

Aula 1 – Introdução à Nanociência e Nanotecnologia



Imagine um mundo onde a tecnologia é tão pequena que se torna invisível a olho nu, mas tão poderosa que redefine a medicina, a computação e a energia. Esse mundo não é ficção científica, mas a realidade em constante evolução da nanoeletrônica. Você já se perguntou como os processadores dos seus dispositivos se tornaram tão rápidos e eficientes, ou como a capacidade de armazenamento de dados cresceu exponencialmente? A resposta está na capacidade de manipular a matéria em uma escala inimaginavelmente pequena: a nanoescala.

Nesta aula, embarcaremos em uma jornada fascinante para desvendar os fundamentos da Nanociência e da Nanotecnologia, compreendendo como a manipulação de átomos e moléculas abre portas para inovações revolucionárias. Nosso objetivo é que, ao final, você seja capaz de definir a nanoescala e suas propriedades únicas, traçar um breve histórico que nos trouxe até aqui, diferenciar Nanociência de Nanotecnologia e, crucialmente, entender o impacto transformador da nanoeletrônica na indústria e na sociedade. Prepare-se para expandir seus horizontes e ver o mundo sob uma nova perspectiva, onde o minúsculo detém um poder gigantesco.

A Nanoescala: Onde o Pequeno se Torna Extraordinário

Você já parou para pensar no quão pequeno é um fio de cabelo? Agora, imagine dividi-lo mil vezes. Essa é a ordem de grandeza que começamos a explorar quando falamos em nanoescala. É um universo onde as regras que conhecemos para o mundo macroscópico começam a se curvar, dando lugar a fenômenos surpreendentes e propriedades totalmente novas. Entender essa escala é o primeiro passo para desvendar o potencial da nanoeletrônica.

O que é um nanômetro?

1 nm = 10^{-9} metros

Um bilionésimo de metro

Átomo de Hidrogênio

≈ 0,1 nm de diâmetro

O menor elemento

Molécula de DNA

≈ 2,5 nm de largura

Código da vida

Fio de Cabelo

≈ 80.000 nm

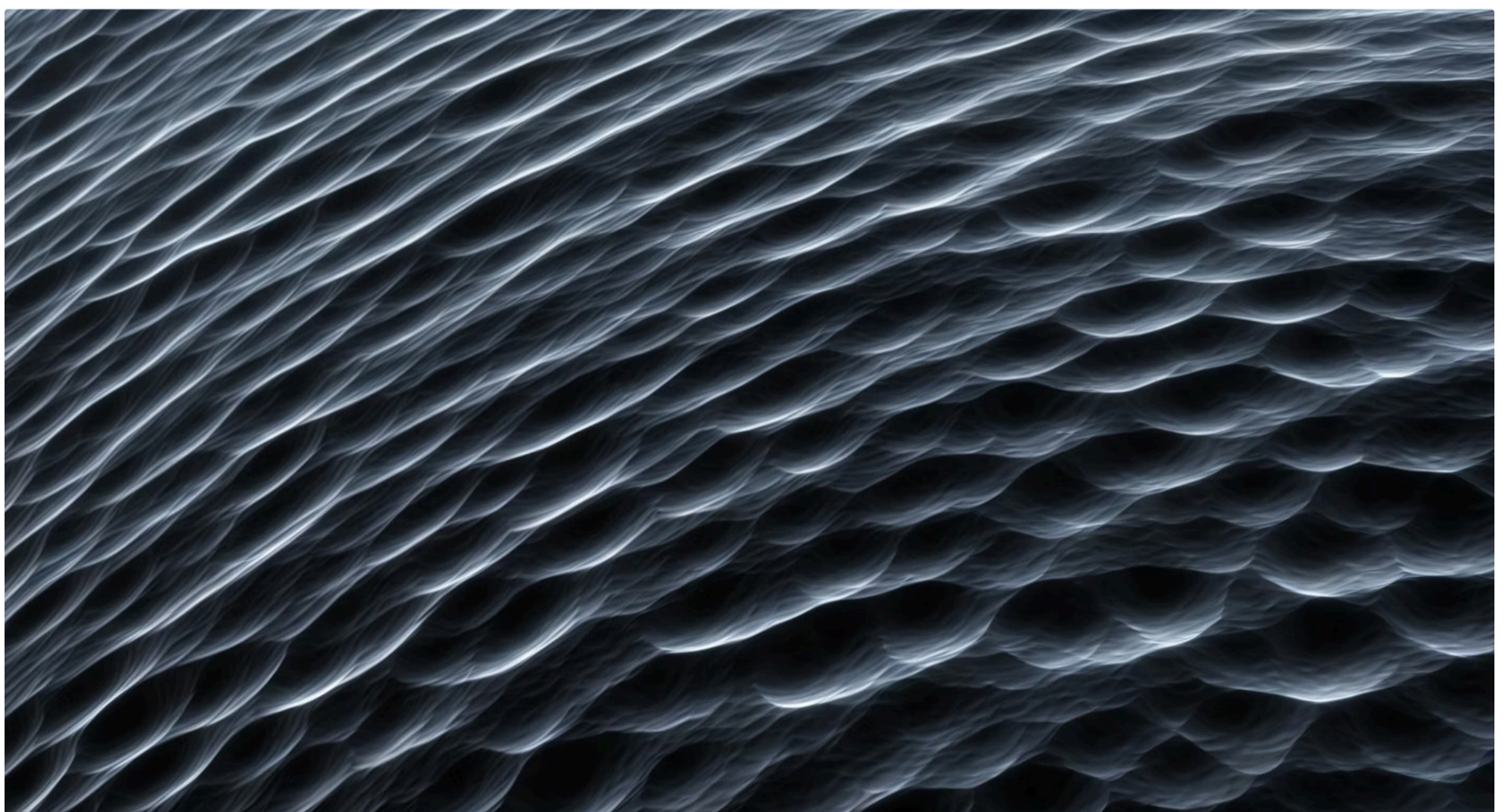
Para comparação

Nesse reino do infinitamente pequeno, um nanômetro (nm) equivale a um bilionésimo de metro (10^{-9} m). Para colocar isso em perspectiva, um átomo de hidrogênio tem cerca de 0,1 nm de diâmetro, e uma molécula de DNA tem aproximadamente 2,5 nm de largura. Quando a matéria é reduzida a essas dimensões, entre 1 e 100 nanômetros, ela começa a exibir comportamentos que não são observados em suas contrapartes maiores. É como se um cubo de gelo, ao ser quebrado em pedacinhos minúsculos, não só derretesse mais rápido, mas também mudasse de cor ou se tornasse um condutor de eletricidade.

Propriedades Únicas da Nanoescala

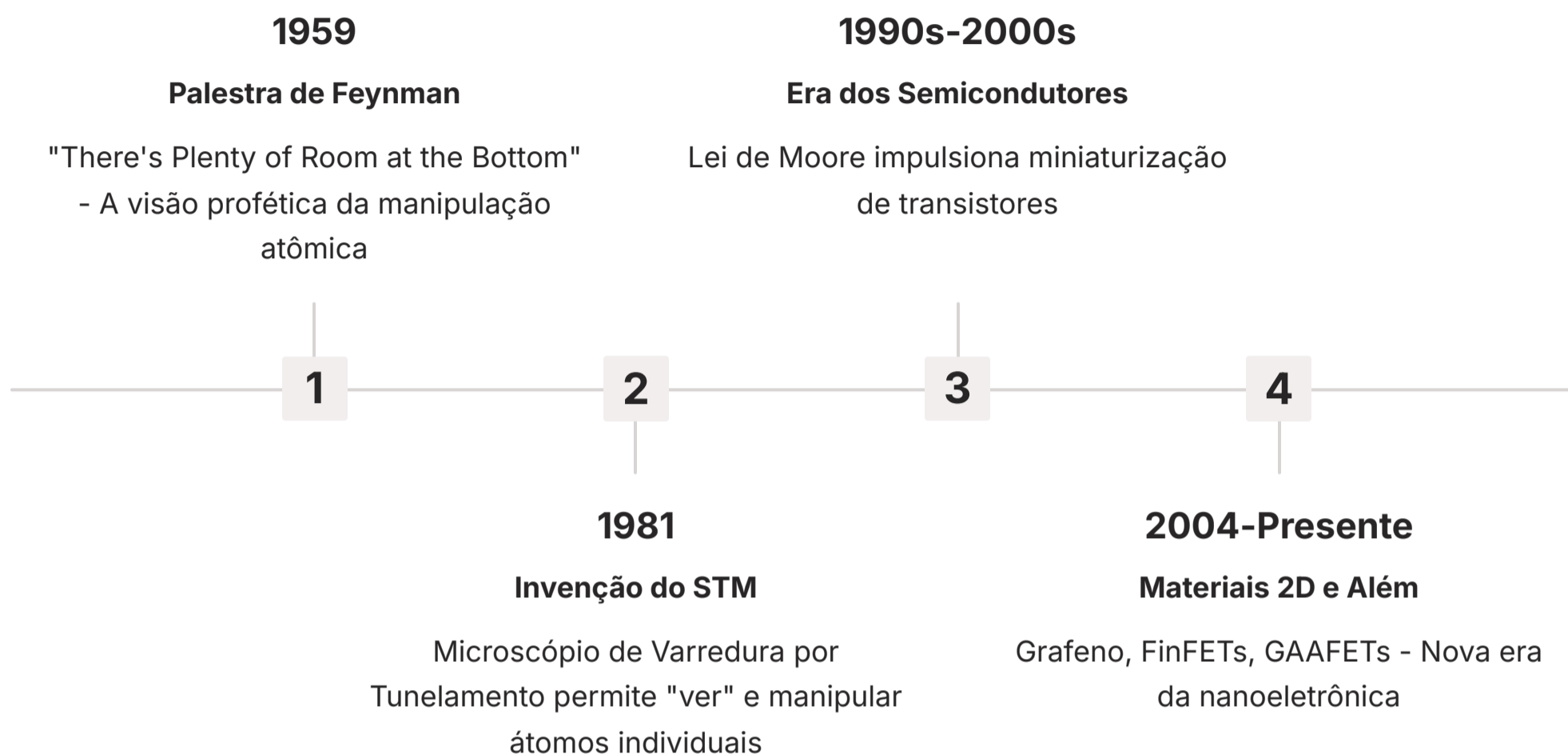
As propriedades únicas da nanoescala surgem principalmente de dois fatores: o **aumento da área de superfície em relação ao volume** e os **efeitos quânticos**.

Pense em um cubo de açúcar: se você o esmagar em pó, a área total de superfície exposta aumenta drasticamente, permitindo que ele se dissolva muito mais rápido. Da mesma forma, materiais em nanoescala têm uma proporção superfície-volume enorme, o que os torna muito mais reativos e eficientes em catálise, por exemplo. Além disso, a essa dimensão, as leis da física clássica dão lugar à mecânica quântica, onde o comportamento de elétrons e átomos é governado por probabilidades e níveis de energia discretos, abrindo caminho para fenômenos como o confinamento quântico e o tunelamento, que são a base da nanoeletrônica moderna.

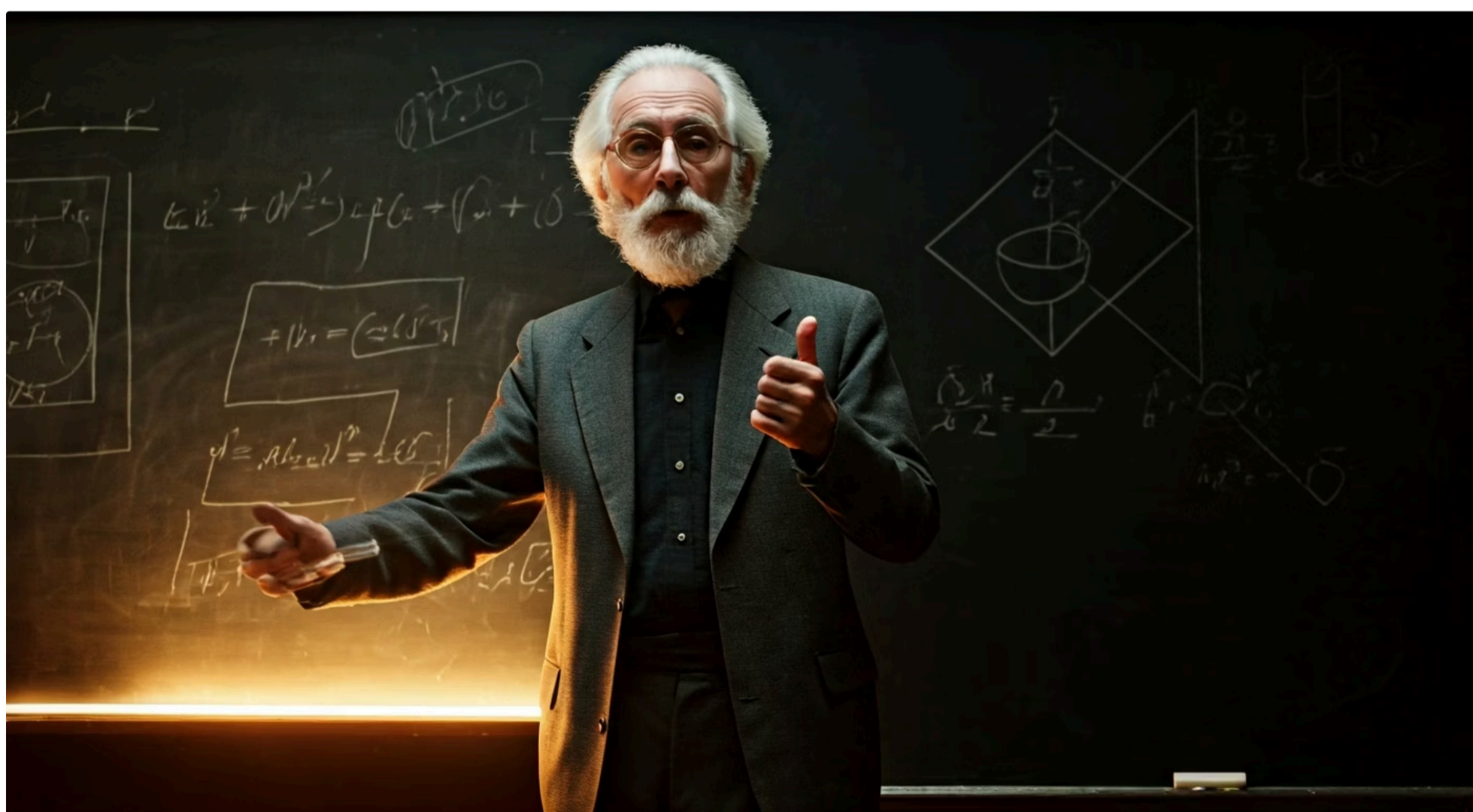


Uma Breve História: Da Visão de Feynman ao Cenário Atual

A ideia de manipular a matéria em sua escala mais fundamental não é nova, mas sua concretização é um feito relativamente recente. A semente dessa revolução foi plantada em 1959, quando o físico Richard Feynman proferiu sua célebre palestra "There's Plenty of Room at the Bottom" (Há muito espaço lá embaixo). Ele não apenas previu a possibilidade de escrever a Bíblia na cabeça de um alfinete, mas também desafiou a comunidade científica a explorar as possibilidades de construir máquinas e dispositivos átomo por átomo.



Por décadas, a visão de Feynman permaneceu no campo da teoria e da ficção científica, aguardando o desenvolvimento de ferramentas que pudessem tornar essa manipulação uma realidade. O ponto de virada veio em 1981, com a invenção do Microscópio de Varredura por Tunelamento (STM) por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer na IBM. Essa ferramenta revolucionária permitiu não apenas "ver" átomos individualmente, mas também manipulá-los, movendo-os um a um para criar estruturas. Foi como ganhar as mãos para trabalhar no universo que Feynman havia imaginado.



Desde então, o cenário da nanotecnologia e, em particular, da nanoeletrônica, explodiu em inovações. A capacidade de fabricar transistores cada vez menores, seguindo a Lei de Moore, impulsionou a indústria de semicondutores. Hoje, estamos no limiar de uma nova era, onde a manipulação de materiais 2D como o grafeno, a exploração de pontos quânticos e a evolução das arquiteturas de transistores para FinFETs e GAAFETs não são apenas avanços incrementais, mas saltos quânticos que prometem redefinir a computação, a energia e a medicina, transformando a visão de Feynman em uma realidade tangível e em constante expansão.

Nanociência e Nanotecnologia: Distinguindo os Campos

Muitas vezes, os termos Nanociência e Nanotecnologia são usados de forma intercambiável, mas eles representam fases distintas e complementares de um mesmo campo de estudo. Compreender essa diferença é fundamental para apreciar a amplitude e a profundidade das inovações que surgem dessa área. É como diferenciar a física de um foguete da engenharia que o constrói: um estuda os princípios, o outro os aplica.

Nanociência

Estudo dos fenômenos e da manipulação de materiais em escala nanométrica

- Pesquisa fundamental
- Descoberta de princípios
- Compreensão de propriedades
- Exploração de efeitos quânticos

Nanotecnologia

Aplicação prática do conhecimento científico

- Design e produção
- Desenvolvimento de produtos
- Inovação tecnológica
- Soluções para o mercado

A **Nanociência** é o estudo dos fenômenos e da manipulação de materiais em escala nanométrica. Ela se concentra na pesquisa fundamental, buscando entender as propriedades físicas, químicas e biológicas que emergem quando a matéria é reduzida a dimensões de 1 a 100 nanômetros. Os cientistas que atuam nessa área estão interessados em descobrir por que um material se comporta de maneira diferente em nanoescala, como os efeitos quânticos influenciam suas características e como podemos prever e controlar esses comportamentos. É uma área de exploração e descoberta, onde a curiosidade impulsiona a busca por conhecimento.

Por outro lado, a **Nanotecnologia** é a aplicação prática desse conhecimento. Ela envolve o design, a caracterização, a produção e a aplicação de estruturas, dispositivos e sistemas que operam em nanoescala. Engenheiros e tecnólogos utilizam os princípios descobertos pela Nanociência para criar produtos e soluções inovadoras, desde novos materiais com propriedades aprimoradas até dispositivos eletrônicos mais eficientes e sistemas de entrega de medicamentos mais precisos. A Nanotecnologia é a ponte entre a pesquisa fundamental e a inovação que impacta o nosso dia a dia.

Exemplo Prático: Pontos Quânticos

Nanociência: Estuda como o confinamento de elétrons em nanocristais semicondutores altera suas propriedades ópticas, fazendo-os emitir luz em cores específicas dependendo do seu tamanho.

Nanotecnologia: Aplica esse conhecimento no desenvolvimento de telas de televisão QLED, que utilizam esses pontos quânticos para produzir cores mais vibrantes e eficientes, ou em biossensores para detecção precoce de doenças.

Conceito	Âmbito/Foco	Base/Origem	Exemplo
Nanociência	Estudo fundamental de fenômenos em nanoescala	Pesquisa básica, descoberta de princípios	Investigação das propriedades ópticas de pontos quânticos
Nanotecnologia	Aplicação prática e desenvolvimento de produtos	Engenharia, inovação baseada em princípios	Fabricação de telas QLED ou biossensores com pontos quânticos

O Salto Quântico: Princípios de Mecânica Quântica para Nanoeletrônica

Ao mergulharmos na nanoescala, as regras do jogo mudam drasticamente. A física clássica, que descreve o movimento de bolas de bilhar ou planetas, não consegue explicar o comportamento de elétrons e átomos em dimensões tão pequenas. É aqui que a **Física Quântica** entra em cena, revelando um universo onde a energia é quantizada, partículas podem se comportar como ondas e a incerteza é uma característica intrínseca. Para a nanoeletrônica, entender alguns desses efeitos quânticos é crucial para projetar e otimizar dispositivos.



Confinamento Quântico

Quando um elétron é confinado em uma "caixa" nanométrica, sua energia não pode mais assumir qualquer valor, mas apenas níveis discretos, como degraus em uma escada. Essa quantização de energia altera drasticamente as propriedades eletrônicas e ópticas do material.



Tunelamento Quântico

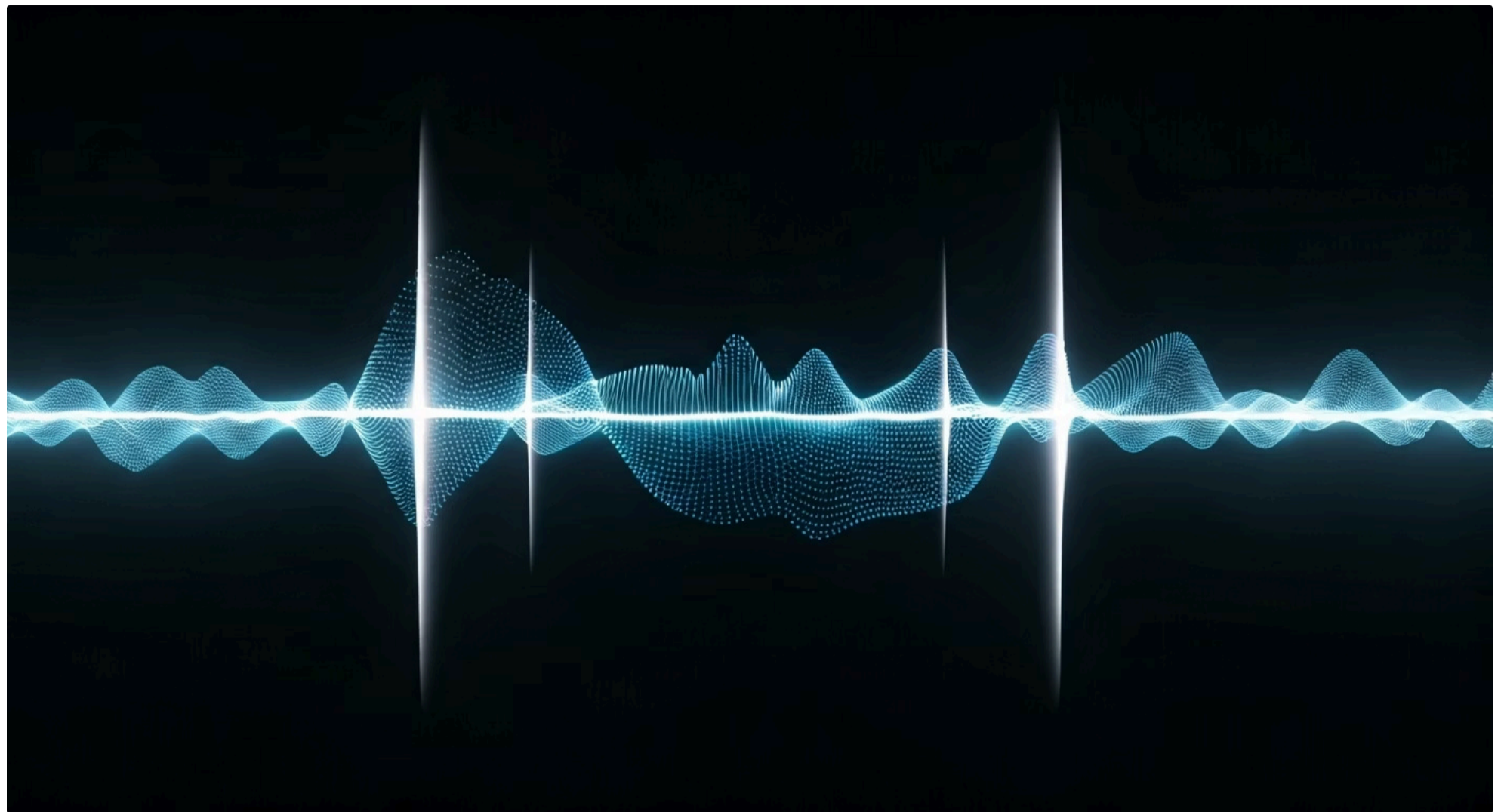
Uma partícula quântica, como um elétron, tem uma probabilidade não nula de "tunelar" através de uma barreira, mesmo que não tenha energia suficiente para superá-la. Esse fenômeno é essencial para o funcionamento de dispositivos como o STM.



Dualidade Onda-Partícula

Em nanoescala, elétrons e outras partículas exibem comportamento tanto de onda quanto de partícula, permitindo fenômenos de interferência e difração que são explorados em dispositivos quânticos.

Um dos fenômenos mais importantes é o **confinamento quântico**. Imagine um elétron que normalmente pode se mover livremente em um material. Se você o confinar em uma "caixa" nanométrica, sua energia não poderá mais assumir qualquer valor, mas apenas níveis discretos, como degraus em uma escada. Essa quantização de energia altera drasticamente as propriedades eletrônicas e ópticas do material. É o que acontece em pontos quânticos, por exemplo, onde o tamanho do nanocristal determina a cor da luz que ele emite, um efeito que não tem paralelo no mundo macroscópico.



Outro efeito quântico fundamental é o **tunelamento quântico**. Pense em uma bola rolando em direção a uma colina. Pela física clássica, ela só a atravessaria se tivesse energia suficiente para subir e descer o outro lado. No entanto, em nanoescala, uma partícula quântica, como um elétron, tem uma probabilidade não nula de "tunelar" através da barreira, mesmo que não tenha energia suficiente para superá-la. Esse fenômeno é essencial para o funcionamento de dispositivos como o Microscópio de Varredura por Tunelamento (STM) e é um desafio e uma oportunidade para o design de transistores em nanoescala, onde a barreira entre o "ligado" e o "desligado" pode ser "tunelada" indesejadamente.

Esses princípios quânticos não são apenas curiosidades teóricas; eles são a base para o desenvolvimento de novas tecnologias. A capacidade de controlar o confinamento e explorar o tunelamento permite a criação de dispositivos eletrônicos com funcionalidades inéditas, abrindo caminho para a computação quântica e para transistores que operam em limites de escala antes impensáveis, onde cada átomo conta.

Materiais Avançados: A Base da Nanoeletrônica Moderna

A revolução da nanoeletrônica não seria possível sem a descoberta e o desenvolvimento de materiais com propriedades extraordinárias em nanoescala. Se os princípios da mecânica quântica nos dão as regras do jogo, os materiais avançados são os "blocos de construção" que nos permitem jogar. Eles são a espinha dorsal de dispositivos mais rápidos, menores e mais eficientes, e a pesquisa nessa área continua a desvendar novas possibilidades.



Grafeno

Uma única camada de átomos de carbono em rede hexagonal

- 200x mais forte que o aço
- Excelente condutor elétrico
- Extremamente leve e flexível
- Transparente



Nanotubos de Carbono

Folhas de grafeno enroladas em cilindros

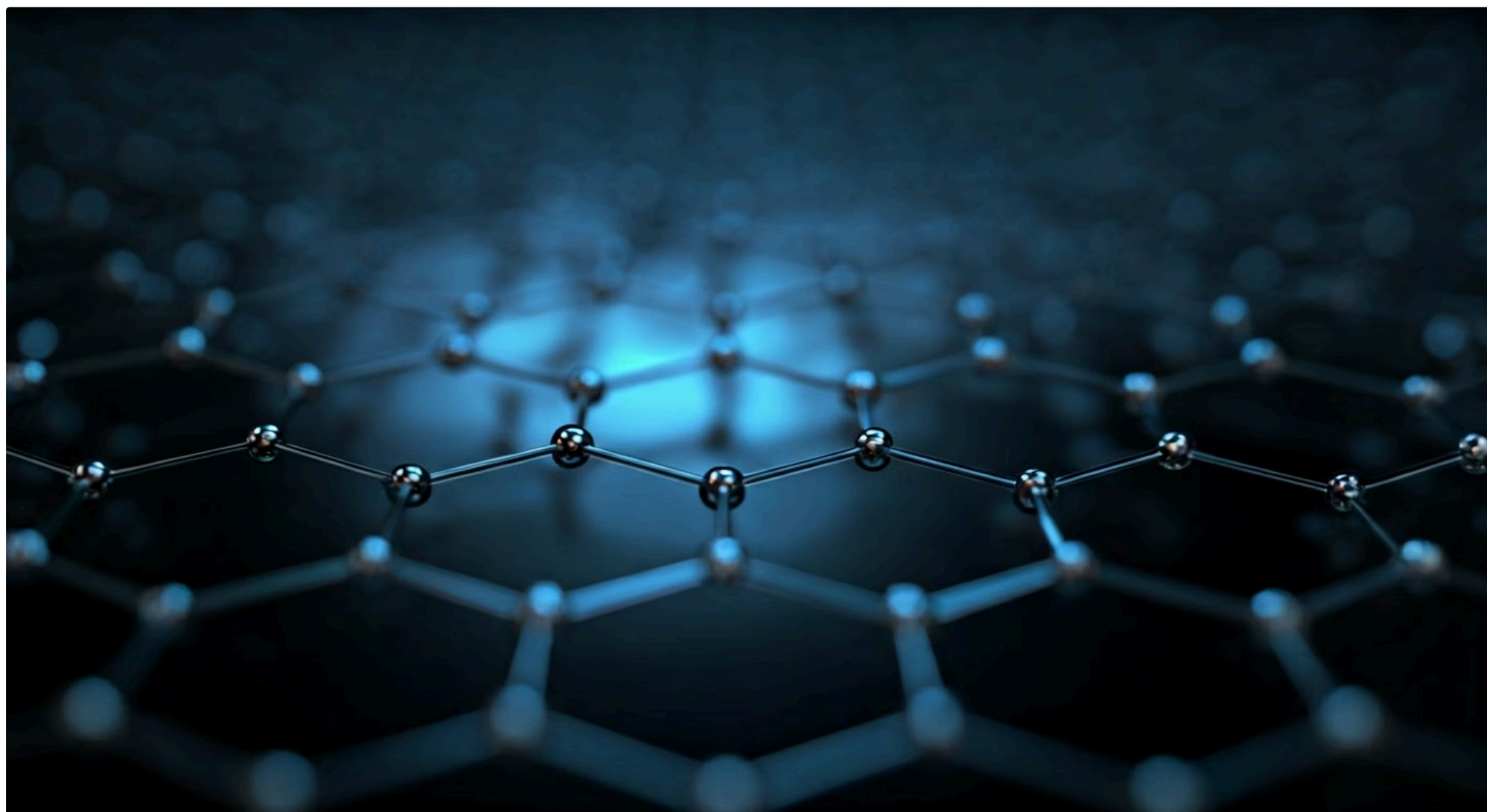
- Condutores ou semicondutores
- Alta resistência mecânica
- Excelente condutividade térmica
- Substitutos potenciais do silício



Pontos Quânticos

Nanocristais semicondutores

- Propriedades ópticas ajustáveis
- Emissão de luz controlada por tamanho
- Aplicações em displays e células solares
- Uso em biomedicina



Entre os materiais mais promissores, destacam-se os **materiais 2D**, como o **grafeno**. Descoberto em 2004, o grafeno é uma única camada de átomos de carbono arranjados em uma rede hexagonal, como uma tela de galinheiro. Ele é o material mais fino conhecido, mas também é 200 vezes mais forte que o aço, extremamente leve e um excelente condutor de elétrons, superando o cobre. Sua condutividade e mobilidade eletrônica excepcionais o tornam um candidato ideal para transistores de alta velocidade e sensores ultra-sensíveis, prometendo uma nova geração de eletrônicos flexíveis e transparentes.

Além do grafeno, os **nanotubos de carbono (NTCs)**, que são folhas de grafeno enroladas em cilindros, também exibem propriedades notáveis. Dependendo de como são enrolados, podem ser condutores ou semicondutores, com resistências mecânicas e térmicas impressionantes. Eles são vistos como substitutos potenciais para o silício em transistores e interconexões, permitindo a miniaturização contínua e a melhoria do desempenho. Os **pontos quânticos**, nanocristais semicondutores que já mencionamos, completam esse trio de materiais revolucionários, com suas propriedades ópticas ajustáveis que os tornam valiosos para displays, células solares e aplicações biomédicas.

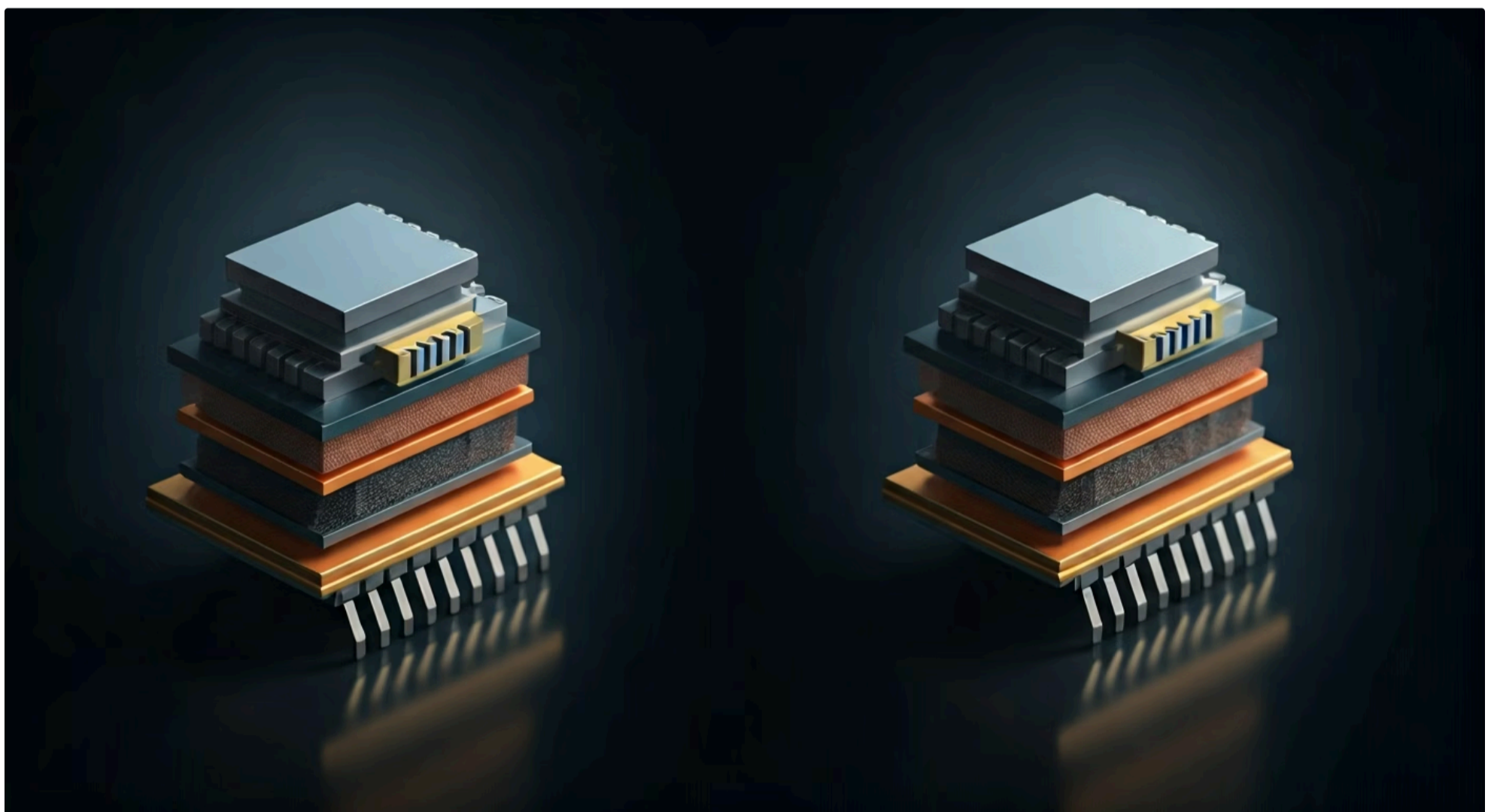
A exploração desses materiais não é apenas uma questão de curiosidade científica; é a busca por soluções para os desafios da eletrônica moderna. Eles oferecem caminhos para superar os limites do silício, permitindo a criação de dispositivos com funcionalidades que antes eram impensáveis, desde computadores mais potentes até sensores que detectam doenças em estágios iniciais.

A Evolução dos Transistores: Do Planar ao 3D

No coração de todo dispositivo eletrônico moderno, do seu smartphone ao supercomputador, reside o transistor. Essa pequena chave eletrônica, que pode ligar ou desligar um sinal, é o bloco fundamental da computação digital. Por décadas, a indústria seguiu a Lei de Moore, que previa o dobramento do número de transistores em um chip a cada dois anos, impulsionando a miniaturização e o aumento do desempenho. No entanto, essa jornada não foi sem desafios, especialmente quando os transistores atingiram a nanoescala.



Os primeiros transistores, os **MOSFETs planares**, eram estruturas bidimensionais onde o canal por onde os elétrons fluíam era controlado por um único portão na parte superior. À medida que esses transistores encolhiam, surgiam problemas como o vazamento de corrente e o controle deficiente do canal, o que comprometia a eficiência e o desempenho. Era como tentar controlar o fluxo de água em um cano muito estreito com uma torneira que não fechava completamente. A física da nanoescala exigia uma nova abordagem.



A solução para esses desafios veio com a introdução das arquiteturas 3D, marcando uma evolução significativa na fabricação de semicondutores. Os **FinFETs (Fin Field-Effect Transistors)**, introduzidos comercialmente por volta de 2011, revolucionaram o design. Em vez de um canal plano, o FinFET utiliza um canal em forma de "barbatana" (fin), que é envolvido por um portão em três lados. Isso proporciona um controle eletrostático muito melhor sobre o canal, reduzindo o vazamento de corrente e permitindo que os transistores operem de forma mais eficiente em tamanhos menores. É como ter três torneiras controlando o mesmo cano, garantindo um fechamento muito mais eficaz.

Essa transição para o 3D foi crucial para manter a Lei de Moore viva por mais uma década, permitindo que os processadores continuassem a se tornar mais poderosos e eficientes. A inovação nos transistores é um testemunho da engenhosidade humana em superar os limites físicos, garantindo que a nanoeletrônica continue a impulsionar o avanço tecnológico.

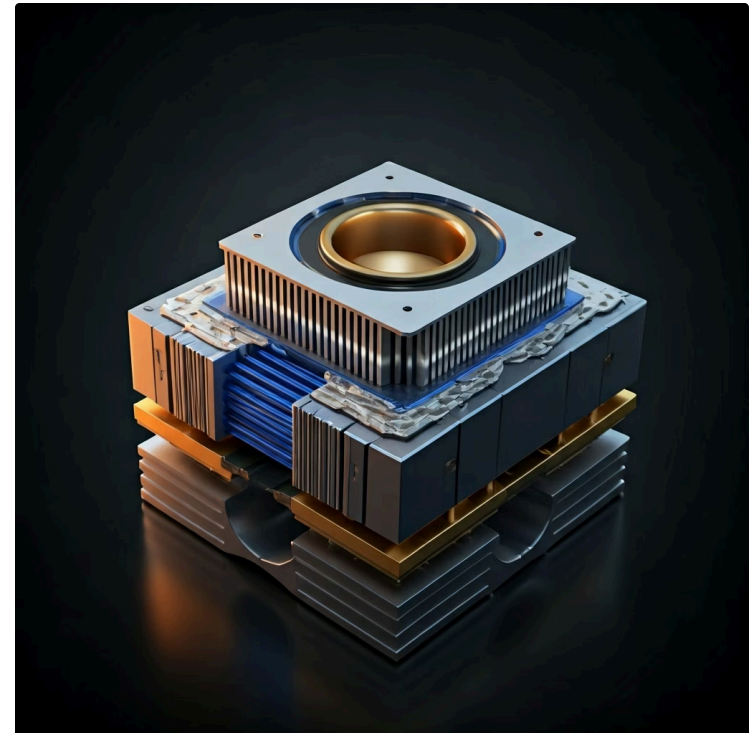
O Futuro da Computação: GAAFETs e Além

A evolução dos transistores não parou nos FinFETs. À medida que a demanda por ainda mais desempenho e eficiência energética cresce, a indústria de semicondutores busca continuamente novas arquiteturas que possam empurrar os limites da miniaturização. Estamos agora testemunhando a ascensão das arquiteturas **Gate-All-Around (GAAFETs)**, que representam o próximo salto tecnológico e definem o futuro da computação.

Arquitetura GAAFET

Os GAAFETs levam o conceito de controle do canal a um novo nível. Em vez de um portão que envolve o canal em três lados, como nos FinFETs, os GAAFETs utilizam um portão que envolve completamente o canal em todos os quatro lados. Isso é conseguido através de estruturas de canal em forma de nanofios ou nanoplacas empilhadas, que são totalmente circundadas pelo material do portão.

- 📄 **Controle Total:** É como ter um controle total sobre o fluxo de água, garantindo que a torneira feche hermeticamente e abra instantaneamente.



Controle Eletrostático Superior

Portão envolve completamente o canal, proporcionando controle preciso sobre o fluxo de elétrons



Mínimo Vazamento de Corrente

Redução drástica de corrente de fuga, aumentando a eficiência energética



Comutação Mais Rápida

Transição entre estados "ligado" e "desligado" mais rápida e eficiente



Maior Densidade

Permite fabricação de chips com mais transistores por área, impulsionando o desempenho

O resultado é um controle eletrostático ainda mais preciso sobre o canal, minimizando o vazamento de corrente e permitindo uma comutação mais rápida e eficiente. É como ter um controle total sobre o fluxo de água, garantindo que a torneira feche hermeticamente e abra instantaneamente.

Essa tecnologia é fundamental para o desenvolvimento de processadores de próxima geração, permitindo a fabricação de chips com densidades de transistores ainda maiores e um consumo de energia significativamente menor. Empresas como a Samsung e a Intel já estão investindo pesadamente na produção de GAAFETs, que serão a base para os nós de tecnologia mais avançados (como 3nm e 2nm), impulsionando inovações em inteligência artificial, computação de alto desempenho e dispositivos móveis.

Além dos GAAFETs, a pesquisa continua a explorar conceitos ainda mais futuristas, como transistores baseados em materiais 2D, computação neuromórfica (inspirada no cérebro humano) e, claro, a computação quântica. A nanoeletrônica está em uma jornada contínua de inovação, onde cada avanço nos materiais e nas arquiteturas de dispositivos nos aproxima de um futuro com capacidades computacionais inimagináveis.

O Impacto da Nanoeletrônica na Indústria e na Sociedade

A nanoeletrônica não é apenas um campo de pesquisa acadêmica; é uma força motriz por trás de transformações profundas na indústria e na sociedade. Desde a forma como nos comunicamos até como cuidamos da nossa saúde, a capacidade de manipular a matéria em nanoescala tem gerado inovações que moldam nosso cotidiano e abrem caminho para um futuro mais conectado, eficiente e sustentável.

Computação e Semicondutores

Processadores mais rápidos, menores e eficientes. Smartphones potentes, laptops leves, centros de dados eficientes. Avanço da IA e aprendizado de máquina.

Medicina e Saúde

Sensores em nanoescala para diagnósticos precoces. Dispositivos implantáveis para monitoramento em tempo real. Entrega direcionada de medicamentos.

Energia Sustentável

Células solares mais eficientes. Baterias com maior capacidade e recarga rápida. Sistemas de iluminação LED econômicos.

Na **indústria de semicondutores e computação**, o impacto é direto e inegável. A miniaturização contínua dos transistores, impulsionada pela nanoeletrônica, permitiu a criação de processadores mais rápidos, menores e com menor consumo de energia. Isso resultou em smartphones mais potentes, laptops mais leves, centros de dados mais eficientes e o avanço da inteligência artificial e do aprendizado de máquina, que dependem de um poder computacional massivo. A capacidade de integrar bilhões de transistores em um único chip é um testemunho do sucesso da nanoeletrônica.

Além da computação, a nanoeletrônica está revolucionando a **medicina e a saúde**. Sensores em nanoescala podem detectar biomarcadores de doenças em estágios iniciais com uma sensibilidade sem precedentes, permitindo diagnósticos mais rápidos e precisos. Dispositivos implantáveis menores e mais eficientes podem monitorar a saúde em tempo real, enquanto sistemas de entrega de medicamentos em nanoescala podem direcionar tratamentos diretamente para células doentes, minimizando efeitos colaterais. Na **energia**, a nanoeletrônica contribui para células solares mais eficientes, baterias com maior capacidade e menor tempo de recarga, e sistemas de iluminação LED mais econômicos.

"A nanoeletrônica é a base para a próxima geração de tecnologias. Ela nos permite criar um mundo onde os dispositivos são mais inteligentes, a medicina é mais personalizada, a energia é mais limpa e a comunicação é mais fluida."

Em resumo, a nanoeletrônica é a base para a próxima geração de tecnologias. Ela nos permite criar um mundo onde os dispositivos são mais inteligentes, a medicina é mais personalizada, a energia é mais limpa e a comunicação é mais fluida. Seu impacto é tão vasto que toca praticamente todos os setores, prometendo continuar a redefinir os limites do que é possível e a impulsionar o progresso humano.

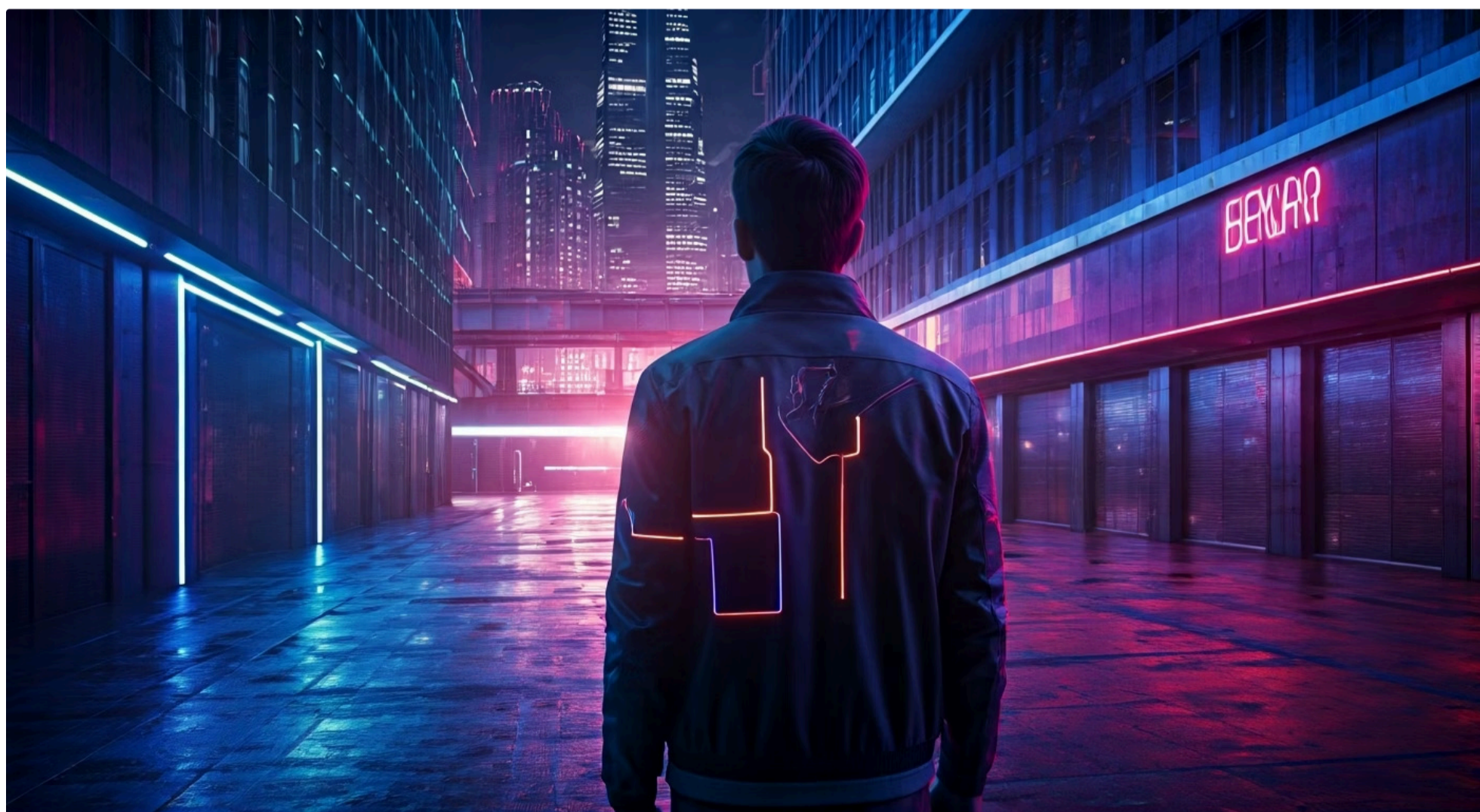
Consolidação e Próximos Passos

Chegamos ao fim da nossa primeira aula, onde desvendamos o fascinante universo da nanoescala e os fundamentos da nanoeletrônica. Vimos que a manipulação da matéria em dimensões nanométricas abre portas para propriedades únicas e fenômenos quânticos que são a base de inovações revolucionárias. Desde a visão profética de Richard Feynman até os avanços em materiais 2D e a evolução dos transistores para arquiteturas 3D como FinFETs e GAAFETs, a jornada da nanoeletrônica é uma história de constante superação de limites. Compreendemos a distinção entre Nanociência e Nanotecnologia e o impacto transformador que essa área tem na indústria e na sociedade, desde a computação até a medicina e a energia.

Nanoescala 1-100 nm com propriedades únicas	Efeitos Quânticos Confinamento e tunelamento	Materiais 2D Grafeno, NTCs, pontos quânticos
Transistores 3D FinFETs e GAAFETs	Impacto Global Indústria e sociedade	

Em prática

A nanoeletrônica permite que seu celular seja tão poderoso e fino; ela está por trás das telas vibrantes das TVs QLED e dos diagnósticos médicos mais precisos. Entender seus princípios é fundamental para qualquer profissional que deseje atuar em áreas de alta tecnologia, desde o desenvolvimento de novos materiais até a engenharia de sistemas eletrônicos avançados.



Autoavaliação

1

Qual das seguintes opções melhor define a nanoescala em termos de dimensão?

1. Entre 1 e 100 micrômetros.
2. Entre 1 e 100 milímetros.
3. Entre 1 e 100 nanômetros.
4. Acima de 100 nanômetros.

2

O que diferencia principalmente a Nanociência da Nanotecnologia?

1. A Nanociência foca na aplicação prática, enquanto a Nanotecnologia foca na pesquisa fundamental.
2. A Nanociência estuda os fenômenos em nanoescala, e a Nanotecnologia aplica esse conhecimento para criar produtos.
3. A Nanociência lida apenas com materiais orgânicos, e a Nanotecnologia com inorgânicos.
4. Não há diferença significativa, os termos são sinônimos.

3

Qual efeito quântico permite que um elétron "atravesse" uma barreira de energia mesmo sem ter energia suficiente para superá-la?

1. Confinamento quântico.
2. Efeito fotoelétrico.
3. Tunelamento quântico.
4. Supercondutividade.

4

Qual das seguintes arquiteturas de transistor representa um avanço em relação aos MOSFETs planares, utilizando um canal em forma de "barbatana" envolvido por um portão em três lados?

1. GAAFET.
2. FinFET.
3. BJT.
4. JFET.



Gabarito

1. c) Entre 1 e 100 nanômetros.
2. b) A Nanociência estuda os fenômenos em nanoescala, e a Nanotecnologia aplica esse conhecimento para criar produtos.
3. c) Tunelamento quântico.
4. b) FinFET.

Questão Discursiva e Próximos Passos

Questão Discursiva

Explique como a evolução dos transistores, desde os MOSFETs planares até as arquiteturas 3D como FinFETs e GAAFETs, tem sido crucial para manter o avanço da Lei de Moore e quais benefícios essas novas arquiteturas trouxeram em termos de desempenho e eficiência.



Próxima Aula

Aula 2 – O Salto Quântico: Princípios de Mecânica Quântica para Nanoeletrônica

Aprofundaremos nos conceitos da mecânica quântica que governam o comportamento da matéria em nanoescala, explorando em detalhes o confinamento quântico, o tunelamento e outros fenômenos essenciais para a compreensão e o desenvolvimento de dispositivos nanoeletrônicos.

Recursos Adicionais



Artigo "There's Plenty of Room at the Bottom" (Richard Feynman)

Para uma leitura inspiradora da origem da nanotecnologia.




Vídeos explicativos sobre FinFETs e GAAFETs

Para visualizar as arquiteturas 3D dos transistores (canais de tecnologia).



Documentários sobre Grafeno e Nanotubos de Carbono

Para entender as propriedades e aplicações desses materiais avançados.

 **NOTA IMPORTANTE:** As informações técnicas desta aula estão atualizadas até 2025. Consulte sempre fontes oficiais e publicações científicas recentes para verificar alterações e os mais novos desenvolvimentos na área.