

Referências bibliográficas

1. CROWDER, J. G. Infrared Methods for Gas Detection. In: KRIER, A. **Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics**. Londres: Springer-Verlag, 2006. p. 598-613.
2. ILEV, I. K.; WAYNANT, R. W. Mid-Infrared Biomedical Applications. In: KRIER, A. **Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics**. Londres: Springer-Verlag, 2006. p. 615-634.
3. GUNAPALA, S.. D.; BANDARA, S.. V. Quantum Well Infrared Photodetector Focal Plane Arrays. In: LIU, H. C.; CAPASSO, F. **Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications I**. San Diego: Academic Press, 2000. Cap. 4, p. 197-282.
4. TITTERTON, D. H. Development of infrared countermeasure technology and systems. In: KRIER, A. **Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics**. Londres: Springer-Verlag, 2006. p. 635-671.
5. HAYWOOD, S.; LAI, K. T. QWIP Detectors for the MWIR. In: KRIER, A. **Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics**. Londres: Springer-Verlag, 2006. p. 429-452.
6. BHATTACHARYA, P.; STIFF-ROBERTS, A. D.; CHAKRABARTI, S. Mid-Infrared Quantum Dot Photodetectors. In: KRIER, A. **Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics**. Londres: Springer-Verlag, 2006. p. 487-513.
7. TOWE, E.; PAN, D. Semiconductor quantum-dot nanostructures: Their application in a new class of infrared photodetectors. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 6, n. 3, p. 408-421, maio/junho 2000.
<http://dx.doi.org/10.1109/2944.865096>.
8. SCHNEIDER, H.; LIU, H. C. Quantum Well Infrared Photodetectors. Berlin: Springer-Verlag, 2007. p. 13-16.
9. LEVINE, B. F. Quantum-well infrared photodetectors. **Journal of Applied Physics**, v. 74, p. R1-R81, 1993. <http://dx.doi.org/10.1063/1.354252>.
10. LEVINE, B. F. et al. High sensitivity low dark current 10 μm GaAs quantum well infrared photodetectors. **Applied Physics Letters**, v. 56, p. 851-853, 1990.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.102682>.
11. CAPASSO, F. Band-Gap Engineering: From Physics and Materials to New Semiconductor Devices. **Science**, v. 235, p. 172-176, 1987.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.235.4785.172>.
12. LEONARD, D. et al. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent

islands of InGaAs. **Applied Physics Letters**, v. 63, p. 3203-3205, 1993.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.110199>.

13. PHILLIPS, J. et al. Self-Assembled InAs–GaAs Quantum-Dot Intersubband Detectors. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 35, n. 6, p. 936, junho 1999.
<http://dx.doi.org/10.1109/3.766837>.
14. MESHKOV, S. V. Tunneling of electrons from a two-dimensional channel into the bulk. **Journal of Experimental and Theoretical Physics**, v. 64, p. 1337-1343, 1986.
<http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/e/index/e/64/6/p1337?a=list>.
15. KASAP, S. O. **Principles of Electronic Materials and Devices**. Nova Iorque: McGraw Hill, 2006.
16. LEVINE, B. F. et al. 19 μm cutoff long-wavelength GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum-well infrared photodetectors. **Journal of Applied Physics**, v. 71, p. 5130-5135, 1992.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.350618>.
17. KATAYAMA, H. et al. Development of Type II Superlattice Detector for Future Space Applications in JAXA. **2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim**.
<http://dx.doi.org/10.1109/CLEOPR.2013.6600097>.
18. ROGALSKI, A. Quantum Well Infrared Photoconductors in Infrared Detectors Technology. In: RYZHII, V. I. **Intersubband Infrared Photodetectors**. Singapore: World Scientific, 2003. p. 1-66.
19. RYZHII, V. et al. Dark Current in Quantum Dot Infrared Photodetectors. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 39, p. L1283-L1285, 2000.
<http://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.39.L1283/meta>.
20. PENELLO, G. M. **Crescimento e estudo de fotodetectores de infravermelho de pontos quânticos acoplados com poços quânticos parabólicos**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado/UFRJ, 2009.
21. PERKOWITZ, S. **Optical Characterization of Semiconductors**. London: Academic Press Limited, 1993.
22. LOPES, A. J. D. S. **Crescimento de pontos quânticos das famílias InAs/InP, InAs/InGaAs e InAs/InGaAlAs para fotodetectores de radiação infravermelha**. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado/PUC-Rio, 2008.
23. PENELLO, G. M. **Investigação teórica e experimental do papel de super-redes em fotodetectores de infravermelho médio baseados em poços quânticos**. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado/UFRJ, 2013.
24. BANDARA, S. et al. Quantum Well Infrared Photodetectors: Device Physics and Light Coupling. In: LI, S. S.; SU, Y.-K. **Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Devices**. New York: Springer, 1998.
25. BASTARD, G. **Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures**. Les Ulis:

Les Éditions de Physique, 1988.

26. SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals of Photonics**. New Jersey: Wiley, 2007.
27. SCHNEIDER, H. et al. Photovoltaic intersubband detectors for 3-5 μm using GaAs quantum wells sandwiched between AlAs tunnel barriers. **Semicond. Sci. Technol.**, v. 6, p. C120-C123, 1991. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0268-1242/6/12C/024/meta>.
28. SCHNEIDER, H. et al. Space-charge effects in photovoltaic double barrier quantum well infrared detectors. **Applied Physics Letters**, v. 63, p. 782-784, 1993. <http://dx.doi.org/10.1063/1.109906>.
29. HELM, M. The Basic Physics of Intersubband Transitions. In: LIU, H. C.; CAPASSO, F. **Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications I**. San Diego: Academic Press, 2000. p. 1-99.
30. LIU, H. C.; BUCHANAN, M.; WASILEWSKI, Z. R. QWIP Performance and Polarization Selection Rule. In: LI, S. S.; SU, Y.-K. **Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Devices**. New York: Springer, 1998.
31. SOUZA, P. L. et al. Quantum dot structures grown on Al containing quaternary material for infrared photodetection beyond 10 μm . **Applied Physics Letters**, v. 90, p. 173510.1-3, 2007. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2733603>.
32. DUPONT, E. et al. Two-photon intersubband transitions in quantum well infrared photoconductors. **Applied Physics Letters**, v. 65, p. 1560-1562, 1994. <http://dx.doi.org/10.1063/1.113004>.
33. DEGANI, M. H. et al. Multiple-photon peak generation near the $\sim 10 \mu\text{m}$ range in quantum dot infrared. **Journal of Applied Physics**, v. 109, p. 064510.1-8, 2011. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3556432>.
34. GEBHARD, T. et al. Intraband Auger effect in InAs/InGaAlAs/InP quantum dot structures. **Applied Physics Letters**, v. 93, p. 052103.1-3, 2008. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2965804>.
35. ALVARENGA, D. R. et al. Exceptionally Narrow-Band Quantum Dot Infrared Photodetector. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 48, n. 10, p. 1360-1366, outubro 2012. <http://dx.doi.org/10.1109/JQE.2012.2210539>.
36. ALVARENGA, D. et al. Simultaneous positive and negative photocurrent response in asymmetric quantum dot infrared photodetectors. **Journal of Applied Physics**, v. 113, p. 043721.1-5, 2013. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4789963>.
37. WEST, L. C.; EGLASH, S. J. First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well. **Applied Physics Letters**, v. 46, p. 1156-1158, 1985. <http://dx.doi.org/10.1063/1.95742>.
38. VURGAFTMAN, I.; MEYER, J. R.; RAM-MOHAN, L. R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 89, p.

- 5815-5875, 2001. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1368156>.
39. CHUANG, S. L. **Physics of Optoelectronic Devices**. New York: Wiley-Interscience, 1995.
40. LEE, J. et al. Eigen-Energies and Eigen-Functions of Symmetroidal Quantum Dots. **Chinese Journal of Physics**, p. 102-115, 2004. <http://PSROC.phys.ntu.edu.tw/cjp>.
41. PARRA-MURILLO, C. A. **Study of Semiconductor Heterostructures with Embedded Quantum Dots: Micropillars and Photodetectors**. Belo Horizonte: Master in Physics Thesis/UFGM, 2009.
42. SMITH, B. C. **Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy**. New York: CRC Press, 2011.
43. CHRISTY, A. A.; OZAKI, Y.; GREGORIOU, V. G. **Modern Fourier Transform Infrared Spectroscopy**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001.

Apêndice:

Metodologia para medidas de absorção

É de praxe, para se obter espectros de absorção de QWIPs, usar-se o seguinte método:

- 1) Posiciona-se a amostra de modo que o feixe incida com ângulo de aproximadamente 45° sobre as camadas da região ativa;
- 2) Usa-se um polarizador de modo que o feixe incidente sobre a amostra ora tenha polarização *p*, ora polarização *s*;
- 3) Realizam-se medições *s* e *p* na presença da amostra, mas também sem a presença da amostra para serem usadas como medidas de referência e
- 4) Processam-se os espectros da seguinte forma:

$$\text{espectro de absorção} = \frac{\text{amostra (s)}/\text{amostra (p)}}{\text{referência (s)}/\text{referência (p)}} \quad (17)$$

Esse método se vale da regra de seletividade para QWIPs segundo a qual não há absorção de radiação com campo elétrico no plano da interface. Assim, os espectros medidos para a radiação de polarização *s* servem como referência para a absorção que acontece na região ativa do fotodetector quando se incide radiação de polarização *p*. É um método muito conveniente, pois entre a medição que usa radiação de polarização *s* sobre a amostra e a medição que usa sobre ela radiação de polarização *p* não há necessidade de manipular a amostra, apenas o polarizador, e assim tem-se assegurado (já que a radiação incidente sobre o polarizador é não polarizada) que a mesma intensidade de radiação incide sobre a amostra nas duas medições.

No caso de QDIPs, porém, como a regra de seletividade não vale, é preciso usar de outros artifícios.

a. Transmitância, absortividade e absorbância

As grandezas que medem a absorção e a transmissão de radiação de um certo comprimento de onda através de um material transparente nem sempre são definidas do mesmo modo e com o mesmo nome nos diversos campos de estudo que se interessam por esse fenômeno. Vamos usar aqui as definições e nomenclatura conforme apresentadas por Christy *et al.* [42].

Transmitância é definida por:

$$\mathbb{T} = \frac{I_t}{I_0} \quad (18)$$

onde I_0 é a intensidade da radiação incidente sobre a amostra e I_t é a intensidade da radiação transmitida (Figura 32).

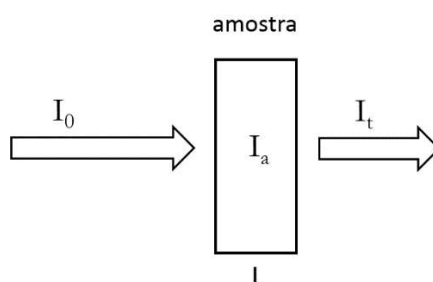


Figura 32: No esquema, L é a espessura de uma amostra de material transparente, atravessada por um feixe de luz.

Absortividade é definida por:

$$A = \frac{I_a}{I_0} \quad (19)$$

onde I_a é a intensidade de luz absorvida.

Se o material não espalha a luz e não é fluorescente, então:

$$I_0 = I_t + I_a \quad (20)$$

$$e \quad \forall + A = 1 \quad (21)$$

Mas de acordo com a lei de Lambert-Beer,

$$I_t = I_0 e^{-\alpha L} \quad (22)$$

onde α é o coeficiente de absorção do material e varia com λ .

Assim,

$$\ln(I_t/I_0) = -\alpha L \quad (23)$$

Então, convém definir outra grandeza, a que se dá o nome de *absorbância*:

$$A = \log(I_0/I_t) \quad (24)$$

A vantagem de se usar a absorbância (em vez da absortividade) é que ela tem um comportamento linear em relação ao caminho ótico. Isso significa que:

1. A soma das absorbâncias de dois trechos do caminho ótico é igual à absorbância da soma dos trechos;
2. O comprimento do caminho ótico através de um material é proporcional à absorbância através daquele caminho.

b. Técnica de espectroscopia

Neste trabalho, foi preciso medir espectros de absorção para a região ativa de uma amostra de QDIP, na faixa do infravermelho entre 2,5 e 14 μm .

A técnica de caracterização usada foi a Espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (ou FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*).

A intensidade medida pelo detector traz a informação da absorção que acontece na região ativa da amostra. Porém, também traz a informação de alterações devidas à presença de todos os demais elementos que compõem o caminho ótico, desde a fonte até o detector do espectrômetro (Figura 33).

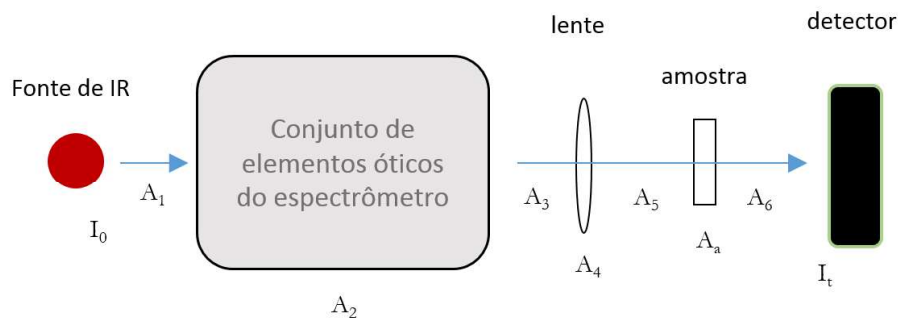


Figura 33: Exemplo de caminho ótico percorrido pelo feixe de infravermelho desde a fonte até o detector do espectrômetro FTIR. A absorvância de cada trecho representado na figura está indicada por $A_1, A_2 \dots A_6$, e a da amostra, por A_a . O conjunto de elementos óticos do espectrômetro incluem lentes, espelhos, *beam splitters* e janelas. Nos trechos entre dois elementos óticos também ocorre absorção, devida à presença de gases.

Além disso, a própria fonte tem seu espectro característico, ou seja, sua intensidade não é uniforme ao longo da faixa de frequência em que se está interessado. Também o detector é capaz de imprimir variações de intensidade no espectro medido. Convém mencionar aqui que, além de absorver, os elementos que compõem o caminho ótico podem também espalhar e refletir radiação. No modelo proposto aqui, as absorvâncias compreendem todas as perdas na intensidade da radiação.

Teoricamente, todas essas interferências podem ser eliminadas fazendo-se duas medições: uma em que a amostra está presente no caminho ótico e outra, em que a amostra não está presente. Se realizarmos essas duas medições, basta calcular o logaritmo da razão entre a intensidade obtida na primeira medida e a intensidade obtida na segunda para encontrar a absorvância da amostra.

Assim, temos na primeira medida:

$$I_t = I_{amostra} = I_0 e^{-(A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_{amostra} + A_6)/0,434} \quad (25)$$

onde $I_{amostra}$ é a intensidade obtida com a presença da amostra, $A_{amostra}$ é a absorvância da amostra e 0,434 é o fator de correção por mudança de base logarítmica. (Ver equações 23 e 24.)

Na segunda medida, temos:

$$I_t = I_{ref} = I_0 e^{-(A_1+A_2+A_3+A_4+A_5+A_6)/0,434} \quad (26)$$

onde I_{ref} indica que se trata da medida de referência, sem a presença da amostra.

Fazendo a razão entre I_{ref} e $I_{amostra}$, e supondo que I_0 é igual nas duas medidas, temos:

$$A_{amostra} = \log(I_{ref}) - \log(I_{amostra}) \quad (27)$$

que é o processamento realizado para obter os espectros de absorbância.

c. Dificuldades experimentais e processamento de espectros

Quando se está interessado, como no presente estudo, na absorção ocorrendo apenas na região ativa de uma amostra, separando-a da absorção que possa estar ocorrendo no substrato, é preciso usar de um artifício para incluir na medida de referência a absorção no substrato. Fabrica-se, para este fim, a partir do *waffle* de um substrato igual ao usado para crescer a amostra, uma peça de dimensões iguais à da amostra. Assim, em vez de apenas retirar a amostra do caminho ótico para realizar a medida de referência, devemos substituí-la por essa peça.

Esse artifício introduz duas dificuldades experimentais. A primeira é a clivagem e polimento do substrato para produzir uma peça de dimensões exatas. A outra é posicionar a amostra e o substrato exatamente na mesma região do feixe invisível de radiação infravermelha, quando estamos preparando cada medição. Ao não ser possível certificar-se de que o posicionamento é o mesmo, tampouco se pode ter certeza de que a intensidade de radiação que incidiu sobre a amostra é a mesma que incidiu sobre o substrato.

O resultado dessas duas dificuldades é que, ao se fazer a subtração dos espectros obtidos em uma e outra medição (equação 27), talvez não se elimine a contribuição ao espectro dos diversos elementos que, além da região ativa da amostra, compõem o caminho ótico. Em vez de se obter a absorbância da região

ativa, o que se obtém é algo parecido com o espectro da medida de referência (I_{ref}) ou da amostra ($I_{amostra}$), que são, invariavelmente, parecidos um ao outro.

Nesses casos, para compensar as inexatidões experimentais resultantes das duas dificuldades descritas acima, e tomando partido do comportamento linear da absorbância em relação ao caminho ótico, pode-se incluir na equação um fator de subtração.

$$A_{amostra} = F_{subtr} \log(I_{ref}) - \log(I_{amostra}) \quad (27)$$

É preciso observar que o uso do fator de subtração, assim como de qualquer outro método de processamento espectral, deve obedecer a um critério rigoroso, de modo a se evitar distorções da informação espectral [43].

d. “Guia de onda”

Para completar as observações sobre a metodologia usada nas medidas de absorção, resta comentar sobre o posicionamento da amostra em relação ao feixe.

A região ativa das amostras crescidas para as medidas de absorção tem 20 períodos, e cada período um QW e uma camada de QDs (seção 5.2). Para que o efeito da absorção devida às nanoestruturas quânticas se observe de modo mais acentuado nas medidas, é desejável que o feixe atravessasse a região ativa várias vezes antes de emergir da amostra e dirigir-se ao detector do espectrômetro. Isto é conseguido adotando-se na realização da medida um arranjo espacial segundo o qual o feixe atravessa a amostra como a um guia de onda. Com esse objetivo, as extremidades da amostra são polidas na forma de chanfro, com ângulo de 45°, conforme se vê na Figura 34.

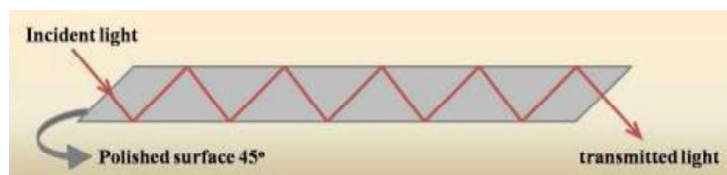


Figura 34: Amostra atravessada por radiação, na configuração “guia de onda”.