

Trabalho

Título em Português: ANÁLISE DE PONTOS QUÂNTICOS DE INAS COMO EMISSORES DE FÓTONS ÚNICOS PARA TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO QUÂNTICA

Título em Inglês: ANALYSIS OF INAS QUANTUM DOTS AS SINGLE PHOTON EMITTERS FOR QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGIES

Autor: Bruno Rossi Carmo

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Euclides Marega Junior

Área de Pesquisa / SubÁrea: Física da Matéria Condensada

Agência Financiadora: CNPq - PIBIC

ANÁLISE DE PONTOS QUÂNTICOS DE INAS COMO EMISSORES DE FÓTONS ÚNICOS PARA TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO QUÂNTICA

Bruno Rossi Carmo

Prof. Dr. Euclides Marega Júnior

Instituto de Física de São Carlos/Universidade de São Paulo

brunorossicarmo@usp.br

Objetivos

O objetivo deste estudo foi identificar e analisar características relevantes de pontos quânticos (QDs) crescidos por epitaxia de feixes moleculares (MBE) em semicondutores estruturados de InAs/GaAs com base nos parâmetros de crescimento para aplicações em computação e informação quântica. Para isso, foram empregadas técnicas experimentais integradas com análises computacionais.

Métodos e Procedimentos

Inicialmente, pontos quânticos foram crescidos sobre material semicondutor utilizando o modelo Stranski-Krastanow de epitaxia por feixe molecular (MBE), variando os parâmetros de crescimento das monocamadas. Em seguida, empregou-se a microscopia de força atômica (AFM) para análise das características morfológicas dos pontos quânticos sob a estrutura produzida. Por fim, utilizou-se o software *ImageJ* e a linguagem de programação *Python* para processamento de imagem e análise de dados, aliados a métodos de inferência estatística para fundamentar as conclusões [1].

Resultados

Com o confinamento eletrônico gerado pela diferença das bandas de energia da

heteroestrutura de InAs/GaAs, foi obtido êxito no crescimento de pontos quânticos com parâmetros de 1.7 monocamadas (MC) e de 1.4 monocamadas (MC). O resultado morfológico e conformacional das estruturas crescidas são apresentadas na figura 1 através de microscopia de força atômica (AFM).

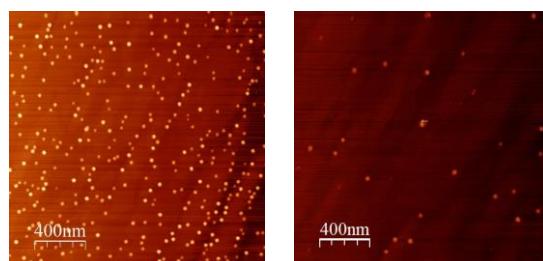


Figura 1: Microscopia de força atômica (AFM) da superfície das amostras de pontos quânticos com parâmetro de 1.7MC e 1.4MC, respectivamente.

O processamento das imagens obtidas por AFM apresentadas na figura 1 indicam, inicialmente, uma maior densidade de pontos quânticos para a amostra de 1.7MC. Visando a obtenção da distribuição média dos tamanhos laterais de cada amostra para caracterização óptica das nanoestruturas, as imagens foram transformadas e limiarizadas via *ImageJ* para estudo e análise estatística.

Em geral, a amostra crescida sobre parâmetro de 1.7MC apresentou raio lateral médio equivalente a 12 ± 4 nm enquanto a amostra crescida sobre parâmetro de 1.4MC apresentou raio lateral médio de 8 ± 4 nm.

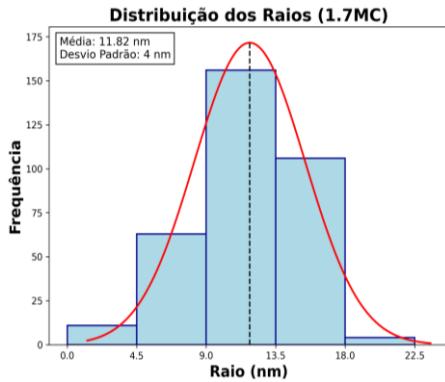


Figura 2: Distribuição média dos raios laterais na amostra crescida sob parâmetro de 1.7MC.

Vale ser pontuado que a contagem total de nanoestruturas obtida para a amostra crescida sob parâmetro de 1.7MC foi de 356 QDs enquanto sob o parâmetro de 1.4MC foi de 32 QDs. Essa diferença é significativa, principalmente do ponto de vista estatístico. Assim, pode-se observar pela figura 2 que a distribuição média dos raios laterais segue uma distribuição gaussiana enquanto a figura 3 apresenta uma falta de distribuição gaussiana em relação às amostras de 1.4MC.

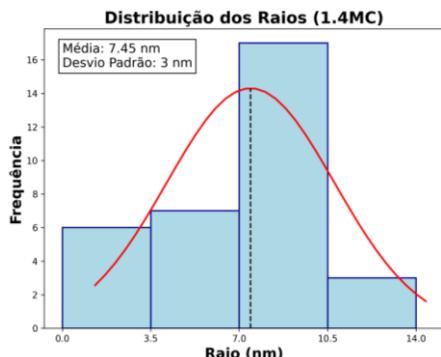


Figura 3: Distribuição média dos raios laterais na amostra crescida sob parâmetro de 1.4MC.

Deste modo, em relação à densidade de nanoestruturas/área, a estatística corrobora com o resultado observado pelas imagens de AFM. A estrutura crescida sob parâmetro de 1.7MC apresenta $\sim 8.6 \cdot 10^9$ QDs/cm² enquanto a amostra de 1.4MC apresenta $\sim 8.5 \cdot 10^8$ QDs/cm².

Estes resultados apresentam importantes implicações para aplicações em computação e ou informação quântica, haja vista que uma grande densidade de QDs por unidade de área pode dificultar a obtenção de conjuntos e aumenta a decoerência devido às interações entre as nanoestruturas. De mesmo modo, densidades muito baixas podem como emissores quânticos [2].

Quanto ao impacto do tamanho lateral analisado na figura 2 e figura 3, comprehende-se que — quanto menor o ponto quântico — maior o confinamento das partículas e, assim, exige-se maior energia para transição de nível. Com isso, a transição de nível resulta em emissões de maior frequência. Essa configuração é essencial para a computação quântica, permitindo controlar os estados quânticos de forma precisa e auxiliando na manipulação dos qubits no processamento de informações [1,2].

Conclusões

Em geral, conclui-se com este estudo que os parâmetros de crescimento de monocamadas, tal qual a escolha dos semicondutores, desempenham significativa importância na construção de sistemas quânticos baseados em nanoestruturas. Ao controlar o crescimento das monocamadas, é possível manipular e ajustar as interações e emissões do sistema por meio das características morfológicas dos pontos quânticos. Considerando que tais nanoestruturas podem atuar como qubits, tal controle permite uma configuração mais eficiente e precisa dos sistemas quânticos.

Referências

- [1] LEMES, M. F. S. Crescimento e caracterização de pontos quânticos semicondutores auto-organizados de InAs. **Universidade de São Paulo**, 2020.
- [2] SCARLINO, P. et al. In situ tuning of the electric-dipole strength of a double-dot charge qubit: Charge-noise protection and ultrastrong coupling. **Physical Review X**, 2022.

ANALYSIS OF INAS QUANTUM DOTS AS SINGLE PHOTON EMITTERS FOR QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGIES

Bruno Rossi Carmo

Prof. Dr. Euclides Marega Júnior

São Carlos Institute of Physics/University of São Paulo

brunorossicarmo@usp.br

Objectives

This study aimed to identify and analyze relevant characteristics of quantum dots (QDs) grown by molecular beam epitaxy (MBE) in InAs/GaAs semiconductor structures based on growth parameters for applications in quantum computing and quantum information. To achieve this, experimental techniques were employed alongside computational analyses.

Materials and Methods

Initially, quantum dots were grown on semiconductor material using the Stranski-Krastanow (SK) model of molecular beam epitaxy (MBE), with variation in the growth parameters of the monolayers (ML). Then, atomic force microscopy (AFM) was employed to analyze the morphological characteristics of the quantum dots on the produced structure. Finally, *ImageJ* software and *Python* programming language were used for image processing and data analysis, combined with statistical inference methods to support the conclusions [1].

Results

The electronic confinement generated by the energy band difference on the growth of the InAs/GaAs heterostructure successfully produced quantum dots with parameters of

1.7ML and 1.4ML. The morphological and conformational results of the grown structures are shown in Figure 1, obtained via atomic force microscopy (AFM).

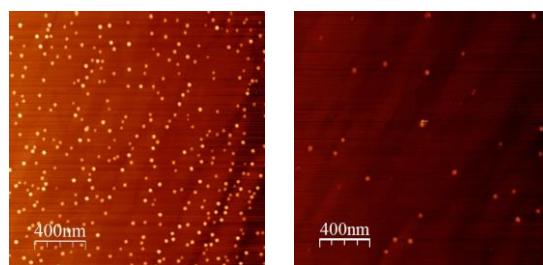


Figure 1: Atomic force microscopy (AFM) for viewing quantum dot samples with parameters of 1.7ML and 1.4ML, respectively.

The image processing obtained through AFM presented in Figure 1 indicates a higher density of quantum dots at the 1.7ML sample. To get the average distribution of the lateral sizes for the energy characterization of the nanostructure, the images were processed and thresholded using *ImageJ* for statistical study. The sample grown at the 1.7ML parameter presented an average lateral radius of 12 ± 4 nm, while the sample grown at the 1.4ML parameter showed an average lateral radius of 8 ± 4 nm.

It is worth noting that the total count of nanostructures obtained for the 1.7ML sample was 356 QDs, while the 1.4ML sample presented 32 QDs. This difference is significant, especially from a statistical perspective. Thus,

figure 2 shows that the average lateral radius distribution follows a Gaussian distribution, while Figure 3 shows a lack of Gaussian distribution concerning the 1.4ML samples.

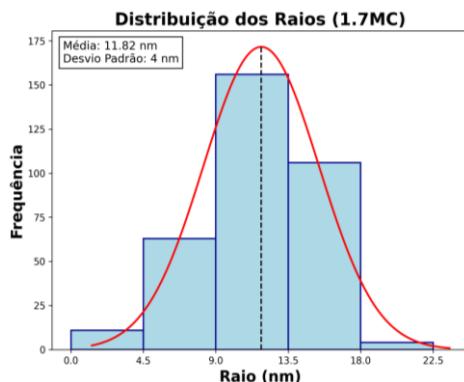


Figure 2: Average distribution of lateral radius in the sample grown under a parameter of 1.7MC.

Regarding nanostructure density per area, the statistics corroborate the results observed by AFM images. The structure grown under the 1.7ML parameter shows approximately $8.6 \cdot 10^9$ QDs/cm², while the 1.4ML sample shows approximately $8.5 \cdot 10^8$ QDs/cm².

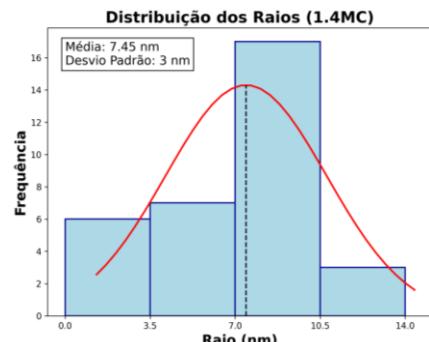


Figure 3: Average distribution of lateral radius in the sample grown under a parameter of 1.4MC.

These results have significant implications for the practical application of quantum computing, as a high density of QDs per unit area can cause undesirable interference or decoherence due to uncontrolled interactions between the nanostructures. Similarly, very low densities

may lead to systems with slow and delayed operations between qubits [2].

Regarding the lateral size analyzed in Figures 2 and 3, it is understood that — the smaller the quantum dot — the greater the confinement of particles, and thus, more energy is required for level transitions. As a result, these transitions lead to higher frequency emissions. This configuration is essential for quantum computing, allowing precise control of quantum states and aiding in manipulating qubits during information processing [1,2].

Conclusions

In conclusion, this study shows that the growth parameters of monolayers (ML) and the choice of semiconductors play an important role in the construction of quantum systems based on nanostructures. By controlling the growth of monolayers, it is possible to manipulate and adjust the system's interactions and emissions through the morphological characteristics of the quantum dots. Considering that such nanostructures can act as qubits, this control enables a more efficient and precise configuration of quantum systems.

References

- [1] LEMES, M. F. S. Crescimento e caracterização de pontos quânticos semicondutores auto-organizados de InAs. **Universidade de São Paulo**, 2020.
- [2] SCARLINO, P. et al. In situ tuning of the electric-dipole strength of a double-dot charge qubit: Charge-noise protection and ultrastrong coupling. **Physical Review X**, 2022.