



# Novos metais catalisadores para o crescimento de nanofios semicondutores: análise por microscopia de varredura por sonda

Aluno: Lucas Matheus dos Santos Nascimento  
Orientadora: Mônica Alonso Cotta

## 1 Introdução

Nanoestruturas podem ser definidas como sistemas em que pelo menos uma das suas dimensionalidades está em escala nanométrica [1]. A baixa dimensionalidade dessas nanoestruturas, faz com que surjam efeitos de confinamento quântico, como o confinamento de partículas e quasi-partículas em regiões da nanoestrutura. Isso se dá quando o comprimento da região de interesse é da mesma ordem do comprimento de onda de De Broglie da partícula a ser confinada, causando alterações na estrutura eletrônica devido à alteração da densidade local de estados [3]. Nanofios são nanoestruturas monocristalinas que podem ser consideradas como quase unidimensionais [1], com diâmetro da ordem de nanômetros e comprimento na ordem de micrômetros. O interesse em dominar técnicas de síntese se dá devido às suas características promissoras em áreas como a nanoeletrônica, optoeletrônica, dispositivos quânticos, conversores de energia, nanofotônica [1, 5] e biossensores [2, 5].

Nanofios de GaP já demonstraram que têm potencial para serem utilizados como material de emissão óptica na faixa do verde quando em fase wurtzita [11]. Essas nanoestruturas podem, também, ser sintetizadas de maneira assimétrica, devido a efeitos de temperatura durante o crescimento que fazem com que nanopartícula possa se mover ao longo do substrato e crescer a diferentes velocidades em locais diferentes da nanoestrutura [10]. Neste trabalho, iremos estudar nanofios semicondutores de fosfeto de gálio (GaP), a partir da síntese de cristais catalizada por nanopartículas de ouro (Au), utilizando o método de vapor-líquido-sólido (VLS) [12]. A produção destes nanofios ocorre no Laboratório de Semicondutores Avançados, utilizando o reator CBE (Chemical Beam Epitaxy), que realiza um crescimento epitaxial por feixe químico.

Sendo assim, este trabalho utiliza um microscópio de força atômica (AFM), com o objetivo de realizar a caracterização dos nanofios de GaP. A caracterização morfológica e elétrica consiste na análise de dados dos diferentes modos de AFM, como o modo contato (CM-AFM) e o modo não contato (NC-AFM), para compreender a topografia dos nanofios identificando a morfologia, defeitos cristalográficos e a rugosidade lateral das amostras. Além disso, estudaremos e usaremos técnicas como a microscopia Kelvin (KPFM), para extrair informações sobre propriedades elétricas desses materiais, como as diferenças de potencial de contato.

## 2 Microscopia de Varredura por Sonda

A microscopia de varredura por sonda (SPM) consiste em uma família de técnicas que tem como princípio básico a medida de interação local entre uma sonda nanométrica e a superfície da amostra de interesse. A sonda varre a amostra, fornecendo um mapa com as características de interesse, com resolução espacial que pode chegar à escala atômica. O microscópio de varredura por tunelamento (STM) funciona a partir de uma corrente de tunelamento que surge entre a ponta e amostra, dependente da distância entre elas. Dessa forma, é possível mapear a topografia de um dado material em escala atômica controlando a corrente entre a ponta e amostra [6, 7]. O segundo microscópio dessa família é o microscópio de força atômica (AFM), desenvolvido em 1986, que permitiu que as amostras estudadas não fossem necessariamente condutoras, diferentemente do que acontece no STM [7].

### 2.1 Microscopia de Força Atômica

Os princípios de funcionamento do AFM se baseiam na medição de propriedades da superfície de uma amostra através de forças de interação (atração e repulsão) entre uma ponta de prova e uma amostra, sendo essas forças dependentes da distância entre tais componentes. Essas forças são medidas através da deflexão da alavanca, sendo conhecida a sua constante de mola  $k$  (tipicamente de 0.01-10 N/m). Desse modo, a distância entre a ponta e a amostra determina o regime de força que o sistema está atuando: enquanto as forças que atuam a uma distância de 2-3 Å são repulsivas, sendo causadas pela interação entre as nuvens eletrônicas dos átomos dos dois componentes (como consequência do princípio de exclusão de Pauli [7]), as forças atrativas que atuam a uma distância de 1-10 nm são devidas às Forças de London e de Van Der Waals [7].

A Figura 1(a) nos possibilita diferenciar três zonas de forças a que a ponta de prova e a amostra podem estar sujeitas. A região à esquerda do gráfico, denominada contato, (*Contact*) consiste na região em que atuam principalmente as forças de repulsão de Pauli, correspondendo a um dos modos de trabalho do AFM: o modo contato (CM-AFM). Do lado oposto, temos a região de forças denominada não-contato (*Non-Contact*), sendo regida pelas forças atrativas de dispersão de London e correspondem ao modo não-contato do AFM (NC-AFM). É possível, também, estabelecer uma região de forças intermediária, denominada contato intermitente (*Intermittent Contact ou Tapping Mode*), que corresponde ao modo de trabalho de contato intermitente (AC-AFM), em que ora se está sujeito às forças de repulsão, ora às forças de atração. A Figura 1(b) ilustra como a alavanca interage com o substrato nos três modos de operação.

A instrumentação desse tipo de microscópio em geral se baseia em uma ponta de prova acoplada a uma alavanca, ambas microfabricadas em silício (Si), que varre sistematicamente uma amostra de interesse. A alavanca é suportada por um

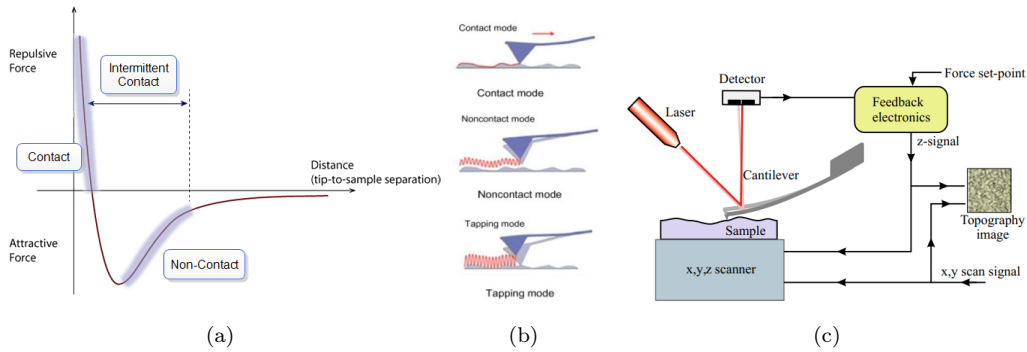


Figura 1: (a) Zonas de diferentes forças de interação entre a ponta e amostra [4], (b) Modos de operação do AFM [18] e (c) Esquema de Funcionamento de um Microscópio de Força Atômica [17].

*scanner* piezoelétrico, ou seja, que sofre deformações de comprimento ao aplicarmos uma tensão elétrica. Além disso, existe um laser que incide sobre a ponta de prova, sendo sua reflexão detectada por um detector do tipo PSPD (Fodetector sensível a posição), que é dividido em quatro quadrantes.

Inicialmente, o laser refletido está no centro dos quatro quadrantes. Ao longo da varredura, com a deflexão da alavanca, a reflexão do laser se movimenta pelos quadrantes, sendo gerado um sinal elétrico. Esse sinal é enviado para uma placa controladora do *loop de feedback*, que movimenta então o *scanner* na direção  $\vec{z}$ , até que um ponto de referência inicial (*set-point* de força) seja alcançado. Neste caso, o laser volta à posição inicial sobre o detector e o scanner compensa em  $z$  a variação de altura da amostra, que é então gravada em uma matriz que comporá a imagem de topografia. A varredura em  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$  e a repetição deste procedimento em cada ponto fornecerá assim a imagem de topografia.

O AFM pode ser operado no regime estático ou no regime dinâmico. A diferença fundamental entre os dois regimes é que, no regime estático, a alavanca não é colocada para oscilar e a imagem depende basicamente da deflexão da alavanca, de acordo com a lei de Hooke. Além disso, neste regime, é possível obter dados de forças laterais e de torção na alavanca caso hajam diferenças de atrito entre regiões da amostra. Já no regime dinâmico, a alavanca é forçada a oscilar em sua frequência de oscilação natural, através da conexão com um gerador de função em que a tensão e a frequência de oscilação são variáveis. Assim, neste regime, a imagem está baseada na medição da variação de amplitude, fase e frequência de oscilação da alavanca.

## 2.2 Microscopia Kelvin

A técnica *Kelvin Probe Force Microscopy* (KPFM) consiste em uma técnica de microscopia por sonda através da qual é possível medir a diferença de potencial de contato de uma amostra com resolução espacial nanométrica. A diferença de potencial de contato de uma nanoestrutura está relacionada com a função trabalho do material e consegue determinar localmente concentração de cargas e surgimento de barreiras de energia devido ao acúmulo de carga [16]. O KPFM baseia-se no Método de Kelvin para a determinação da diferença do potencial de contato entre duas placas, quando há contato elétrico entre elas. Através dessas medições, ( $V_{CPD}$ ) entre as amostras, é possível determinar o valor da função trabalho ( $\phi$ ) da amostra, dado pela equação 1, sabendo que uma das amostras é uma amostra de referência. Para a obtenção de medidas de  $V_{CPD}$ , é necessário que a medida seja realizada na técnica KPFM uma combinação do modo NC-AFM e da técnica de Microscopia de Força Eletrostática.

$$V_{CPD} = \frac{\phi_{amostra} - \phi_{ponta}}{e}, \quad (1)$$

sendo  $e$  a carga elétrica elementar e  $\phi_{ponta}$  e  $\phi_{amostra}$  as funções trabalho da ponta e da amostra, respectivamente.

Para materiais semicondutores e metais, a partir da técnica KPFM, é possível realizar medidas de diferença de potencial de contato e relacioná-las com a função trabalho desses materiais. Já para materiais isolantes, a técnica nos dá informações sobre cargas localizadas [14].

A Figura 2(a) mostra o sistema ponta-amostra não conectado eletricamente, em que podemos observar que as energias de vácuo,  $E_{vac}$ , da ponta e a da amostra estão alinhadas e os respectivos níveis de Fermi,  $E_F$ , possuem uma diferença, denominada  $V_{CPD}$ .

Para implementarmos o método discutido acima, assumimos que a interação ponta-amostra pode ser aproximada para um capacitor de placas paralelas. Nesse caso, a força elétrica associada é diretamente proporcional ao gradiente da capacitância ( $\vec{\nabla}C$ ). Apesar disso, para um dado ponto analisado, temos movimentação apenas no eixo  $Z$ , o que faz com que surja uma força eletrostática, visto que a capacitância varia com a distância entre as placas. Essa força eletrostática é anulada se aplicarmos uma tensão externa. A posição,  $(x_i, y_i)$ , é mantida constante durante a

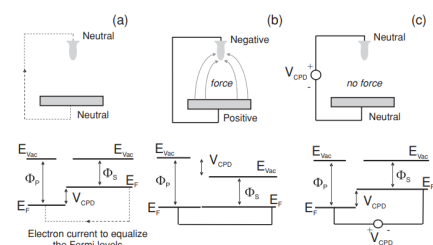


Figura 2: Diagrama de Energia para o sistema ponta-amostra [13].



medida. As medidas realizadas de acordo com essa técnica proporcionam alta sensibilidade na determinação de  $V_{CPD}$  [14]. A força elétrica é, assim, descrita por:

$$F_{el}(\vec{r}) = -\frac{1}{2} \frac{\partial C(\vec{r})}{\partial z} V^2(t) \quad (2)$$

Além disso, quando a amostra e a ponta estão polarizadas, o potencial aplicado possui dois níveis independentes, um nível DC e um nível AC. O nível DC será minimizado para encontrarmos  $V_{CPD}$  e o nível AC irá fazer a alavanca oscilar em uma frequência  $f_{ac}$ , diferente da frequência de ressonância da ponta. Assim, o potencial efetivo entre a ponta e amostra é:

$$V(t) = V_{DC} + V_{AC} \sin(2\pi f_{ac}t) - V_{CPD} \quad (3)$$

Dessa forma, a força elétrica pode ser escrita em função da frequência de oscilação  $f_{AC}$ ,  $V_{DC}$  e  $V_{CPD}$ . Após algumas manipulações matemáticas, é possível observar que chegamos em três componentes da força elétrica:  $F_{DC}$ ,  $F_{\omega}$  e  $F_{2\omega}$ .  $F_{DC}$  introduz uma componente que influencia a topografia e  $F_{2\omega}$  não é relevante para este trabalho.

$$F_{\omega} = -\frac{\partial C(\vec{r})}{\partial z} (V_{DC} - V_{CPD}) V_{AC} \sin(2\pi f_{ac}t) \rightarrow \text{Potencial de Superfície.} \quad (4)$$

A componente  $F_{\omega}$ , equação 4, é responsável pela determinação de  $V_{CPD}$ .

Há dois modos de operação na técnica KPFM: o modo de modulação da força pela amplitude de oscilação da alavanca (AM-KPFM) e a modulação da força pela frequência de oscilação da alavanca (FM-KPFM). No AM-KPFM temos que a amplitude de oscilação em  $f_{ac}$  medida é proporcional à força eletrostática. Já no FM-KPFM o deslocamento de frequência  $f'_0$  é proporcional ao gradiente da força eletrostática.

### 3 Metodologia

Os nanofios semicondutores aqui utilizados foram crescidos pelo método VLS no Laboratório de Semicondutores Avançados do DFA, no sistema CBE, pelo Doutor Bruno César da Silva, ex-integrante do LNB. Em particular, usamos uma amostra crescida por 6h, o que permitiu obter um volume muito maior de material do que os nanofios que pretendíamos originalmente analisar. Cabe notar que, apesar do maior volume (que não mais corresponde a uma nanoestrutura), o material retém a estrutura cristalina que até hoje só pode ser observada na escala nano, e por isso preenche os objetivos de caracterização deste projeto. O maior volume/tamanho das estruturas de GaP permitiu sua melhor visualização no microscópio óptico. Por este motivo, escolhemos estas amostras para iniciar este trabalho.

A amostra recebida foi transferida para um substrato com um filme de ouro depositado, para possibilitar as medidas de KPFM, e com os nanofios já transferidos por abrasão mecânica. A primeira análise realizada foi através do microscópio óptico para compreender a distribuição dos nanofios.

O procedimento experimental adotado para obtenção das imagens consistia em baixar a ponta na amostra no modo contato, obter uma imagem em que fosse possível observar uma área quadrada com 30-40  $\mu m^2$  de dimensão. Isso se dava devido à dificuldade de baixar a ponta em uma área menor e encontrar um nanofio inteiro. Se o nanofio fosse encontrado, as dimensões de varredura iam diminuindo até que fosse possível realizar as medidas no nanofio. Cabe destacar que essa foi uma das maiores dificuldades encontradas.

A análise das imagens foi realizada no software livre Gwyddion [9]. Após um tratamento da imagem, foi possível determinar valores de rugosidade RMS das amostras. Com o KPFM, iríamos implementar o modo AM-KPFM, com medidas simultâneas a topografia. Topografia e  $V_{CPD}$  seriam obtidos através de uma varredura único com o uso do MAC Mode III (três amplificadores *lock-ins* independentes).

### 4 Resultados

Os resultados obtidos até o momento são preliminares e foram obtidos no processo de aprendizagem com o uso do AFM e não puderam ser expandidos devido à suspensão de atividades da universidade, devido à crise sanitária do novo coronavírus. Dessa forma, de acordo com os objetivos traçados, foi possível uma familiarização com o uso do AFM em medidas que envolvem os modos CM-AFM e NC-AFM, com a obtenção de imagens que se referem à topografia, em ambos os modos, fricção (CM-AFM) e fase (NC-AFM).

Na Figura 3 é possível observar imagem obtida no microscópio óptico Leica, disponível no LNB, com objetiva de 100x, de um nanofio que foi transferido por abrasão mecânica para um substrato com filme de Au, sendo esse um exemplo do nanofio assimétrico que se busca no AFM para caracterização. Porém, devido a menor magnificação do microscópio óptico acoplado ao AFM, encontrar o nanofio no substrato e posicionar nele a ponta para a medida foi até o momento uma das maiores dificuldades deste trabalho. No entanto, encontramos também estruturas menores espalhadas sobre o substrato, que muito provavelmente decorrem da quebra dos nanofios de GaP durante o processo de transferência.



A Figura 4(a) corresponde a uma imagem topográfica obtida através do modo CM-AFM e refere-se ao substrato da amostra, ou seja, o filme de Au sobre substrato semiconductor. O valor encontrado para a rugosidade RMS (rugosidade quadrática média) do substrato foi de  $(0.85 \pm 0.04)$  nm. Já a Figura 4(b) corresponde a um pedaço do nanofio de GaP, sendo que o valor de Rugosidade RMS do nanofio foi de  $(32 \pm 2)$  nm. Cabe lembrar que para a Figura 4(a), os valores de rugosidade podem estar exagerados, visto que a superfície possui cacos de nanofios e riscos devido à abrasão mecânica. Assim como na Figura 4(b), o valor da rugosidade RMS pode não representar a estrutura fielmente, visto que é possível observar riscos muito próximos ao pedaço da nanoestrutura.

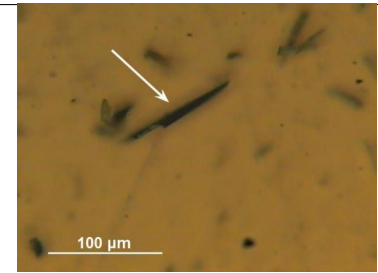


Figura 3: Imagem obtida no microscópio óptico do LNB mostrando nanofio em formato de faca, indicado com uma seta.

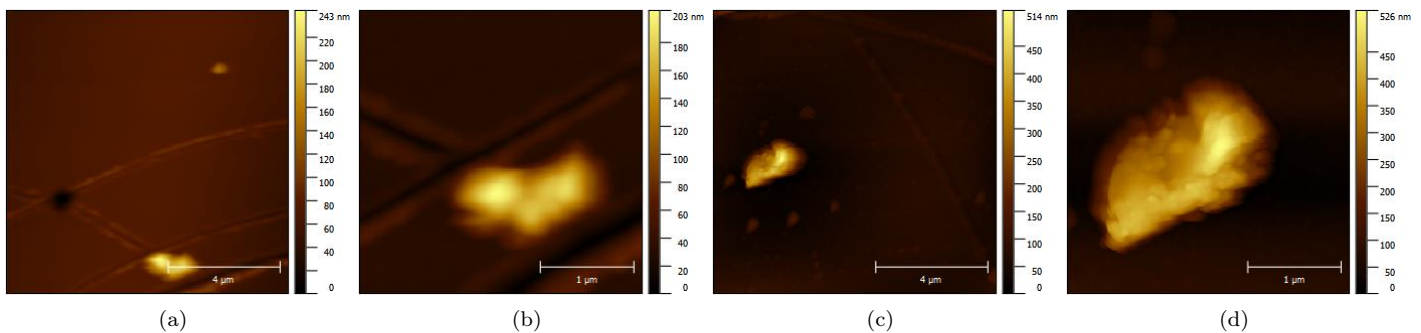


Figura 4: (a) CM-AFM do substrato, (b) CM-AFM de um pedaço de nanofio, (c) NC-AFM do substrato e (d) NC-AFM de um pedaço de nanofio

A Figura 4(c) corresponde a uma imagem topográfica obtida através do modo NC-AFM e se refere ao substrato de Au, com a presença de uma estrutura maior, atribuída ao GaP. O valor encontrado para a Rugosidade RMS no substrato de Au foi de  $(8.0 \pm 0.4)$  nm. Nota-se a presença de linhas relativamente profundas (40 nm) que provavelmente também foram formadas quando da abrasão mecânica entre as amostras para a transferência dos fios. Para o valor da Rugosidade RMS encontrado para o substrato vale também ressaltar que as linhas não foram utilizadas para o cálculo da rugosidade, ou seja, a área escolhida para a medição é tal que não contenha linhas visíveis em seu interior. O valor encontrado para a Rugosidade RMS para o pedaço do nanofio medido na Figura 4(d) foi de  $(70 \pm 4)$  nm. Novamente, para a Figura 4(c), é possível observar riscos e outros pequenos cacos na imagem, o que pode estar influenciando no valor da rugosidade RMS. Diferentemente do que ocorre na Figura 4(d), em que, aparentemente, a amostra não sofre grandes influências do que em seu valor de rugosidade RMS.

Na Figura 5, podemos observar a lateral de uma estrutura de GaP, obtida pelo modo NC-AFM, em que é possível verificar variação de altura,  $h$ , em torno de  $0,6 \mu\text{m}$  entre o substrato (plano escuro no topo da imagem) e a estrutura de GaP. Realizando medidas de rugosidade na Figura 5, é possível observar grande variação da Rugosidade RMS encontrada no substrato com o valor encontrado na lateral da estrutura GaP centralizada na figura, sendo  $(4.0 \pm 0.2)$  nm para o substrato e  $(56 \pm 3)$  nm para a lateral da estrutura de GaP.

A partir da direção cristalográfica de crescimento do GaP,  $\langle 10\text{-}10 \rangle$ , é possível determinar o número de planos ou camadas que cresceram, na Figura 5, sabendo que a distância interplanar da estrutura de GaP é de  $1.9 \text{ \AA}$ . É possível observar de 10 a 2000 planos cristalográficos.

Como mencionado anteriormente, os nanofios de GaP utilizados nesse estudo foram crescidos para medidas de fotoluminescência (PL). Sabe-se que medidas de PL para o GaP possuem baixa eficiência, sendo essa a razão do volume da nanoestrutura. Além disso, devido ao tamanho considerável, a altura do nanofio é maior que o curso em  $z$  do scanner do AFM. Isto impossibilita a obtenção de uma única imagem onde toda a topografia da amostra seja mostrada.

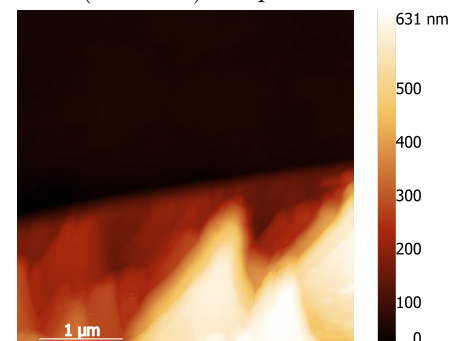


Figura 5: Topografia de substrato de Au com nanofios de GaP obtida no modo NC-AFM

## 5 Considerações Finais

Assim, as medidas de topografia realizadas nos modos NC-AFM e CM-AFM nos proporcionaram informações acerca da rugosidade (RMS) tanto do substrato como dos pedaços encontrados dos nanofios. Os resultados em relação à rugosidade (RMS) para os pedaços de nanofios apontam alta rugosidade para morfologia lateral. Além disso, é possível observar na 5, que esse tipo de imagem nos proporciona informações sobre a presença de facetas cristalinas, formando degraus na superfície. Essa é uma característica importante para correlacionar com a orientação cristalográfica





de crescimento do nanofio. Dessa forma, as considerações acerca deste trabalho são preliminares e envolvem dados obtidos anteriormente à suspensão das atividades na universidade. Contudo, foi feito um estudo da técnica KPFM nesse período de suspensão. O estudo foi realizado de maneira teórica com bibliografias acerca do tema e leituras de trabalhos realizados por pesquisadores que passaram pelo LNB. As perspectivas futuras que são esperadas para este trabalho estão relacionadas à realização das medidas de KPFM nos nanofios de GaP. Além disso, novas estruturas como nanofios e nanofolhas, catalisados com nanopartículas de níquel (Ni), serão estudados através da técnica de KPFM. Sendo assim, poderemos correlacionar os resultados obtidos com os nanofios de GaP catalisados com nanopartículas de Au.

## Referências

- [1] Zhang A., Zheng G., Lieber C.M. Emergence of Nanowires. In: **Nanowires. NanoScience and Technology**. Springer, 2016. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41981-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41981-7_1)
- [2] Zheng G, Lieber CM. **Nanowire biosensors for label-free, real-time, ultrasensitive protein detection**. *Methods Mol Biol*. 2011;790:223-237. doi:10.1007/978-1-61779-319-6\_18
- [3] SILVA, B. C. da. **Síntese e caracterização estrutural de nanofios de GaP**. 2016. 68 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/331662>>. Acesso em: 30 ago. 2020.
- [4] Hao Zhu. **Semiconductor Nanowire MOSFETs and Applications**. *Nanowires - New Insights*, Khan Maaz, IntechOpen. 5 jul. 2017. DOI: 10.5772/67446. Available from: <https://www.intechopen.com/books/nanowires-new-insights/semiconductor-nanowire-mosfets-and-applications>
- [5] Arbiol, J.; Xiong, Q. **Semiconductor Nanowires: Materials, Synthesis, Characterization and Applications**. Woodhead Publishing, 2015. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16507-5>.
- [6] Bonnell, D. A. **Scanning Tunneling Microscopy**. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 2001, Pages 8269-8281. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01480-7>.
- [7] Voigtländer, B. **Atomic Force Microscopy**. Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13654-3>.
- [8] Melitz, W.; Shen, J.; Kummel, A.C.; Lee, S. **Kelvin probe force microscopy and its application**. *Surface Science Reports*, Volume 66, 2011, Pages 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2010.10.001>.
- [9] Gwyddion. Disponível em: <<http://gwyddion.net/>>. Acesso em: 19 de ago. de 2020.
- [10] SILVA, B. C. da et al. **Exploring Au Droplet Motion in Nanowire Growth: A Simple Route toward Asymmetric GaP Morphologies**. *Nano Letters*, v. 17, n. 12, p.7274-7282, 10 nov. 2017. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b02770>.
- [11] SILVA, B.C. da, Couto, O.D.D., Obata, H.T. et al. **Optical Absorption Exhibits Pseudo-Direct Band Gap of Wurtzite Gallium Phosphide**. *Sci Rep* 10, 7904 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64809-4>
- [12] WAGNER, R. S.; ELLIS, W. C.. **Vapor-Liquid-Solid Mechanism of single crystal growth**. *Applied Physics Letters*, v. 4, n. 5, p.89-90, mar. 1964. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1753975>. <http://www.nanophys.kth.se/nanophys/facilities/nfl/afm/jpk/manuf-manuals/handbook-2.2a.pdf> Acessado em 12/08/20 às 15h 45 min.
- [13] Kalinin, S.V.; Gruverman, A. **Scanning Probe Microscopy, Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale**; Springer, 2007; Volume II, ISBN: 9780387286679.
- [14] Sadewasser, S.; Glatzel, T. **Kelvin Probe Force Microscopy: Measuring and Compensating Electrostatic Forces**; Springer, 2012; ISBN: 978-3-642-22565-9.
- [15] García, R.; Pérez, R. **Dynamic atomic force microscopy methods**; *Surface Science Reports*, Volume 47, Issues 6–8, 2002, Pages 197-301, ISSN 0167-5729. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(02\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(02)00077-8).
- [16] GONZALEZ, A. C. N. **Nanofios semicondutores: análise de propriedades elétricas e estruturais por microscopia no modo Kelvin Probe**. 2008. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/278455>.
- [17] Voigtländer, B. **Atomic Force Microscopy**; Springer, 2019; ISBN: 978-3-030-13654-3.
- [18] Asmatulu, R.; Khan, W. S. **Micro and Nano Technologies, Synthesis and Applications of Electrospun Nanofibers**; Elsevier, 2019, Pages 257-281, ISBN 9780128139141.