os valores anteriormente apresentados na Tabela 2 é traçado o gráfico para a radiação de fundo pelo lado posterior (Figura 47).

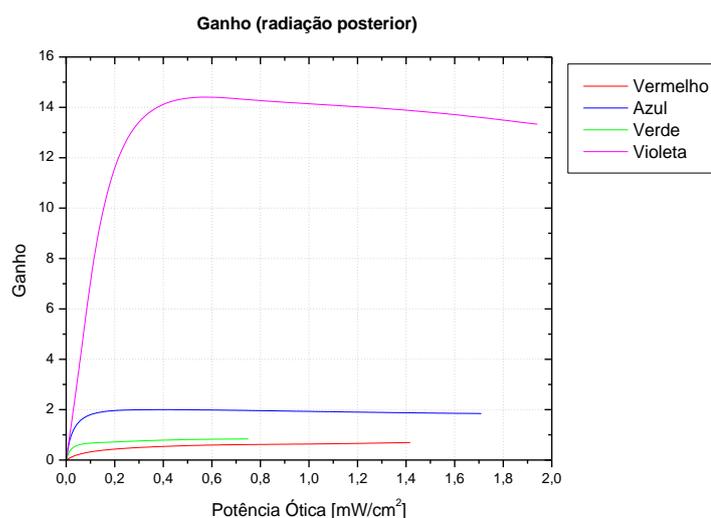


Figura 47 – Ganho nos canais RGBV através da radiação posterior.

Contrariamente ao que acontecia no gráfico anterior, com a radiação de fundo pelo lado posterior, os ganhos invertem-se, sendo que o maior ganho é dado pelo canal violeta. Com uma

grande diferença perante o canal violeta, segue-se o canal azul, verde e por fim vermelho. Os canais verde e vermelho apresentam ganhos bastantes semelhantes, fruto da sua baixa amplificação perante a radiação de fundo pelo lado posterior. O canal azul por sua vez apresenta um ganho bastante idêntico ao da radiação de fundo pelo lado frontal.

Neste caso todos os canais atingem a saturação, sendo que no canal violeta o valor do ganho tende a diminuir.

Ao nível da potência ótica os valores são idênticos aos da radiação de fundo pelo lado frontal. Ao analisarmos a potência ótica de ambos os gráficos é possível verificar que o seu aumento em nada influencia a amplificação causada pelas radiações de fundo pelo lado posterior e frontal.

O elevado ganho no canal vermelho através da radiação frontal e no canal violeta através da radiação posterior, podem servir com um elemento importante na descodificação dos canais RGBV apresentada no próximo capítulo.

4.6. Referências

- [1] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, J. Costa, "Use of a-Si:H Photodiodes in Optical Communications Applications", *Advances in Photodiodes*, 2010;
- [2] H. Ferraz, "Fotodetector e dispositivo WDM integrados", Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2012, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2180>;
- [3] J. Reis, "Implementação de WDM com 4 canais no espectro do visível", Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2013, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/3298>;
- [4] T. A. Silva, "Implementação de WDM com dispositivos semicondutores", Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2011, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/1238>;
- [5] S. Amaral, "Ótica Transparente: Wavelength Division Multiplexer", Tese de dissertação de Mestrado, ISEL, Dezembro de 2010;
- [6] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, V. Silva, A. Fantoni, "Novel device for implementation of WDM in the visible spectrum". *2012 MRS Spring Meeting*, 2012;
- [7] M. Vieira, "Three Transducers for One Photodetector: eassays for optical communications", Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012;
- [8] M. Andrade, "WDM – Multiplexagem por divisão de comprimento de onda", FEUP, 2001;

[9] M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, A. Fantoni, V. Silva, “SiC multilayer add/drop filter for optical interconnects”, 2013;

[10] J. M. Longras Figueiredo, “Dispositivos ópticos integrados para multiplexagem de comprimento de onda”, Tese de Mestrado em Eng^a Optoelectrónica e Lasers, FEUP, 1994.

Capítulo 5 – Análise dos canais WDM

O quinto capítulo apresenta os resultados do estudo da análise WDM, em que faz incidir simultaneamente os sinais óticos das diferentes fontes óticas (LEDs) sobre a face frontal do dispositivo. É realizada a análise sobre a influência da radiação de fundo nos canais individuais e com a combinação dos quatro canais (vermelho, verde, azul e violeta).

5.1. Calibração

Tendo em conta a montagem anteriormente apresentada e os valores de potência ótica para cada uma das correntes em cada canal, é realizada a calibração das correntes em cada canal. A calibração surge com o objetivo de, durante a transmissão dos quatro canais, existir uma distinção de cada um, apresentando diferentes níveis de corrente, onde cada um pode ser distinguido por um nível lógico. A Figura 48 apresenta este cenário, onde na parte superior se visualizam os quatro canais de transmissão e na parte central a combinação dos mesmos, onde é possível verificar os diferentes níveis lógicos.

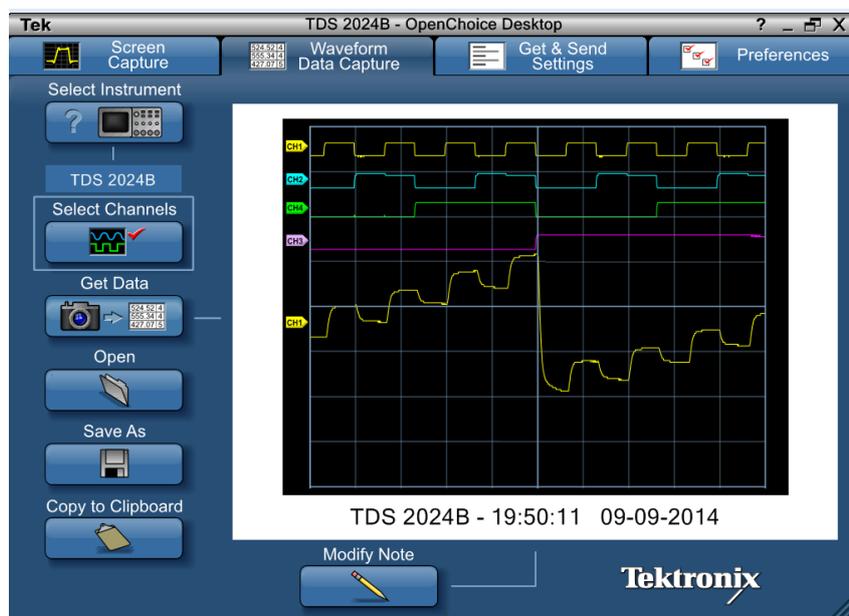


Figura 48 – Calibração dos canais RGBV.

Para se conseguir ter diferentes níveis lógicos, foram testados vários valores de corrente em cada canal, tendo sido elaboradas várias tentativas até se chegar a um valor coerente. Os

valores encontrados para cada canal são: 1.65 mA para o canal vermelho, 0.94 mA para o canal verde, 0.24 mA para o canal azul e 24.33 mA para o canal violeta. As potências óticas para cada um destes canais são de 0.116 mW/cm² para o canal vermelho, 0.06 mW/cm² para o verde, 0.03 mW/cm² para o azul e 1.67 mW/cm² para o violeta.

5.2. Análise WDM

Para a análise dos canais WDM é realizado um cenário no qual se definem quatro sequências binárias. Cada uma destas sequências apresenta diferentes frequências de modulação para os canais de transmissão, conforme indicado na Tabela 3.

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

Tabela 3 – Definição das frequências de modulação para os canais de transmissão.

As frequências de modulação são definidas tendo por base a sequência binária padrão, onde cada uma das frequências apresenta uma razão do dobro do valor entre as frequências consecutivas. A frequência F2 tem o dobro da F3, sendo que a F1 tem o dobro da F2 e F0 o dobro da F1. A frequência F0 é a mais rápida e a F3 a mais lenta.

Com recurso às frequências apresentadas é possível definir as quatro sequências. Cada sequência testa as 16 combinações possíveis. É possível verificar o desempenho da estrutura semicondutora em comparação com o desempenho individual de cada canal (Tabela 4).

Frequência	Sequência 1	Sequência 2	Sequência 3	Sequência 4
F0	Violeta	Vermelho	Violeta	Vermelho
F1	Azul	Azul	Verde	Verde
F2	Verde	Verde	Azul	Azul
F3	Vermelho	Violeta	Vermelho	Violeta

Tabela 4 – Combinações RGBV com base nas sequências padrão.

5.3. Canais Individuais

Esta análise tem, como princípio, as quatro sequências definidas anteriormente. No entanto, apenas é utilizado cada canal individualmente.

A análise realizada é feita na presença e na ausência da polarização ótica, ou seja, com e sem radiação de fundo pelo lado frontal e posterior. Esta observação pretende analisar os ganhos com a aplicação da radiação de fundo, através do lado frontal e de posterior, e verificar como estes se relacionam em função da sequência e da frequência a que se transmite.

5.3.1. Canal Vermelho

É realizada uma análise ao canal vermelho para se verificar o efeito causado com e sem radiação de fundo, recorrendo às quatro sequências anteriormente apresentadas e suas respectivas frequências. A Figura 49 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências, sendo que as frequências 1 e 3 são iguais, tal como as frequências 2 e 4.

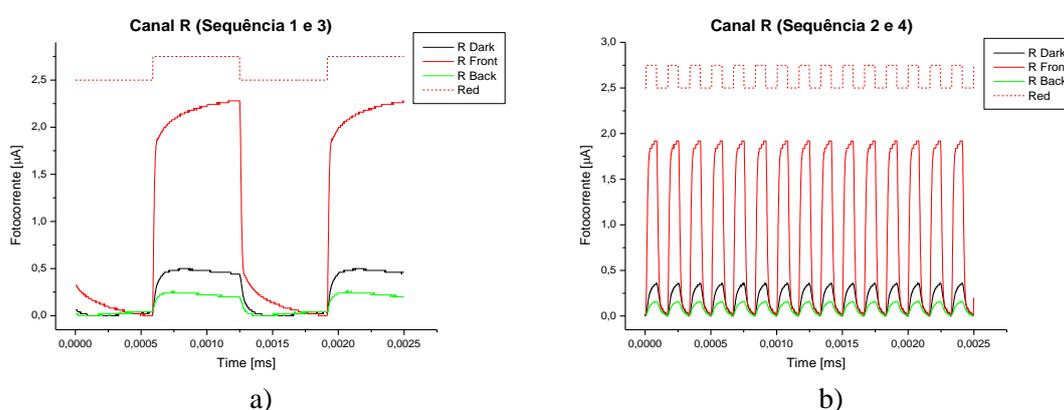


Figura 49 – Fotocorrente normalizada no canal vermelho (626nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 3; b) sequência 2 e 4.

Através das medidas realizadas é possível verificar que a radiação de fundo afeta o dispositivo de forma diferente. Quando este é sujeito a uma radiação de fundo pelo lado frontal, a fotocorrente é amplificada em comparação com a fotocorrente sem radiação de fundo. Ao ser aplicada uma radiação de fundo pelo lado posterior, ocorre o fenómeno inverso, sendo que o sinal é atenuado.

Com base nos valores da fotocorrente com radiação de fundo frontal e posterior e sem radiação de fundo, é calculado o ganho ótico (Tabela 5).

Sequência	Frequência	Ganho	
		Radiação Frontal	Radiação Posterior
1 e 3	F3	4.5	0.46
2 e 4	F0	5.87	0.45

Tabela 5 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal vermelho.

Na aplicação da radiação de fundo pelo lado frontal é verificado um aumento do ganho à medida que a frequência aumenta, ou seja, quanto mais rápida for a frequência, maior é o ganho

do dispositivo. Por sua vez, perante a radiação de fundo pelo lado posterior, ocorre um ligeiro aumento do ganho à medida que a frequência diminui; por outras palavras, quanto maior for o ganho mais lenta é a frequência. O canal vermelho apresenta valores de ganho bastante elevados com radiação de fundo pelo lado frontal.

5.3.2. Canal Verde

É realizada uma análise ao canal verde de modo a se verificar o efeito causado com e sem radiação de fundo, recorrendo às quatro sequências anteriormente apresentadas e suas respectivas frequências. A Figura 50 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências, sendo que as frequências 1 e 2 são iguais, tal como as frequências 3 e 4.

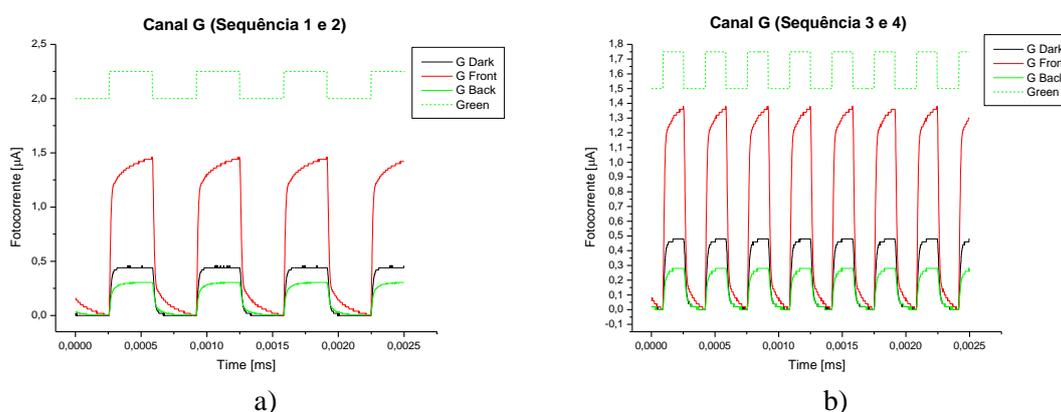


Figura 50 – Fotocorrente normalizada no canal verde (525nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 2; b) sequência 3 e 4.

Com as medidas realizadas é possível verificar que a radiação de fundo afeta o dispositivo de forma diferente. Ao ser sujeito a uma radiação de fundo pelo lado frontal, a fotocorrente é amplificada em comparação com a fotocorrente sem radiação de fundo. Quando aplicada a radiação de fundo pelo lado posterior, ocorre o fenómeno inverso, sendo que o sinal é atenuado. Este comportamento é bastante idêntico ao do canal vermelho.

Tendo, por base, os valores da fotocorrente com radiação de fundo frontal e posterior e sem radiação de fundo, é calculado o ganho ótico (Tabela 6).

Sequência	Frequência	Ganho	
		Radiação Frontal	Radiação Posterior
1 e 2	F2	3.1	0.65
3 e 4	F1	2.75	0.58

Tabela 6 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal verde.

Na aplicação da radiação de fundo pelo lado frontal é verificado uma diminuição do ganho à medida que a frequência aumenta. À semelhança da radiação de fundo pelo lado frontal,

também na presença da radiação de fundo pelo lado posterior existe uma diminuição do ganho à medida que a frequência aumenta.

5.3.3. Canal Azul

Na análise ao canal azul é verificado o efeito causado com e sem radiação de fundo, recorrendo às quatro sequências anteriormente apresentadas e suas respectivas frequências. A Figura 51 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências, sendo que as frequências 1 e 2 são iguais, tal como as frequências 3 e 4.

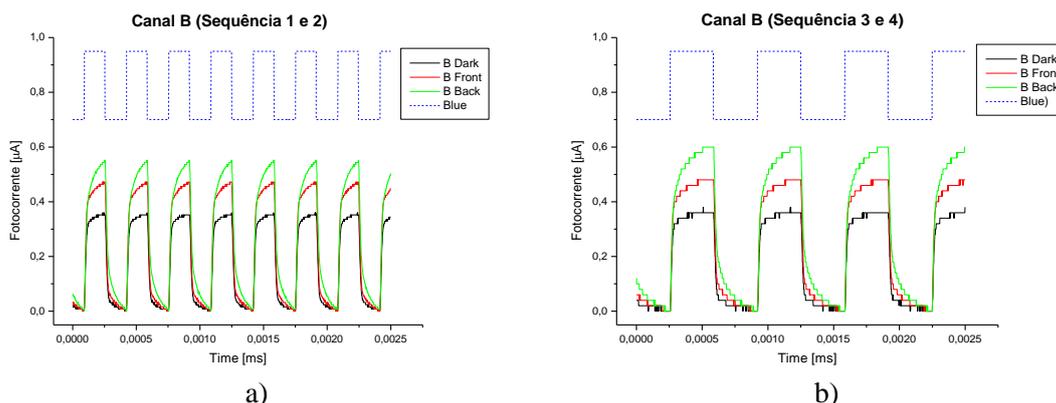


Figura 51 – Fotocorrente normalizada no canal azul (470nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 2; b) sequência 3 e 4.

As medidas realizadas permitem verificar que a radiação de fundo afeta o dispositivo de forma diferente. Quando este é sujeito a uma radiação de fundo pelo lado frontal, a fotocorrente é amplificada em comparação com a fotocorrente sem radiação de fundo. Ao ser aplicada uma radiação de fundo pelo lado posterior ocorre o mesmo fenómeno, ou seja, o sinal é amplificado. Neste caso com um valor diferente da radiação de fundo pelo lado frontal. Este comportamento é o contrário do que ocorre nos canais, vermelho e verde.

Calculou-se o ganho ótico tendo por base os valores da fotocorrente com radiação de fundo frontal e posterior e sem radiação de fundo (Tabela 7).

Sequência	Frequência	Ganho	
		Radiação Frontal	Radiação Posterior
1 e 2	F1	1.31	1.53
3 e 4	F2	1.4	1.6

Tabela 7 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal azul.

Na aplicação da radiação de fundo pelo lado frontal é verificado um aumento do ganho à medida que a frequência diminui, ou seja, quanto mais lenta for a frequência, maior é o ganho do

dispositivo. À semelhança da radiação de fundo pelo lado frontal, também na presença da radiação de fundo pelo lado posterior existe um aumento do ganho com a diminuição da frequência.

5.3.4. Canal Violeta

Na análise ao canal violeta é verificado o efeito causado com e sem radiação de fundo, recorrendo às quatro sequências anteriormente apresentadas e suas respectivas frequências. A Figura 52 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências, sendo que as frequências 1 e 3 são iguais, tal como as frequências 2 e 4.

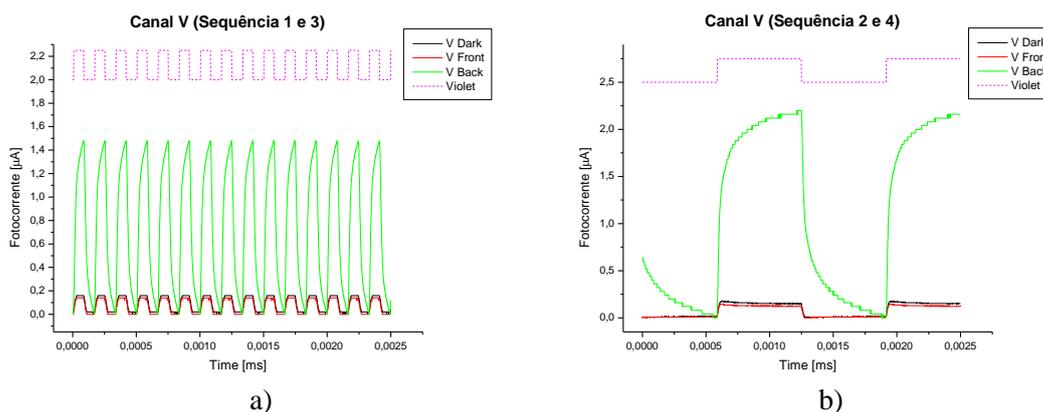


Figura 52 – Fotocorrente normalizada no canal violeta (400nm) com radiação de fundo pelo lado posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 3; b) sequência 2 e 4.

Através das medidas realizadas é possível verificar que a radiação de fundo afeta o dispositivo de forma diferente. Ao ser sujeito a uma radiação de fundo pelo lado frontal, a fotocorrente é atenuada em comparação com a fotocorrente sem radiação de fundo. Quando é aplicada uma radiação de fundo pelo lado posterior ocorre o fenómeno inverso, sendo que o sinal é amplificado. Este comportamento é contrário aos dos canais vermelho e verde.

Tendo, por base, os valores da fotocorrente com radiação de fundo frontal e posterior e sem radiação de fundo é calculado o ganho ótico (Tabela 8).

Sequência	Frequência	Ganho	
		Radiação Frontal	Radiação Posterior
1 e 3	F0	0.9	8.4
2 e 4	F3	0.8	13.7

Tabela 8 – Ganho ótico da radiação de fundo pelo lado frontal e posterior no canal violeta.

Na aplicação da radiação de fundo pelo lado frontal é verificado um aumento do ganho à medida que a frequência aumenta; por outras palavras, quanto mais rápida for a frequência, maior é o ganho do dispositivo. Ao contrário da radiação de fundo pelo lado frontal, na radiação de fundo pelo lado posterior existe um aumento do ganho com a diminuição da frequência.

Comparativamente aos restantes canais, o canal violeta é o que apresenta maiores valores de ganho com radiação de fundo pelo lado posterior.

5.4. Canais combinados

Esta análise é realizada tendo, por base, as sequências e frequências anteriormente apresentadas. No entanto, faz a combinação dos quatro canais apresentados. São realizadas medidas de fotocorrente com combinações dois a dois, três a três e os quatro canais em simultâneo. A radiação de fundo com a cor violeta foi aplicada pelo lado frontal e pelo lado posterior.

5.4.1. Canais RG

Na análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais RG são utilizados os LEDs vermelho e verde. Para cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do LED violeta e no escuro. A Figura 53 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

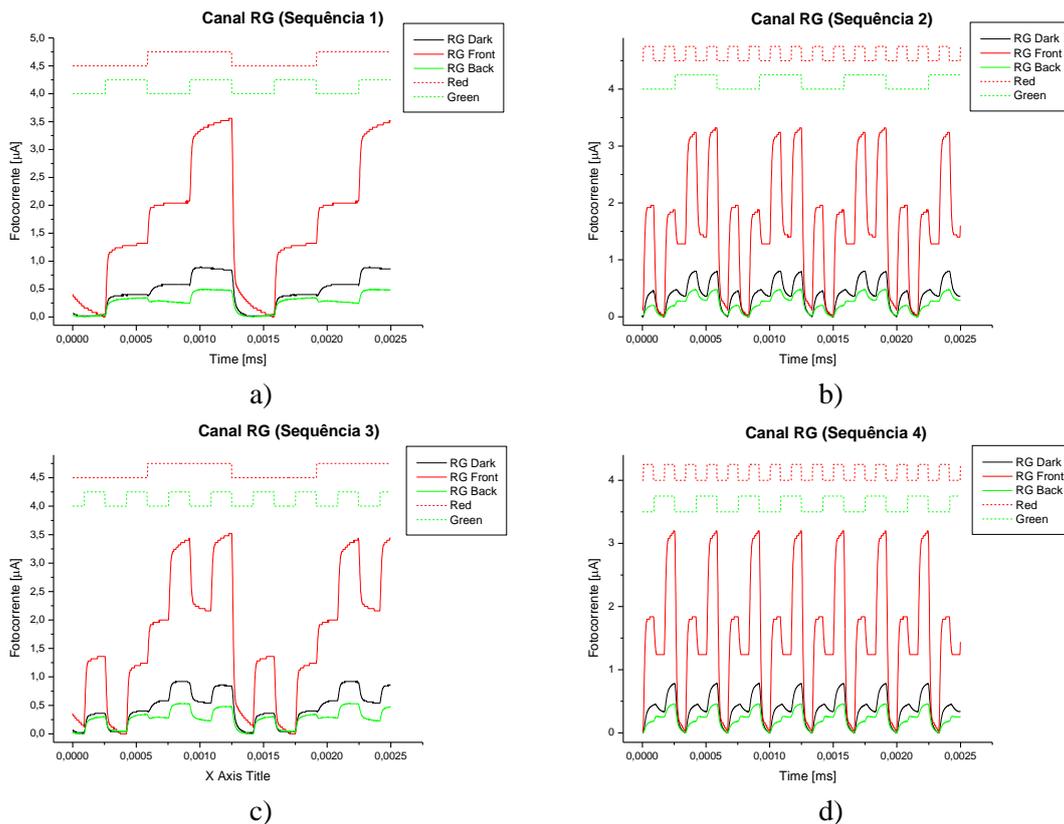


Figura 53 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RG com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. É

possível verificar os quatro níveis lógicos distintos para cada uma das várias combinações ON/OFF.

A aplicação da radiação de fundo frontal é a que maior amplitude apresenta e aquela onde é possível diferenciar melhor os diferentes níveis lógicos. A aplicação de fundo posterior apresenta a menor amplitude. Estes valores encontram-se dentro do que seria esperado, uma vez que nas contribuições individuais dos mesmos, ambos apresentam mais amplitude com fundo frontal e menor com fundo posterior.

Todas as sequências apresentam um maior valor de fotocorrente quando os canais vermelho e verde se encontram a ON, e um menor nível quando estes se encontram a OFF. O segundo maior valor de fotocorrente é apresentado quando o R=ON e G=OFF, seguido do R=OFF e G=ON. Esta situação encontra-se relacionada com o facto da fotocorrente no canal vermelho ser maior que no canal verde.

5.4.2. Canais RB

Para a análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais RB são utilizados os LEDs vermelho e azul. Para cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do led violeta e no escuro. A Figura 54 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

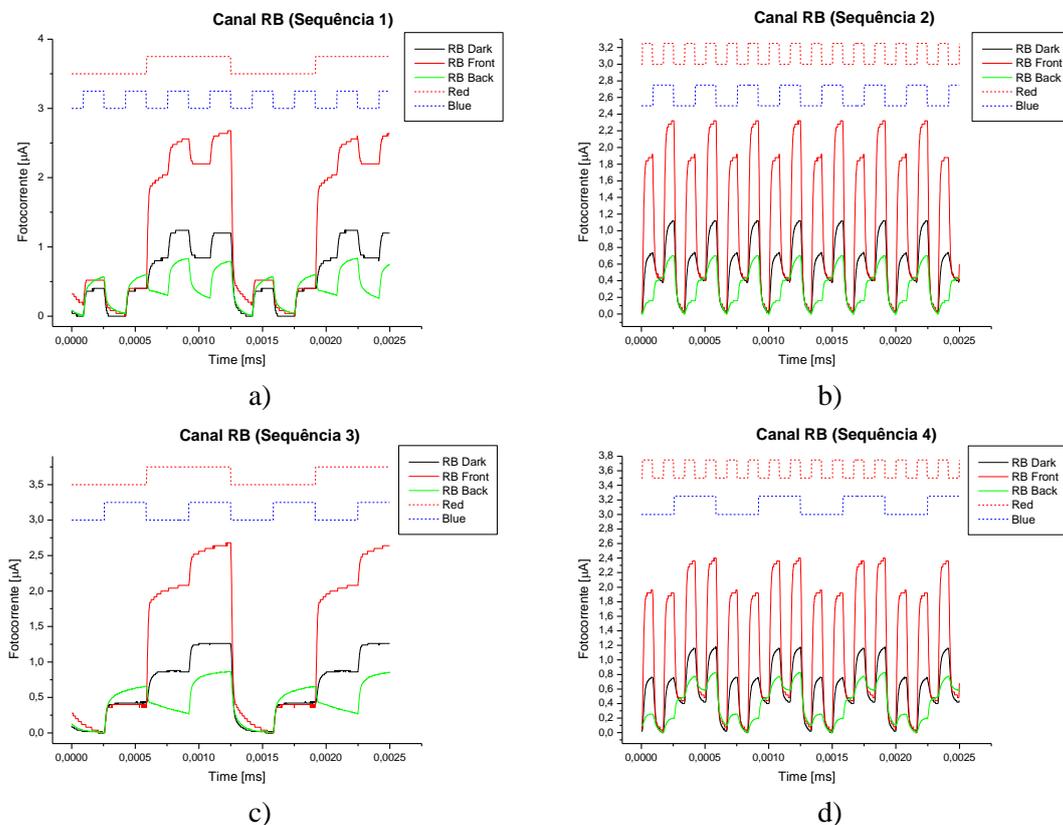


Figura 54 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RB com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

A amplitude da fotocorrente gerada é bastante diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. É possível verificar os quatro níveis lógicos distintos para cada uma das várias combinações ON/OFF.

Em todas as sequências, a maior amplitude de fotocorrente ocorre quando os canais vermelho e azul se encontram a ON, e um menor nível quando estes se encontram a OFF. As amplitudes intermédias neste caso são distintas: quando existe uma radiação frontal é amplificado o canal vermelho e quando existe uma radiação posterior é amplificado o canal azul. Para a radiação frontal a segunda maior fotocorrente é dada pela combinação R=ON e B=OFF e o patamar seguinte é dado pela combinação R=OFF e B=ON. Quando existe uma radiação posterior, o segundo maior patamar é dado pela combinação R=OFF e B=ON e o patamar seguinte é R=ON e B=OFF. Ambos os valores apresentados se encontram coerentes, uma vez que, nas contribuições individuais, o azul é amplificado pela radiação posterior e o vermelho pela radiação frontal.

5.4.3. Canais RV

Para a análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais RV são utilizados os LEDs vermelho e violeta. Para cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do led violeta e no escuro. A Figura 55 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

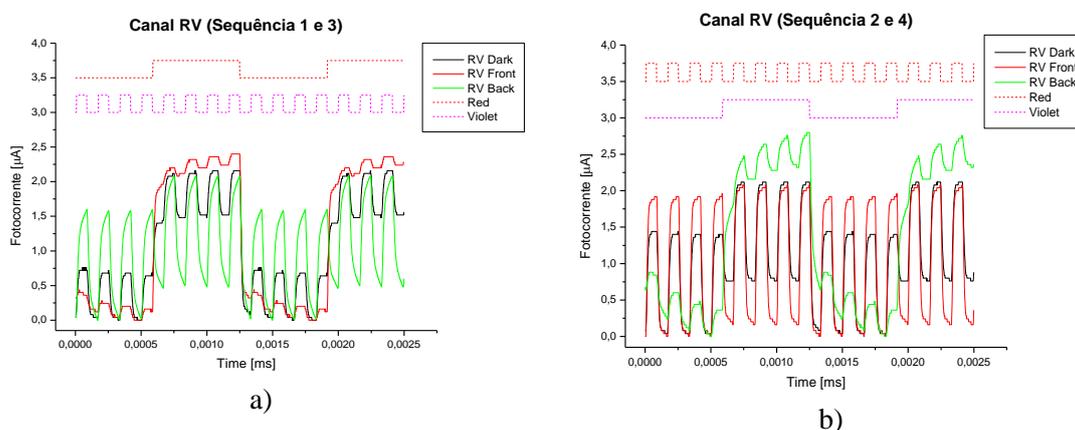


Figura 55 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 3; b) sequência 2 e 4.

A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. É difícil verificar os níveis lógicos com a radiação pelo lado frontal, devido à presença do canal violeta. No entanto, a radiação pelo lado posterior torna os níveis lógicos melhor definidos para as várias combinações ON/OFF.

A aplicação da radiação de fundo frontal apresenta uma maior amplitude para as sequências 1 e 3, enquanto a radiação de fundo posterior apresenta maior amplitude para as sequências 2 e 4. Estes valores encontram-se dentro do esperado, uma vez que nas contribuições individuais o canal vermelho apresenta uma maior amplitude nas sequências 1 e 3, sendo que o canal violeta apresenta maior amplitude nas sequências 2 e 4.

Em cada uma das sequências, a maior fotocorrente ocorre na presença de ambos os canais, quando estes se encontram a ON, e a menor fotocorrente é dada quando estes se encontram a OFF. Nos patamares intermédios, a radiação de fundo é bastante importante, uma vez que, com radiação posterior, é amplificado o canal violeta e, com radiação frontal, é amplificado o canal vermelho. Na radiação frontal intermédia, a maior amplitude corresponde à combinação R=ON e V=OFF. Este é seguido da combinação R=OFF e V=ON, ou seja, pelo lado frontal a presença do violeta torna-se quase desprezável. A radiação posterior intermédia é inversa da frontal, apresentando um maior valor para a combinação R=OFF e V=ON e menor valor para R=ON e V=OFF. Por outras palavras, o violeta tem um grande impacto na amplitude do canal.

5.4.4. Canais GB

Para a análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais GB são utilizados os LEDs verde e azul. Para cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do led violeta e no escuro. A Figura 56 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

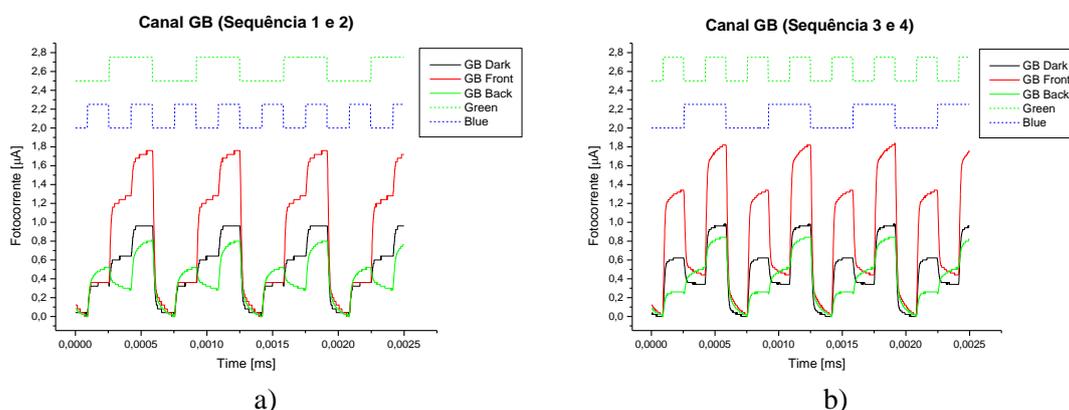


Figura 56 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais GB com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1 e 2; b) sequência 3 e 4.

A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. É possível verificar os quatro níveis lógicos distintos para cada uma das várias combinações ON/OFF. A radiação de fundo frontal é a que apresenta maior amplitude, sendo que a radiação posterior é a que tem menor amplitude. Os valores encontram-se dentro do esperado, uma vez que nas contribuições individuais a radiação frontal apresenta um maior valor que a radiação posterior.

Todas as sequências apresentam um maior valor de fotocorrente quando os canais verde e azul se encontram a ON e um menor nível quando estes se encontram a OFF. Nos patamares intermédios, a radiação de fundo é bastante importante, uma vez que com radiação posterior é amplificado o canal azul e com a radiação frontal são amplificados ambos os canais, sendo que o verde tem um maior ganho. Na radiação frontal intermédia, a maior amplitude corresponde à combinação G=ON e B=OFF este é seguido da combinação G=OFF e B=ON. A radiação posterior intermédia é inversa da frontal, apresentando um maior valor para a combinação G=OFF e B=ON e menor valor para G=ON e B=OFF.

5.4.5. Canais GV

Para a análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais GV são utilizados os LEDs verde e violeta. Para cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do led violeta e no escuro. A Figura 57 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

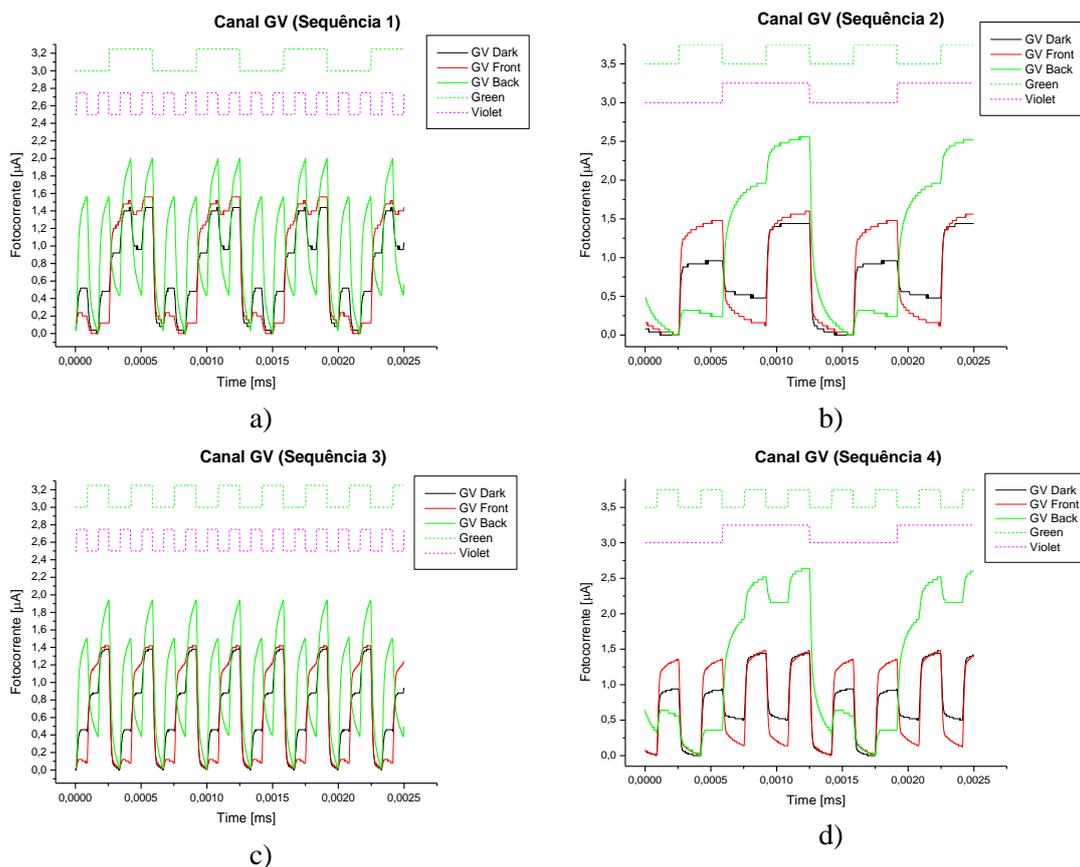


Figura 57 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais GV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

A amplitude da fotocorrente é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. É possível verificar os quatro níveis lógicos distintos para cada uma das várias combinações ON/OFF. A

radiação de fundo posterior é a que apresenta maior amplitude, sendo que quando não existe radiação é o caso que apresenta menor amplitude. Os valores encontram-se dentro do esperado, uma vez que nas contribuições individuais o violeta tem uma forte presença da radiação posterior.

Em todas as sequências, a maior amplitude de fotocorrente ocorre quando os canais violeta e verde se encontram a ON e um menor nível quando estes estão a OFF. As amplitudes intermédias, neste caso, são distintas: quando existe uma radiação frontal é amplificado o canal verde, e quando existe uma radiação posterior é amplificado o canal violeta. Para a radiação frontal, a segunda maior fotocorrente é dada pela combinação G=ON e V=OFF e o patamar seguinte é dado pela combinação G=OFF e V=ON. Quando existe uma radiação posterior, o segundo maior patamar é dado pela combinação G=OFF e V=ON, e o patamar seguinte é G=ON e V=OFF. Ambos os valores apresentados se encontram coerentes, uma vez que nas contribuições individuais o violeta é amplificado pela radiação posterior e o verde pela radiação frontal.

5.4.6. Canais BV

Para a análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais BV são utilizados os LEDs azul e violeta. Para cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do led violeta e no escuro. A Figura 58 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

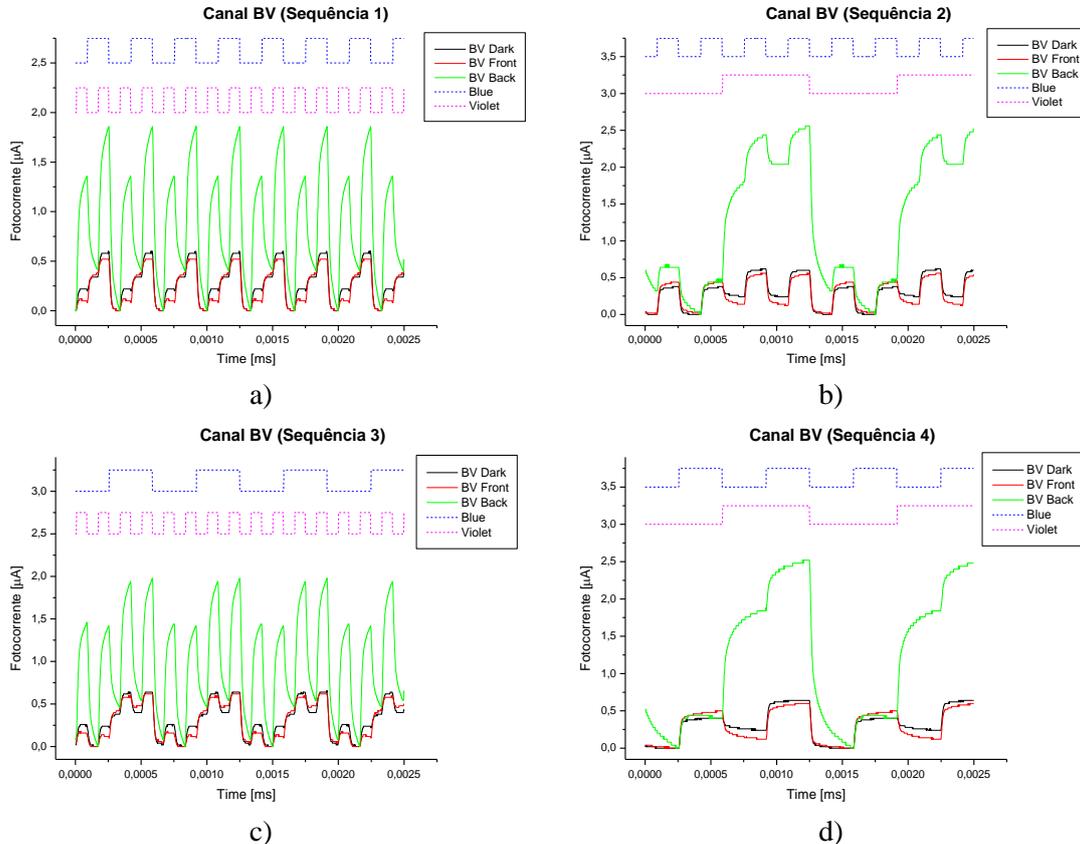


Figura 58 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais BV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. É possível verificar os quatro níveis lógicos distintos para cada uma das várias combinações ON/OFF.

A aplicação da radiação de fundo posterior é a que apresenta maior amplitude, uma vez que nas contribuições individuais o violeta tem uma forte presença da radiação posterior. A presença do violeta contribui, ainda, para que os patamares intermédios se encontrem bastante bem definidos.

Em todas as sequências, a maior amplitude de fotocorrente ocorre quando os canais azul e violeta se encontram a ON e um menor nível quando estes se encontram a OFF. As amplitudes intermédias neste caso são distintas: quando existe uma radiação frontal é amplificado o canal azul e quando existe uma radiação posterior é amplificado o canal violeta. Para a radiação frontal, a segunda maior fotocorrente é dada pela combinação B=ON e V=OFF, e o patamar seguinte é dado pela combinação B=OFF e V=ON. Quando existe uma radiação posterior, o segundo maior patamar é dado pela combinação B=OFF e V=ON, e o patamar seguinte é B=ON e V=OFF. É de salientar que, nesta combinação, a fotocorrente gerada com a radiação de fundo pelo lado posterior é quase sempre superior, em todas combinações ON/OFF, à radiação de fundo pelo lado frontal, situação que não se verifica nos restantes canais.

5.4.7. Canais RGB

Para a análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais RGB são utilizados os LEDs vermelho, verde e azul. Para cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do LED violeta e com o dispositivo no escuro. A Figura 59 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. Ao contrário das combinações de apenas dois canais, é possível verificar oito níveis lógicos distintos para cada uma das várias combinações ON/OFF possíveis entre os três canais.

A aplicação da radiação de fundo frontal é a que apresenta maior amplitude, à exceção do caso RG = OFF e B = ON, ou seja, na presença do canal azul. Este facto encontra-se em coerência com a combinação RG e com a contribuição individual do canal azul perante os canais vermelho e verde.

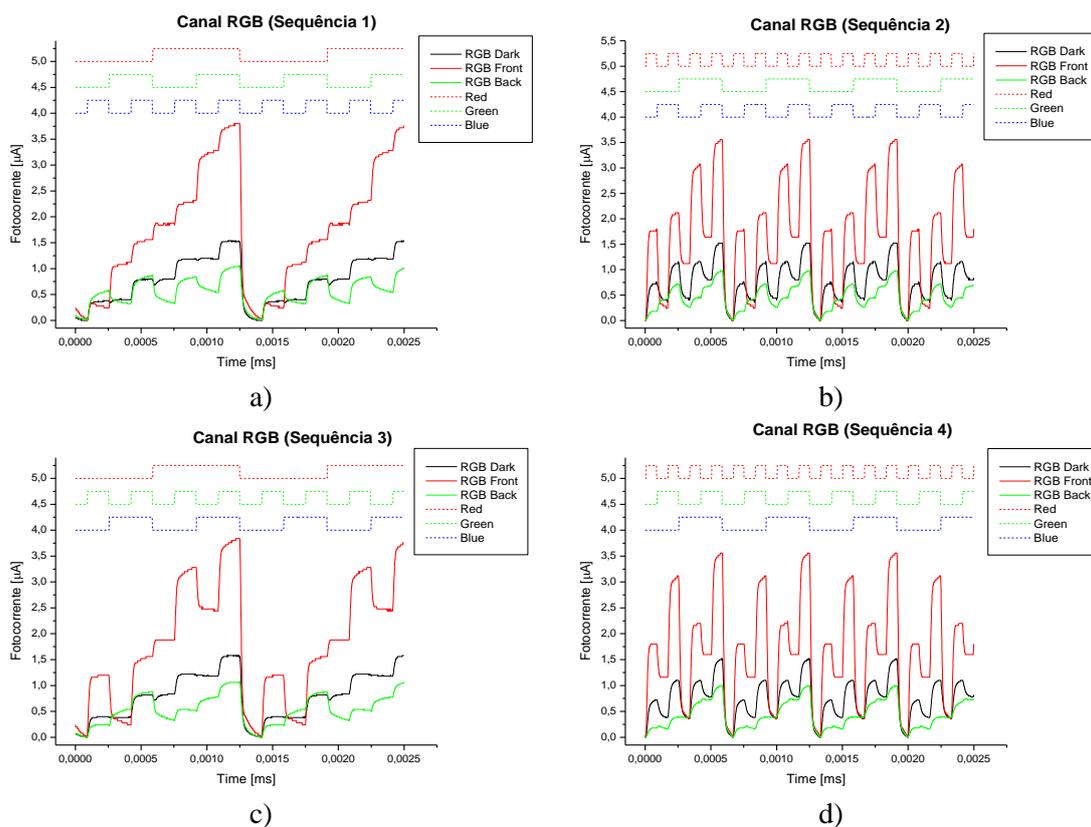


Figura 59 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RGB com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

Em todas as sequências, a maior amplitude de fotocorrente ocorre quando os canais vermelho, verde e azul se encontram a ON, e um menor nível quando estes se encontram a OFF. O sinal obtido com radiação de fundo pelo lado frontal pode ser dividido em dois grupos, uma vez que o canal vermelho apresenta uma forte amplificação (Figura 60). O primeiro grupo corresponde aos primeiros quatro níveis com maior fotocorrente, onde está presente o canal vermelho (R=ON). O segundo corresponde aos quatro níveis de menor fotocorrente, onde não existe canal vermelho (R=OFF). Uma vez que a radiação frontal amplifica mais o canal verde que o azul, como já foi visto anteriormente, dentro de cada grupo, o segundo maior nível de fotocorrente corresponde à combinação G=ON e B=OFF, seguido da combinação G=OFF e B=ON, onde é possível visualizar a presença do canal azul.

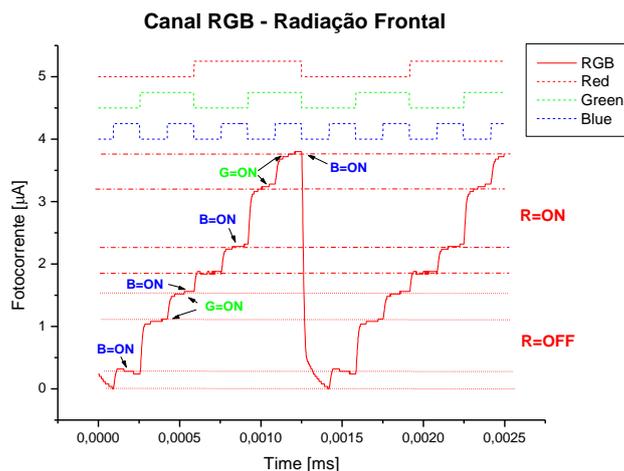


Figura 60 – Decodificação dos canais RGB sobre a radiação frontal.

O sinal obtido com radiação de fundo pelo lado posterior apresenta 8 níveis de fotocorrente bastante próximos (Figura 61). Pode ser dividida em dois grupos de quatro níveis, uma vez que o canal azul apresenta uma forte amplificação. O primeiro grupo apresenta os níveis de fotocorrente mais elevados, onde é possível determinar a presença do canal azul (B=ON), e o segundo grupo apresenta os níveis de fotocorrente mais baixos decorrentes da ausência do canal azul (B=OFF). Uma vez que, através da radiação posterior o canal verde é ligeiramente mais amplificado que o vermelho, o segundo maior nível de fotocorrente é dado pela combinação G=ON e R=OFF, seguido da combinação G=OFF e R=ON. A utilização deste algoritmo permite assim a decodificação dos canais RGB e a implementação da desmultiplexagem recorrendo à análise dos sinais de fotocorrente medidos com iluminação de fundo pelos lados frontal e posterior.

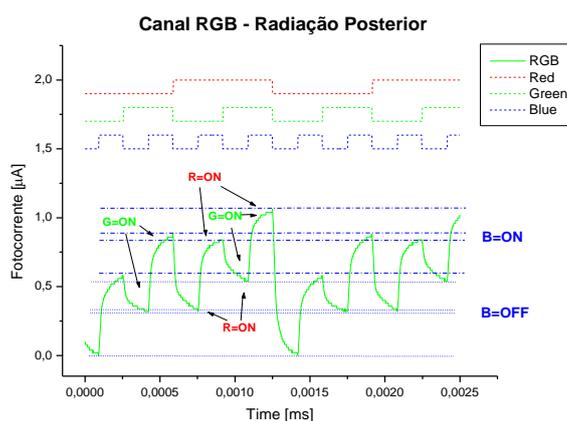


Figura 61 – Decodificação dos canais RGB sobre a radiação posterior.

5.4.8. Canais RGV

Para a análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais RGV são utilizados os LEDs vermelho, verde e violeta. Para cada uma destas combinações são utilizadas as

sequências já apresentadas, sendo contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do LED violeta e com o dispositivo no escuro. A Figura 62 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

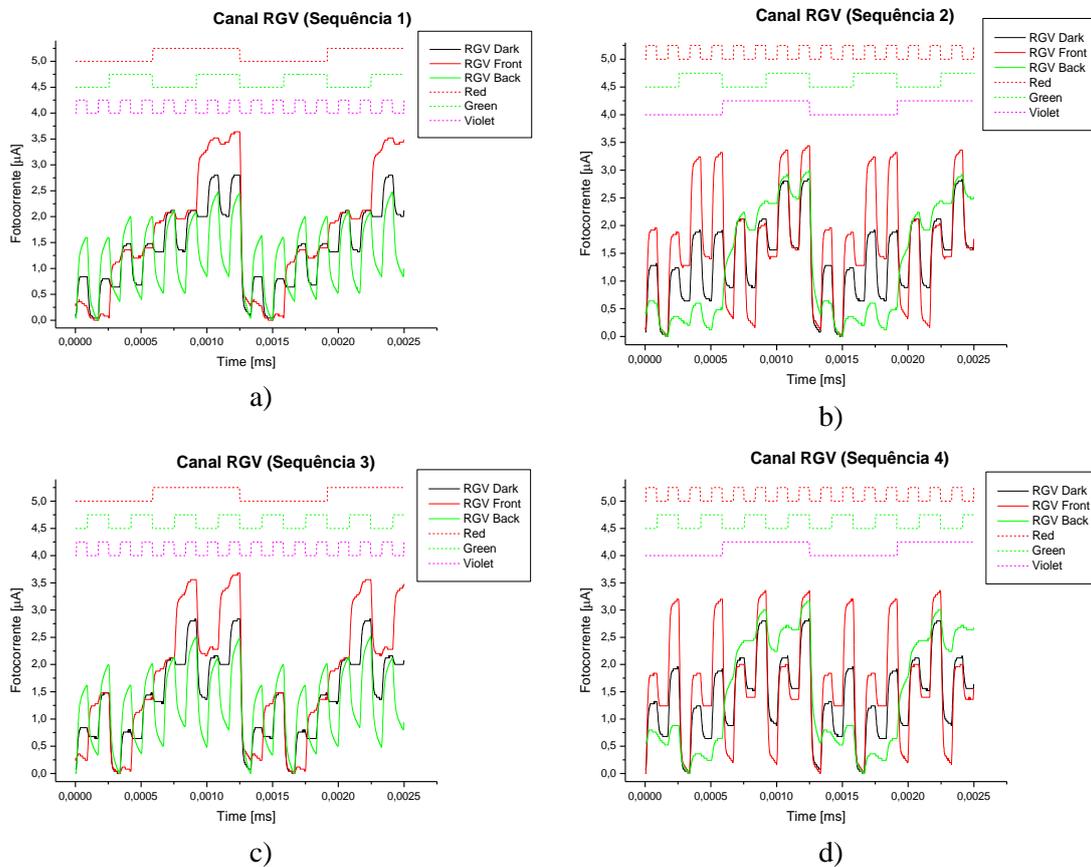


Figura 62 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RGV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta é aplicada pelo lado frontal ou posterior. Ao contrário das combinações de apenas dois canais, é possível verificar oito níveis lógicos distintos para cada uma das várias combinações ON/OFF possíveis entre os três canais.

Em todas as sequências, a maior amplitude de fotocorrente ocorre quando os canais vermelho, verde e violeta se encontram a ON e um menor nível quando estes se encontram a OFF.

O sinal obtido com radiação de fundo pelo lado frontal pode ser dividido em dois grupos, uma vez que o canal vermelho apresenta uma forte amplificação (Figura 63). O primeiro grupo é composto pelos quatro níveis com maior fotocorrente que ocorrem quando existe o canal vermelho (R=ON), sendo que o segundo grupo corresponde aos quatro níveis de menor fotocorrente, ou seja, à ausência do canal vermelho (R=OFF). A radiação frontal amplifica mais o canal verde que o violeta, pelo que, dentro de cada grupo o segundo maior nível de fotocorrente

é o correspondente à combinação G=ON e V=OFF, seguido da combinação G=OFF e V=ON. Nesta última, é possível visualizar o canal violeta, embora a sua contribuição seja muito reduzida.

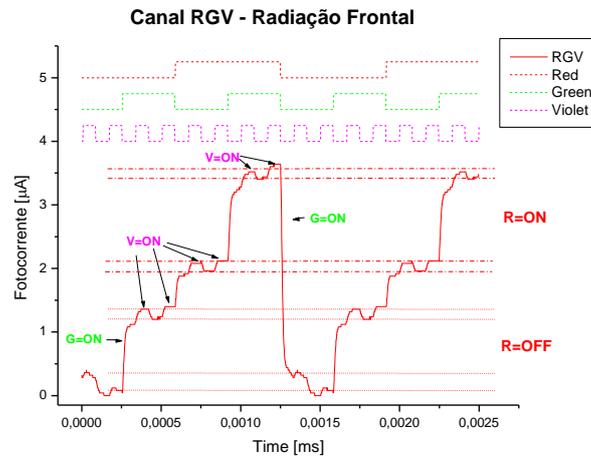


Figura 63 – Decodificação dos canais RGV sobre a radiação frontal.

O sinal obtido com radiação de fundo pelo lado posterior apresenta 8 níveis de fotocorrente bastante próximos (Figura 64). O canal violeta apresenta uma forte amplificação, sendo possível a divisão em grupos de quatro níveis. O primeiro grupo corresponde aos quatro níveis de maior fotocorrente, ou seja, à presença do canal violeta (V=ON) e o segundo grupo corresponde aos menores níveis de fotocorrente dados pela ausência do canal violeta (V=OFF). Em cada um dos grupos, o segundo maior nível de fotocorrente é dado pela combinação R=ON e G=OFF, seguido da combinação R=OFF e G=ON. Contrariamente à combinação RGB, o canal vermelho apresenta uma maior amplificação que o canal verde.

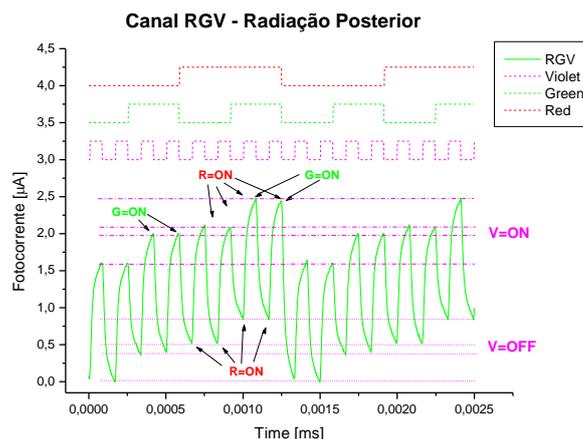


Figura 64 – Decodificação dos canais RGV sobre a radiação posterior.

5.4.9. Canais RBV

Na análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais RBV são utilizados os LEDs vermelho, azul e violeta. Em cada uma destas combinações são utilizadas as sequências já apresentadas, tendo sido contemplados os cenários com a radiação posterior e frontal do led

violeta e com o dispositivo no escuro. A Figura 65 apresenta o resultado das medições para as quatro seqüências.

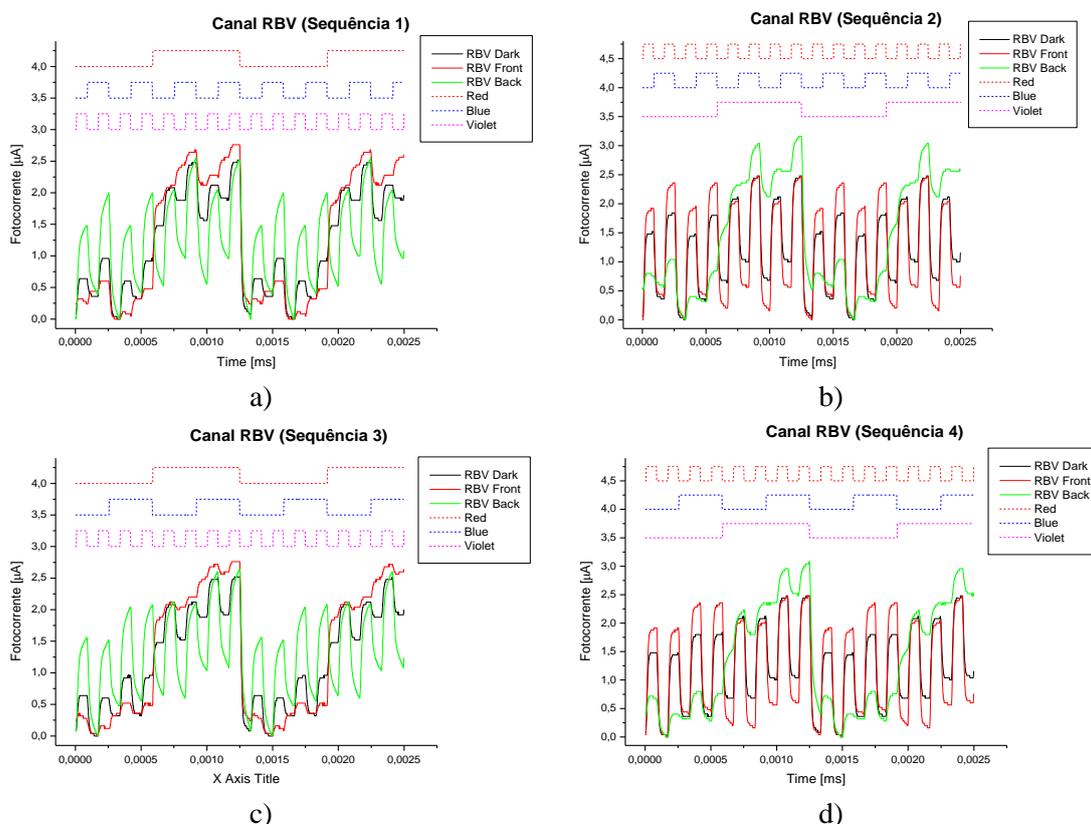


Figura 65 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RBV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) seqüência 1; b) seqüência 2; c) seqüência 3; d) seqüência 4.

As medidas realizadas demonstram que existem oito níveis de fotocorrente, os quais correspondem a oito combinações ON/OFF entre os três canais. A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta apresenta um fundo frontal ou posterior.

Em todas as seqüências, a maior amplitude de fotocorrente ocorre quando os canais vermelhos, azul e violeta se encontram a ON e um menor nível quando estes se encontram a OFF.

O sinal obtido com radiação de fundo pelo lado frontal pode ser dividido em dois grupos, devido à forte amplificação do canal vermelho (Figura 66). O primeiro grupo é composto pelos quatro níveis com maior fotocorrente que ocorrem quando existe o canal vermelho (R=ON), sendo que o segundo grupo corresponde aos quatro níveis de menor fotocorrente, ou seja, à ausência do canal vermelho (R=OFF). A radiação frontal amplifica mais o canal azul que o violeta; desta maneira, dentro de cada grupo o segundo maior nível de fotocorrente é correspondente à combinação B=ON e V=OFF, seguido da combinação B=OFF e V=ON. O canal violeta, por sua vez, é atenuado e o mesmo não tem grande influência no sinal medido sob

radiação frontal. Ao contrário da combinação RGB, aqui é o canal azul que tem maior amplificação, fazendo um pouco o papel do canal verde.

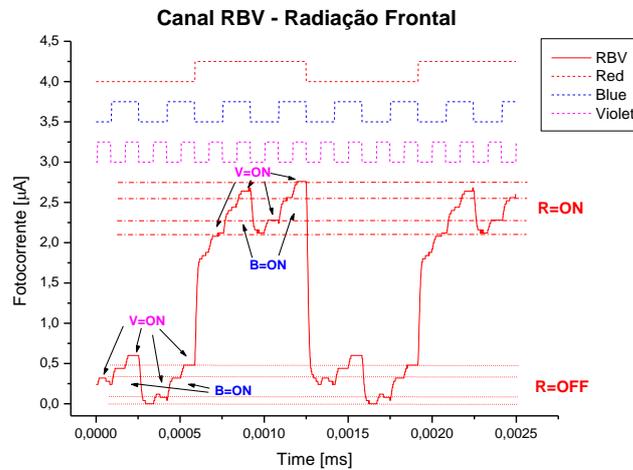


Figura 66 – Descodificação dos canais RBV sobre a radiação frontal.

O sinal obtido com radiação de fundo pelo lado posterior o violeta sofre uma forte amplificação (Figura 67), sendo que os restantes canais são atenuados. Existem 8 níveis de fotocorrente, sendo possível uma divisão em grupos de quatro níveis. O primeiro grupo adequa-se aos quatro níveis de maior fotocorrente, que correspondem à presença do canal violeta (V=ON), e o segundo grupo corresponde aos menores níveis de fotocorrente dados pela ausência do canal violeta (V=OFF). Em cada um dos grupos, o segundo maior nível de fotocorrente é dado pela combinação R=ON e B=OFF, seguido da combinação R=OFF e B=ON. À semelhança da combinação RGV o canal vermelho apresenta uma maior amplificação que o canal azul.

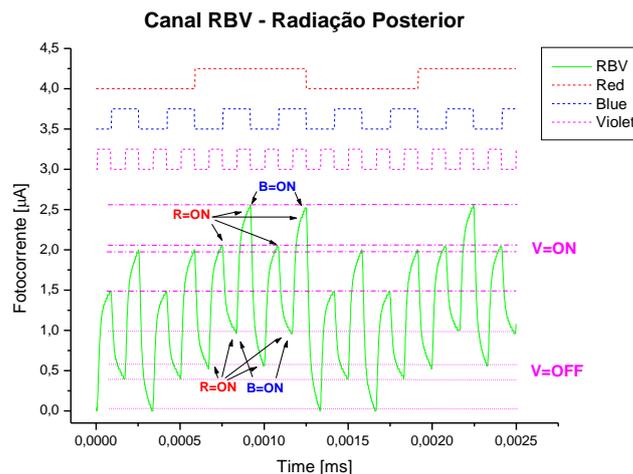


Figura 67 – Descodificação dos canais RBV sobre a radiação posterior.

5.4.10. Canais GBV

Na análise da fotocorrente gerada com a combinação dos canais GBV são usados os LEDs verde, azul e violeta. Cada uma destas combinações utiliza as sequências já apresentadas,

contemplando os cenários com a radiação posterior e frontal do LED violeta e com o dispositivo no escuro. A Figura 68 apresenta o resultado das medições para as quatro sequências.

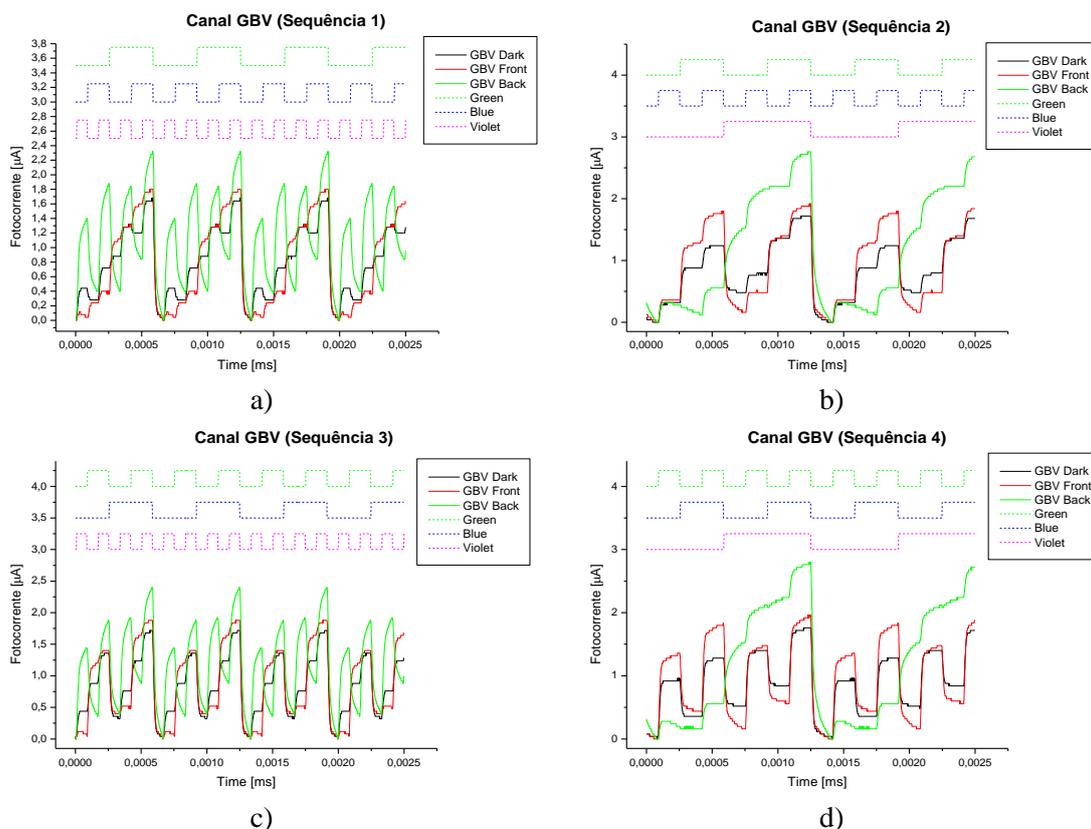


Figura 68 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais GBV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

As medidas realizadas demonstram que existem oito níveis de fotocorrente, os quais correspondem a oito combinações ON/OFF correspondentes aos três canais. A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta apresenta um fundo frontal ou posterior.

Em todas as sequências, a maior amplitude de fotocorrente ocorre quando os canais verde, azul e violeta se encontram a ON e um menor nível quando estes se encontram a OFF.

O sinal obtido com radiação de fundo pelo lado frontal pode ser dividido em dois grupos, devido à forte amplificação do canal verde (Figura 69). O primeiro grupo é composto pelos quatro níveis com maior fotocorrente que ocorrem quando existe o canal verde (G=ON), sendo que o segundo grupo corresponde aos quatro níveis de menor fotocorrente - à ausência do canal verde (G=OFF). A radiação frontal amplifica mais o canal azul que o violeta. Assim sendo, dentro de cada grupo, o segundo maior nível de fotocorrente corresponde à combinação B=ON e V=OFF, seguido da combinação B=OFF e V=ON. Tal como na combinação anterior RBV, também aqui o canal violeta é atenuado, uma vez que o mesmo não tem grande influência na radiação frontal.

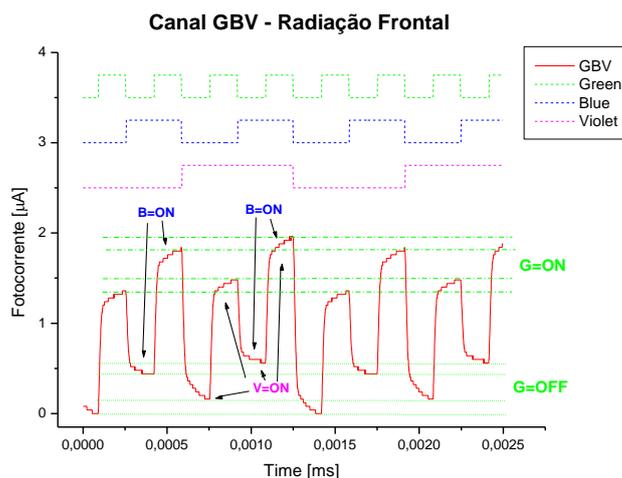


Figura 69 – Decodificação dos canais GBV sobre a radiação frontal.

O sinal obtido na radiação de fundo pelo lado posterior, o violeta sofre uma forte amplificação, enquanto os restantes canais são atenuados (Figura 70). Existem 8 níveis de fotocorrente, sendo possível uma divisão em grupos de quatro níveis. O primeiro grupo corresponde aos quatro níveis de maior fotocorrente que correspondem à presença do canal violeta (V=ON) e o segundo grupo corresponde aos menores níveis de fotocorrente dados pela ausência do canal violeta (V=OFF). Em cada um dos grupos, o segundo maior nível de fotocorrente é dado pela combinação B=ON e G=OFF, seguido da combinação B=OFF e G=ON. Ao contrário das situações anteriores, o canal azul é o que apresenta a segunda maior amplificação.

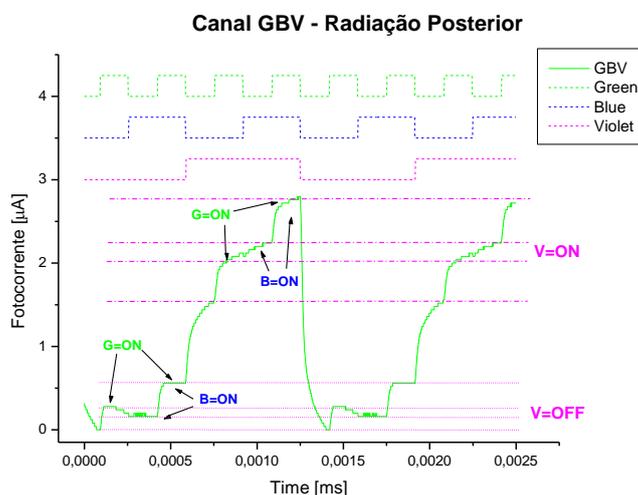


Figura 70 – Decodificação dos canais GBV sobre a radiação posterior.

5.4.11. Canais RGBV

A última combinação apresenta os canais RGBV e faz uso dos LEDs vermelho, verde, azul e violeta. São utilizadas as sequências anteriormente apresentadas e contemplados os

cenários com radiação posterior e frontal, através do canal violeta e com o dispositivo no escuro. A Figura 71 mostra o resultado das medições da fotocorrente para as quatro sequências.

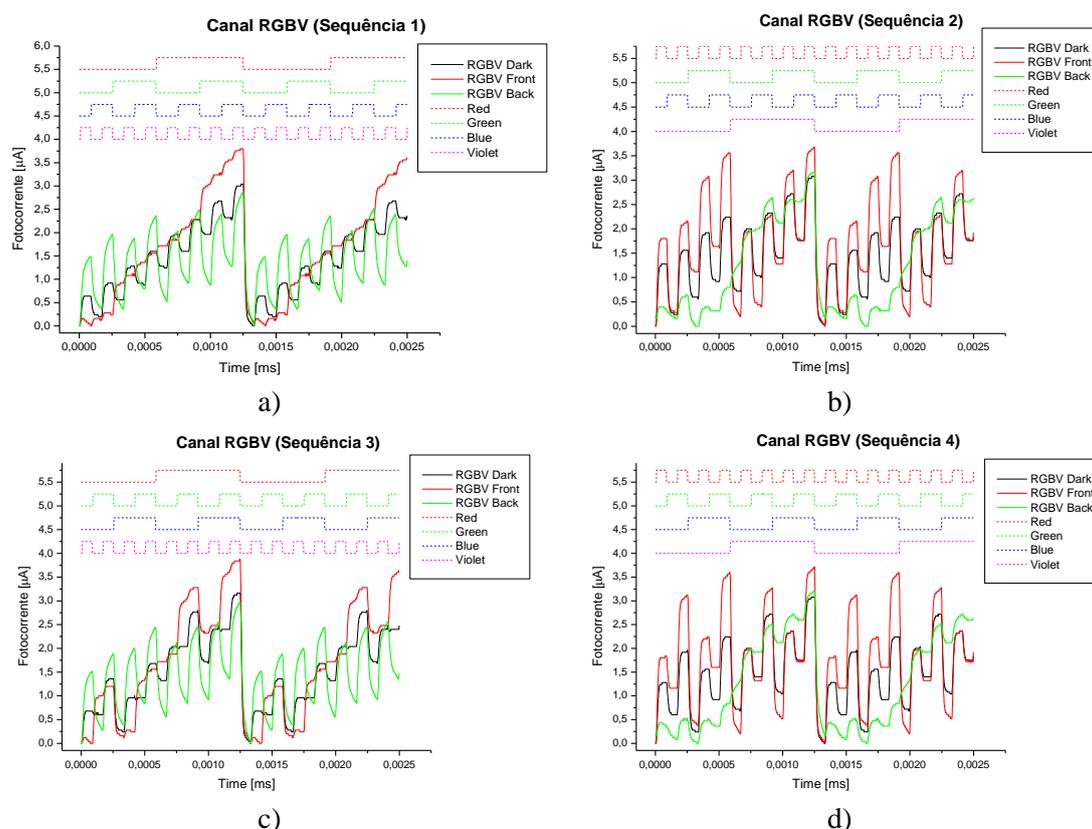


Figura 71 – Fotocorrente normalizada gerada através dos canais RGBV com radiação posterior e frontal de cor violeta: a) sequência 1; b) sequência 2; c) sequência 3; d) sequência 4.

As medidas realizadas demonstram que existem dezasseis níveis de fotocorrente, os quais correspondem a dezasseis combinações ON/OFF possíveis entre os quatro canais. A amplitude da fotocorrente gerada é diferente nas medições apresentadas, ou seja, quando existe ou não radiação de fundo e quando esta incide no dispositivo pelo lado frontal ou posterior.

Em cada sequência, o patamar de maior fotocorrente corresponde à presença dos quatro canais RGBV a ON e o patamar de menor nível à ausência dos quatro canais.

O sinal de fotocorrente obtido com radiação de fundo pelo lado frontal pode ser dividido em dois grupos, devido à forte amplificação do canal vermelho (Figura 72). O primeiro grupo é composto pelos oito níveis com maior fotocorrente que ocorrem na presença do canal vermelho (R=ON), o segundo grupo corresponde aos oito níveis de menor fotocorrente, ou seja, à ausência do canal vermelho (R=OFF). O segundo canal mais amplificado é o canal verde, sendo que os quatro níveis de maior fotocorrente em cada grupo correspondem ao canal verde a ON, e os de menor valor ao canal verde a OFF. O terceiro canal mais amplificado é o azul, sendo amplificado ligeiramente e agrupados em dois subgrupos, onde os dois níveis de maior fotocorrente

correspondem ao canal azul a ON e os dois menores à ausência do canal azul. Por último, o canal violeta é atenuado, sendo que este não apresenta grande influência na radiação frontal.

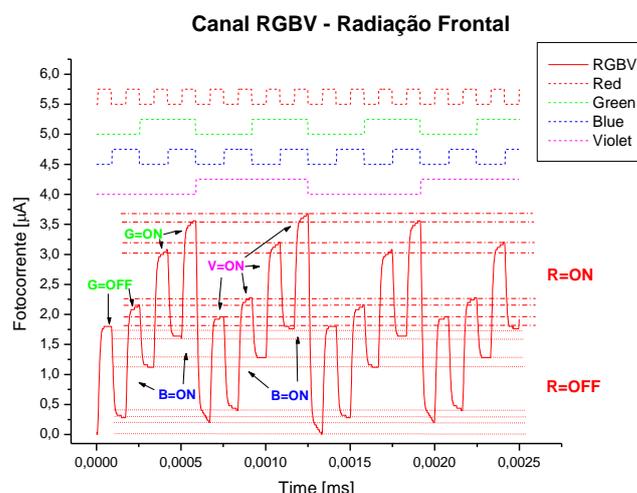


Figura 72 – Descodificação dos canais RGBV sobre a radiação frontal.

O sinal de fotocorrente obtido com radiação de fundo pelo lado posterior mostra que o violeta sofre uma forte amplificação, enquanto os restantes canais são atenuados (Figura 73). Existem dezasseis níveis de fotocorrente, sendo possível uma divisão em grupos de oito níveis. O primeiro grupo corresponde aos oito níveis de maior fotocorrente que correspondem a presença do canal violeta (V=ON) e o segundo grupo corresponde aos menores níveis de fotocorrente dados pela ausência do canal violeta (V=OFF). Cada quatro níveis de cada grupo de maior fotocorrente correspondem à presença do canal azul e os menores à sua ausência. Cada quatro níveis podem ser divididos em dois subgrupos, onde os níveis de maior fotocorrente correspondem ao canal vermelho a ON e os dois níveis de menor fotocorrente ao canal vermelho a OFF. Por último, o canal verde é descodificado a cada dois níveis, sendo o maior correspondente a ON e o menor a OFF.

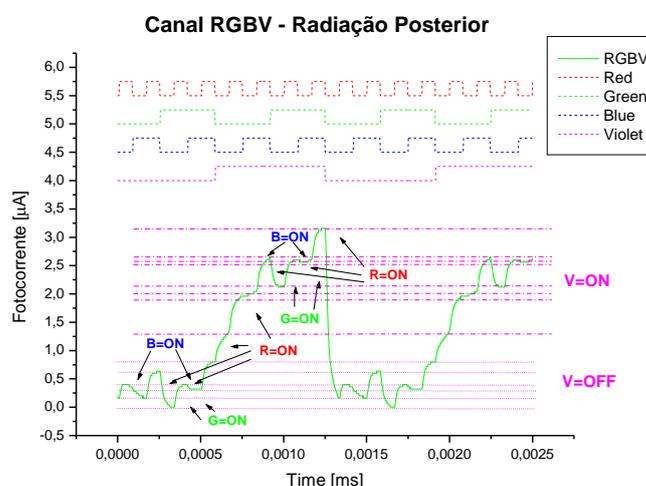


Figura 73 – Descodificação dos canais RGBV sobre a radiação posterior.

A implementação deste algoritmo baseado na comparação entre os sinais de fotocorrente medidos com fundos pelo lado frontal e posterior permite assim a identificação dos sinais associados a cada fonte ótica, e conseqüentemente possibilitam a implementação da desmultiplexagem do sinal de fotocorrente.

5.5. Referências

- [1] P. Louro, M. Vieira, M. A. Vieira, M. Fernandes, J. Costa, “Use of a-SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications”, *Advances in Photodiodes*, 2010;
- [2] M. Vieira, M. A. Vieira, P. Louro, A. Fantoni, V. Silva, “SiC multilayer add/drop filter for optical interconnects”, 2013;
- [3] J. Reis, “Implementação de WDM com 4 canais no espectro do visível”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2013, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/3298>;
- [4] M. Vieira, “Three Transducers for One Photodetector: eassays for optical communications”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012;
- [5] T. A. Silva, "Implementação de WDM com dispositivos semicondutores", Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2011, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/1238>;
- [6] N. Massa, “Fiber Optic Telecommunication”, University of Connecticut, Massachusetts, 2000;
- [7] H. Ferraz, “Fotodetector e dispositivo WDM integrados”, Tese de mestrado em Eng^a de Electrónica e Telecomunicações, ISEL, 2012, <http://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/2180>;
- [8] M. A. Vieira, 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;
- [9] M. Haupt, U. Fischer-Hirchert, “WDM Key Element in the visible spectrum for standard SI-POF”, Fachhochschule Schmalkalden, 2010;
- [10] J. Wilson, J. Hawkes, “Optoelectronics – An introduction”, Prentice Hall, London, 1998.

Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

A tecnologia WDM tem, como objetivo, a transmissão em redes de longa distância através de fibras óticas de sílica. Faz uso das capacidades destas fibras, através da divisão pelo comprimento de onda, permitindo que vários sinais possam ser transmitidos. Assim, o WDM torna-se numa alternativa na expansão das redes de transmissão, pois evita a instalação de fibras óticas suportando mais serviços e utilizadores.

As fibras óticas de plástico, compostas essencialmente por plástico, constituem uma alternativa menos dispendiosa às fibras óticas de sílica. O seu principal objetivo é a transmissão de sinais para ligações de curta distância, sendo uma alternativa ao cabo de pares entrançados e ao cabo coaxial. No entanto, apesar da sua aquisição de dados com débitos elevados, não surgem com o intuito de substituir as fibras óticas de sílica, uma vez que não são adequadas para transmissões de longa distância.

Esta dissertação assenta na continuação do estudo de um dispositivo WDM na região do espectro visível. Este é baseado numa estrutura semicondutora constituída por um fotodíodo PIN frontal baseado em a-SiC:H e um fotodíodo posterior baseado em a-Si:H. O fotodíodo frontal é o indicado para absorver os comprimentos de onda entre os 400nm e 590nm, sendo o fotodíodo posterior indicado para absorver comprimentos de onda acima dos 590nm. A sensibilidade espectral do dispositivo, na região do visível, é modulada pelo sinal de tensão elétrico aplicado e/ou pela presença da polarização ótica adicional, pela incidência da luz. Os resultados dos estudos anteriormente realizados foram um importante suporte para as opções inicialmente tomadas.

Com base nestes estudos realizados, foi executada uma avaliação da influência da radiação de fundo de cor violeta no dispositivo pelo lado frontal e posterior, face aos comprimentos de onda incidentes. Foram utilizados quatro LEDs como fontes óticas de sinal, sendo que cada um é responsável pela transmissão de um comprimento de onda: o violeta com 400nm, o azul com 470nm, o verde com 525nm e o vermelho com 626nm. Com este estudo foi possível avaliar a potência ótica de cada um destes canais e caracterizar os dispositivos no que diz respeito ao ganho ótico produzido pela influência da radiação de fundo frontal e posterior.

Foi realizado um estudo individual para cada canal, de modo a analisar a influência da potência ótica sobre a ausência e a presença da radiação de fundo pelo lado posterior e frontal.

É possível verificar que na presença da radiação de fundo pelo lado frontal são amplificados os comprimentos de onda mais longos, no espectro do visível, ou seja, os canais verde e vermelho. Por sua vez, os comprimentos de onda curtos, ou seja, o azul e o violeta, são pouco amplificados, sendo que no caso do violeta até chega a ser atenuado. Verifica-se, ainda, que os maiores ganhos óticos ocorrem para o canal vermelho.

A aplicação da radiação de fundo pelo lado posterior tem um comportamento oposto ao do lado frontal. Assim, os comprimentos de onda curtos sofrem uma forte amplificação do sinal, ou seja, o canal azul e violeta. Por sua vez, os comprimentos de onda mais longos, o azul e o vermelho, sofrem uma ligeira amplificação e por vezes até uma atenuação. Neste caso, os ganhos óticos mais elevados ocorrem na presença do canal violeta.

Em todos os canais verificou-se que a fotocorrente apresenta um efeito capacitivo, semelhante à carga ou descarga de um condensador. É possível concluir que a presença da radiação de fundo violeta é absorvida pelo fotodíodo frontal, sendo provocado um aumento de campo elétrico no fotodíodo posterior onde o canal vermelho e verde são absorvidos. Sobre a presença da radiação de fundo no fotodíodo posterior é aumentado o campo elétrico no fotodíodo frontal, provocando a absorção dos canais verde, azul e violeta.

Para complemento deste estudo foi realizada uma análise WDM para os canais RGBV num cenário com diferentes frequências de modulação e quatro sequências. Esta análise complementa o estudo dos canais individuais realizado anteriormente e acrescenta um estudo dos canais combinados dois a dois, três a três e, por último, com todos os canais. Para tal, foi realizada uma calibração do dispositivo, atribuindo diferentes valores de corrente para cada canal, sendo possível ter diferentes níveis lógicos.

Como complemento da análise individual e tendo em conta a radiação de fundo pelo lado frontal, conclui-se que a frequência de modulação tem mais expressão no canal vermelho, sendo que o ganho ótico aumenta com o aumento da frequência de modulação. Por sua vez, com a radiação de fundo pelo lado posterior, a frequência de modulação influencia mais o canal violeta, onde o aumento da frequência de modulação faz diminuir o ganho ótico.

Com a análise dos canais combinados foi possível proceder à descodificação dos sinais transmitidos. Tendo a amplificação do canal vermelho com a radiação de fundo pelo frontal e a amplificação do canal violeta com a radiação de fundo pelo lado posterior. Conclui-se que o código de descodificação pelo lado frontal tem a forma de RGBV e, pelo lado posterior, tem a forma de VBGR.

O estudo desenvolvido nesta dissertação permite verificar o comportamento do dispositivo semiconductor sob aplicação da radiação de fundo de cor violeta. É possível concluir que o dispositivo pode ser utilizado como dispositivo WDM de quatro canais.

Para trabalho futuro aponta-se a necessidade de testar as capacidades de filtragem do dispositivo quando são usadas fibras óticas de plástico. Realizar um novo cenário de testes, utilizando sequências aleatórias, ou seja, com diferentes níveis lógicos e estudar o seu comportamento na descodificação dos canais RGBV.