

Desenvolvimento de Sensores de Infravermelho Nanoestruturados por uma Rede de Instituições no Brasil

G. S. Vieira¹, A. Passaro¹, N. M. Abe¹, R. Y. Tanaka¹, M. P. Pires², P. L. de Souza³, P. S. S. Guimarães⁴, W. N. Rodrigues⁴

¹EFA-E, Instituto de Estudos Avançados, CTA, ²Instituto de Física, UFRJ, ³Laboratório de Semicondutores, CETUC, PUC-Rio, ⁴Departamento de Física, ICEx, UFMG

Resumo — Apresentamos, neste trabalho, os fundamentos básicos e os resultados obtidos por uma rede de instituições de ensino e pesquisa do Brasil no desenvolvimento de sensores de infravermelho nanoestruturados. Esta rede vem trabalhando no projeto das estruturas semicondutoras, no crescimento das mesmas, no processamento dos cristais e na caracterização, tanto das etapas intermediárias, quanto dos dispositivos finais. Os sensores de infravermelho nanoestruturados dividem-se em, basicamente, dois tipos: os sensores a poços quânticos (QWIP) e os sensores a pontos quânticos (QDIP). Ambas as categorias de sensores utilizam-se de métodos de crescimento epitaxial de cristais semicondutores.

Palavras-chaves — Sensores de infravermelho, nanotecnologia, semicondutores, heteroestruturas.

I. INTRODUÇÃO

Sensores de infravermelho são de grande interesse estratégico em diversas áreas relevantes para o país. O agronegócio beneficia-se da detecção prematura de ação de pragas e/ou deficiência de irrigação em grandes áreas plantadas, permitindo a ação corretiva em tempo hábil. No monitoramento ambiental, imagens no infravermelho são usadas para avaliar o impacto de usinas termoeletricas e termonucleares na temperatura de águas fluviáteis ou marítimas utilizadas para refrigeração das mesmas, além da avaliação da saúde de coberturas vegetais e localização de focos de incêndio (no infravermelho é possível “ver” através da fumaça). A segurança do tráfego aéreo é melhorada com a utilização de câmeras operando no infravermelho, visto que é possível obter as imagens através da neblina ou fumaça. A utilização de comunicações ópticas no espaço livre reduz a necessidade de obras civis para passar cabos de fibra óptica, sendo de especial interesse em grandes centros. A utilização dos sensores para a detecção de componentes tóxicos em misturas gasosas é de grande valia para o monitoramento de instalações industriais, petrolíferas e de mineração, além do interesse como sistema de alarme contra guerra química. Imagens térmicas facilitam a identificação de necessidade de manutenção em instalações industriais e de problemas em linhas de transmissão de energia elétrica. Sistemas de visão noturna são de grande importância para nossas forças armadas e para segurança civil, além de estarem atualmente sendo incorporados a veículos automotores nos países economicamente mais desenvolvidos. A geração de imagens

no infravermelho também tem ainda importante papel na área de saúde. Por exemplo, com uma imagem no infravermelho é possível avaliar problemas de lubrificação nos olhos ou identificar a ocorrência de câncer de pele.

A tecnologia dominante atualmente em sensores de infravermelho é a dos sensores de HgCdTe. Apesar de apresentarem excelente capacidade de detecção, estes detectores apresentam sérios problemas para a obtenção de matrizes de sensores homogêneas e são de elevado custo. Uma alternativa tecnológica, gerada a partir do final da década de 80, são os sensores de infravermelho a poços quânticos (QWIPs), fotodetectores que utilizam transições intrabanda. Estes sensores envolvem a utilização de compostos da família III-V, cujas tecnologias de produção e processamento apresentam alto grau de maturidade, o que facilita a obtenção de matrizes relativamente grandes de sensores com excelente homogeneidade. Outras vantagens destes dispositivos são: possuem alta capacidade de detecção, possuem capacidade multiespectral e podem ser produzidos para operar nas janelas ópticas de 3 a 5 μm (MWIR) e de 8 a 14 μm (LWIR), ou em comprimentos de onda ainda maiores (VLWIR). Os QWIPs possuem ainda baixa dissipação térmica e facilidade de integração com os pré-amplificadores de leitura.

Os sensores de infravermelho a pontos quânticos (QDIPs), também baseados em tecnologia intrabanda, são apontados como a próxima geração de sensores de infravermelho, apresentando vantagens potenciais tanto em termos de custo quanto de desempenho, mas ainda resta muito a ser feito antes que se tornem uma realidade comercial. As dimensões, a densidade, a dopagem e a distribuição dos PQs nas diferentes camadas devem ser muito bem controladas para que possam fornecer dispositivos de desempenho melhor do que os existentes atualmente.

II. FORMAÇÃO DA REDE

A confecção de sensores de infravermelho fotônicos, utilizando semicondutores é uma tarefa complexa, que exige o envolvimento de profissionais altamente treinados e especializados, além de equipamentos e infra-estrutura laboratorial caros e de manutenção dispendiosa. Os sensores de infravermelho utilizando semicondutores da família III-V (semicondutores compostos por elementos das colunas IIIa e Va da tabela periódica) não são diferentes. Em particular, as

nanoestruturas semicondutoras geradas com esses materiais utilizam o crescimento epitaxial de compostos semicondutores distintos sobre um substrato de um semicondutor composto da mesma família. As técnicas de crescimento epitaxial são técnicas que permitem o crescimento lento de camadas de semicondutores, sobre um substrato, tendo um elevado controle da espessura e composição dessas camadas. São exemplos: LPE, epitaxia de fase líquida; VPE, epitaxia de fase vapor; MBE, epitaxia por feixe molecular; e MOCVD, deposição química de vapores utilizando precursores metalorgânicos. Cada técnica apresenta suas vantagens e desvantagens, mas todas exigem considerável experiência do operador do sistema para que estruturas de qualidade sejam produzidas. Além do crescimento dos cristais semicondutores, os mesmos necessitam passar por processos físico-químicos para o formato, a disposição, os isolamentos e os contatos elétricos dos sensores sejam definidos. Após esta etapa, ainda é necessário fazer o acoplamento dos sensores a outros microcircuitos, dedicados ou não, que compõem a eletrônica de leitura (pré-amplificação e condicionamento do sinal). Finalmente o conjunto deve ser adequadamente encapsulado considerando-se as condições de trabalho (temperatura de operação e ambiente aonde será utilizado).

Para enfrentar tal desafio, reuniram-se, em 2003, pesquisadores renomadas instituições de ensino e pesquisa do país, a saber: Instituto de Estudos Avançados, IEAv, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, e Universidade Federal de São Carlos, UFSCar. Posteriormente a Universidade Federal do Rio de Janeiro passou também a compor a equipe. Apoio ao desenvolvimento também tem sido obtido do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE e do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, LNLs. Estas instituições, em conjunto, possuíam as competências necessárias ao empreendimento, além de boa parte da infraestrutura. Outro fator primordial para que o empreendimento fosse exequível, é o real interesse das equipes no tema das pesquisas e desenvolvimentos necessários.

Dentro desta rede, foi definido que o crescimento dos cristais semicondutores seria efetuado através da técnica de MOCVD na PUC-Rio. A UFRJ passou a participar da rede com o deslocamento do Professor Maurício Pamplona Pires, da PUC-Rio para a UFRJ. O processamento dos cristais semicondutores seria efetuado prioritariamente, apesar de não exclusivamente, efetuado no Departamento de Física da UFMG. A caracterização dos dispositivos gerados seria, principalmente, mas também não exclusivamente, efetuada pelo IEAv, com apoio do INPE, que já possuía uma infraestrutura de caracterização de sensores de infravermelho. A geração de modelos teóricos e simulação de estruturas seriam efetuadas pela UFSCar. Posteriormente, o grupo do Laboratório de Engenharia Virtual, LEV, do IEAv passou também a somar esforços nesta tarefa.

Mais recentemente, foi submetida uma proposta, dentro do edital para formação de Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia, que visa ampliar esta rede. Com a inclusão da Universidade de São Paulo, USP, a rede passa a contar também com o crescimento das estruturas semicondutoras pela técnica de MBE. Passam também a integrar a rede, a Universidade Federal do Amazonas, UFAM, e a Universidade Federal do Amapá, UNIFAP, como forma de formar pessoal nesta importante área também nessa região.

III. RESULTADOS JÁ OBTIDOS

A estratégia adotada já logrou considerável êxito. Foi demonstrada a capacidade da equipe para o crescimento das estruturas de poços quânticos necessárias aos sensores tipo QWIP, gerando QWIPs que com picos de resposta nas janelas atmosféricas de 3 a 5 μm e 8 a 12 μm (Fig. 1). Os sensores foram produzidos com combinações de materiais diferentes e sobre substratos também distintos. Os dois substratos escolhidos são fartamente utilizados para a geração de dispositivos que utilizam esta família de semicondutores. De posse dos cristais semicondutores, os mesmos foram processados em estruturas convenientes para a caracterização eletro-óptica dos sensores. Isto foi feito valendo-se da experiência da equipe em processamento de semicondutores da família III-V e fazendo-se as adaptações necessárias aos dispositivos em questão. Técnicas de medidas de absorção e fotocorrente no infravermelho aplicadas a filmes finos semicondutores foram aprimoradas.

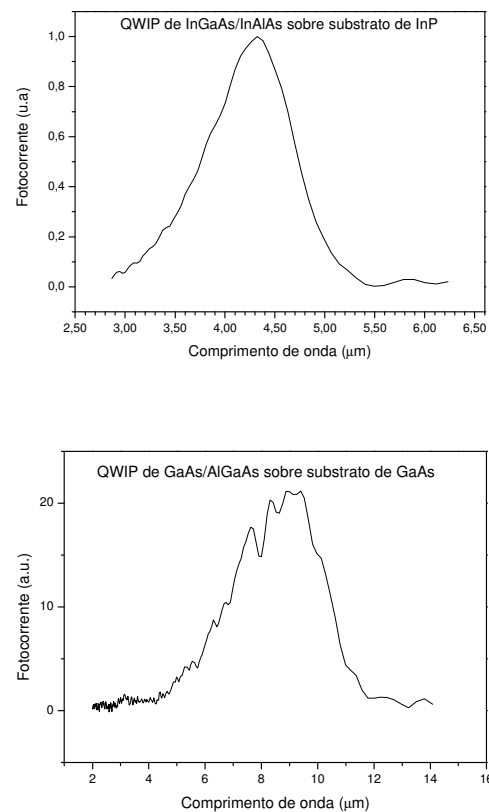


Fig. 1. Resposta espectral de dois sensores de infravermelho tipo QWIP projetados, crescidos e caracterizados em instituições de ensino e pesquisa brasileiras. As medidas espectrais mostradas foram obtidas utilizando-se um espectrômetro de transformada de Fourier, FTIR.

Além dos esforços experimentais, simulações numéricas das estruturas foram efetuadas utilizando-se códigos computacionais previamente desenvolvidos pelo grupo de teóricos, e novos códigos foram desenvolvidos. Como um exemplo, Fig. 2 mostra a determinação do campo elétrico que acopla o primeiro nível de um poço com quântico com o terceiro nível de um poço adjacente. Os demais níveis não estão mostrados para ficar clara a ressonância.

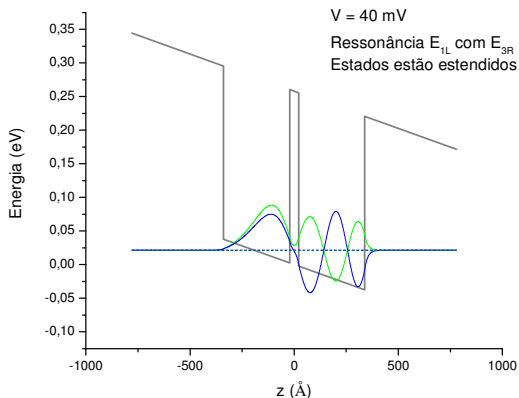


Fig. 2. Cálculo de estrutura de dois poços quânticos acoplados, com um campo elétrico que coloca em ressonância o primeiro nível de um poço com o terceiro do poço adjacente.

Códigos unidimensionais auto-consistentes considerando o efeito de cargas livres geradas por impurezas também foram desenvolvidos (Fig. 3).

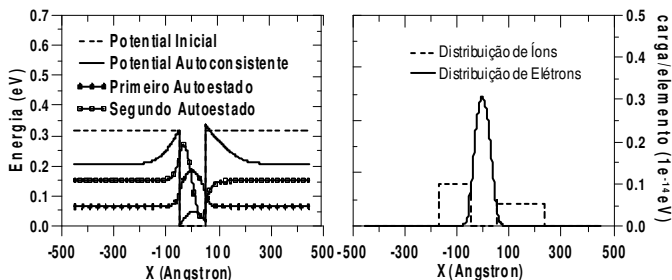


Fig. 3. Cálculo de estrutura de poço quântico simples, com dopagem assimétrica nas barreiras.

Os resultados já obtidos com pontos quânticos são também bastante animadores. QDIPs com diferentes estruturas semicondutoras foram estudadas. O crescimento de pontos quânticos de InAs sobre InGaAs foi calibrado. Condições de crescimento de forma a maximizar a densidade de pontos quânticos e minimizar o tamanho foram obtidas (Fig. 4).

Atingindo densidades elevadas

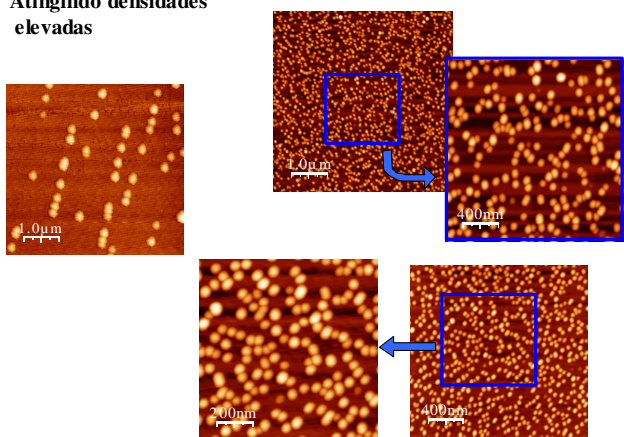


Fig. 4. Ilustração de variação de condições de crescimento para atingir densidades mais elevadas (imagens de microscopia de força atômica, AFM).

Ainda na calibração das estruturas, amostras com 10 camadas de pontos quânticos sobrepostas foram crescidas e avaliadas através de microscopia eletrônica de transmissão (Fig. 5).

Pontos quânticos crescidos sobre ligas semicondutoras quaternárias também foram produzidos e caracterizados por microscopia de força atômica, AFM, e microscopia eletrônica de transmissão. Estruturas híbridas de pontos e poços quânticos foram crescidas e caracterizadas, mostrando a capacidade de gerar QDIPs operando em várias faixas do infravermelho.

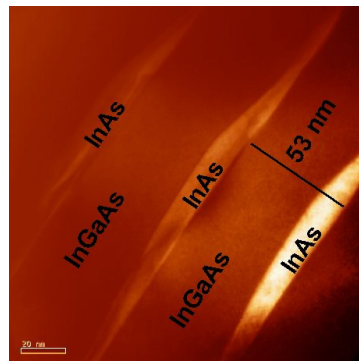


Fig. 5. Imagem de pontos quânticos empilhados, por microscopia eletrônica de transmissão, TEM, mostrando o alinhamento.

Assim como no caso dos QWIPs, ferramentas de cálculo e simulação de estruturas de pontos quânticos também foram desenvolvidas por diferentes métodos numéricos. Para reduzir o custo computacional, os pontos quânticos foram representados como estruturas com simetria cilíndrica (Fig. 6).

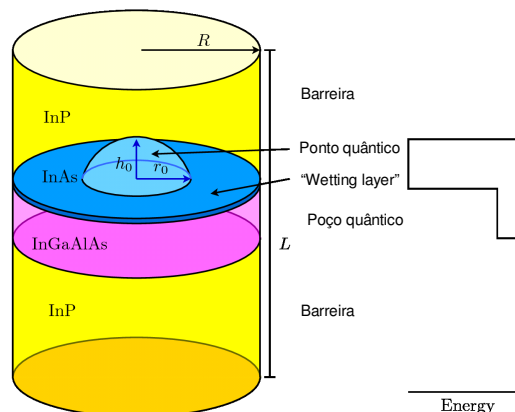


Fig. 6. Desenho esquemático de uma estrutura de ponto quântico de InAs crescendo sobre uma liga quaternária de InGaAlAs. Uma simetria cilíndrica foi adotada para reduzir o custo computacional.

CONCLUSÃO

A formação de uma rede de instituições de ensino e pesquisa para o desenvolvimento de sensores de infravermelho propiciou um avanço infatável concentrando-se o desenvolvimento em uma única instituição nacional. O uso de redes de instituições para o desenvolvimento de tecnologias de interesse da força aérea, além de propiciar economia de recursos, torna possível efetuar desenvolvimentos que as instituições da própria Força não teriam condições de desenvolver de forma isolada. É necessário, porém, salientar que necessário identificar as instituições que, de fato, possuem interesse no desenvolvimento, o simples trabalho por contrato pode levar a insucessos.