

Nano Dispositivos Eletrônicos e Fotônicos baseados em Nano Tubos de Carbono

Fernando A. P. Gomes e Victor Dmitriev

Universidade Federal do Pará, Av. Augusto Correa, nº 1, CEP: 66.059-000 – Belém – Pa.

Resumo — A busca de novas tecnologias no projeto de dispositivos eletrônicos, fazem dos nano tubos de carbonos elementos de uso indispensáveis em tais projetos. Os nano tubos de carbono permitem a fabricação de dispositivos em escalas nano métricas, com uma diversificação bastante ampla o que permite projetos de uma grande gama de dispositivos eletrônicos e opto eletrônicos, tais como diodos, transistores, diodos emissores de luz e muito mais. Este trabalho faz uma revisão no estado da arte no projeto de tais dispositivos, baseado na literatura existente, dando ênfase nas características elétricas de tais dispositivos bem como nos meios de se obter o efeito de retificação, o que viabiliza a construção de dispositivos eletrônicos em escala bastante reduzida.

Palavras-Chave — Microeletrônica, nanoeletrônica, nanofotônica.

I. INTRODUÇÃO

Os nano tubos de carbono (NTC) em suas diferentes configurações são uns dos nano materiais mais estudados desde a sua descoberta, em 1991, por Iijima e al. [1].

Os NTC's comportam-se como sistemas unidimensionais, pois o seu diâmetro é muito menor que o seu comprimento. Essa propriedade dos NTC's permite que os mesmos possuam características únicas, que são usadas na busca de novos dispositivos eletrônicos.

Espera-se que esses dispositivos, baseados nos NTC's, possuam desempenho, tanto elétrico quanto óptico, bem superior aos seus similares, que são projetados tendo como base os semicondutores de silício e GaAs.

Estudos teóricos e experimentais estão envolvidos na determinação das propriedades e aplicações dos NTC's. Os NTC's possuem uma gama muito ampla de importantes características elétricas, térmicas, ópticas e mecânicas, que são únicas, pois não são encontradas em nenhum outro material [2].

Na busca incessante de se obter dispositivos cada vez menores, há uma tendência em se usar moléculas individuais que simulem as características de uma junção $p-n$, na realização de tais dispositivos. Nesta busca, os NTC's de parede única tem se mostrado imbatíveis, pois, dependendo de seus diâmetros e quiralidades os mesmos podem apresentar comportamento tanto de um metal como de um semicondutor [3].

Fernando Gomes, fgomes@ufpa.br, Victor Dmitriev, victor@ufpa.br, Tel +55-91-32018332, Tel +55-91-32018029; Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, através do Projeto nº 470875/2009-7 e pela CAPES com bolsa de estudo de doutorado.

Neste trabalho, fazemos uma análise das características elétricas e óticas dos diversos dispositivos encontrados na literatura, que utilizam os NTC's de paredes simples, estruturado da seguinte forma: na seção I fazemos uma breve introdução; na seção II, apresentamos os nano dispositivos abordados neste estudo - diodos com NTC dando ênfase aos diodos Schottky, nano transistores de efeito de campo e diodos emissores de luz; na seção III, fazemos a conclusão desse trabalho.

II. NANO DISPOSITIVOS BASEADOS EM NTC

A. Nano diodos com NTC

Diodos com funções retificadoras de junção $p-n$ usam em seus projetos dopagem, impurezas, polímeros ou junções intramoleculares.

Junções intramoleculares podem ser obtidas dobrando-se um NTC em uma posição qualquer ao longo de seu cilindro, introduzindo-se no local de tal deformação, defeitos, de tal forma, que de um lado da dobra tem-se um NTC metálico e do outro lado um NTC semicondutor, conforme esquema da Fig. 1a. Outra forma de obtenção de tais junções é através da união de dois NTC's de diâmetros diferentes, sendo que um dos NTC's apresenta comportamento metálico e o outro, semicondutor. A Fig. 1b mostra detalhes de tal construção [4].

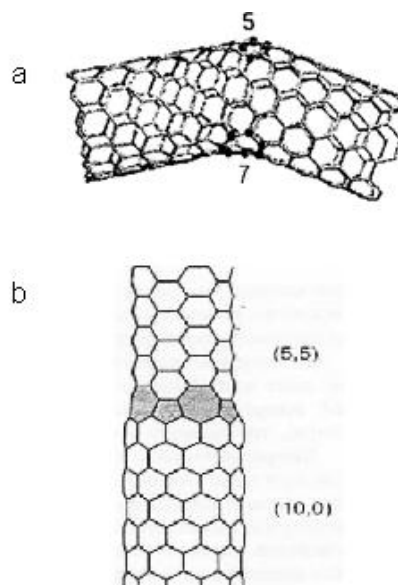


Fig. 1. Exemplo de obtenção de junções metal-semicondutor com NTC [4].

Em princípio, estes defeitos são conseguidos através de dois diferentes mecanismos: introdução de pares de pentágono-heptágono na estrutura hexagonal do carbono ou por uma deformação mecânica local em um nano tubo uniforme [3]-[4].

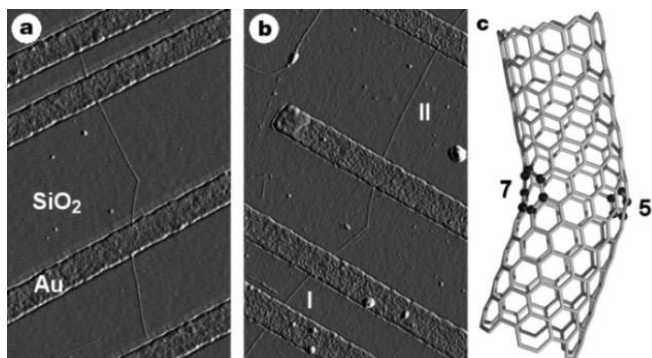


Fig. 2. Exemplo de imagem de junção em um NTC obtida através de um microscópio de força atômica [3].

De acordo com [3], o NTC mostrado na Fig. 2a está depositado diretamente sobre três eletrodos. Os eletrodos estão sobre um filme de SiO_2 , que por sua vez está sobre um substrato de silício, que faz a função de porta. A resistência do segmento do NTC superior, entre os dois eletrodos, é de $110\text{ K}\Omega$ a temperatura ambiente, mostrado em detalhe na Fig. 3a. Esse segmento possui comportamento metálico, haja vista que é independente da tensão de porta aplicada. Por outro lado, a característica corrente-tensão sobre a dobra do NTC, também mostrada na Fig. 3a, possui comportamento altamente não linear e assimétrica, assemelhando-se as características de corrente-tensão de um diodo retificador. Observa-se um aumento na corrente bastante acentuado, quando se aplica uma tensão positiva no eletrodo superior e esta tensão ultrapassa a tensão de limiar, que é em torno de 2 V , como se pode observar na figura. Há um acréscimo na corrente muito pequena para polarizações reversas. Esta junção apresenta uma impedância extremamente elevada para tensões em torno de Zero V . A Fig. 3b, representa um dispositivo com geometria ideal, pois tanto os segmentos I e II, bem como o segmento que contém a dobra, podem ser caracterizados separadamente. Os eletrodos são de ouro e titânio e possuem dimensões de 250 nm de largura, 20 nm de espessura e altura menor que 1 nm , o que minimiza a deformação do nano tubo.

A curva corrente-tensão da Fig. 3a é obtida com a porta aterrada. Já na Fig. 3b, as tensões de porta da direita pra esquerda, são de 2 V , 1 V , 0 V , -1 V , -2 V e -4 V , respectivamente.

Outro tipo de diodo, de particular interesse nas aplicações em altas frequências, na faixa que vai desde os 30 GHz até 3 THz , é o diodo Schottky. Os diodos que atuam nessa faixa são usados como detectores, misturadores e como multiplicadores de frequência [5].

O estado da arte emprega os diodos Schottky de estado sólido como detectores em temperatura ambientes e como multiplicadores na geração de ondas sub milimétricas, devido principalmente a sua alta velocidade de chaveamento e

adequação inerente para aplicações em baixas voltagens e altas correntes [6]-[7].

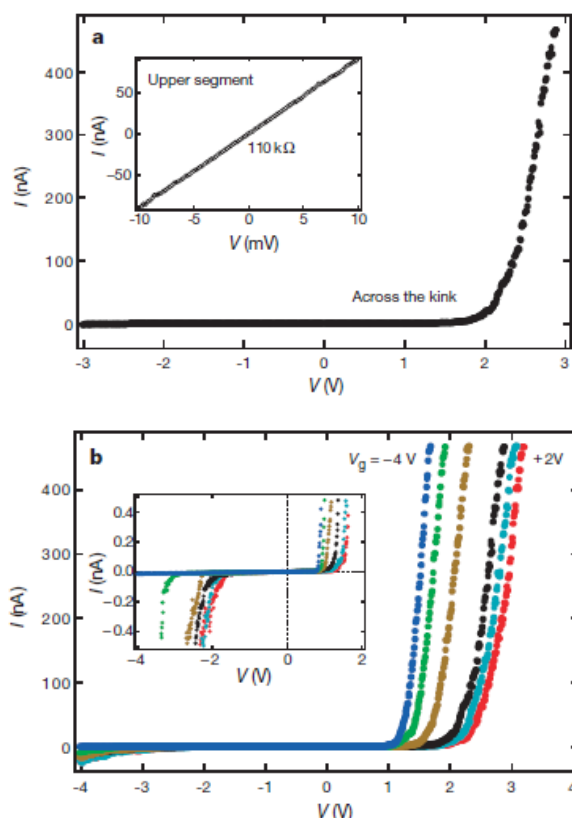


Fig. 3. Característica corrente-tensão sobre a junção metal-semicondutor da Fig. 2a [3].

Acima de alguns GHZ aparece a capacitância e a resistência parasítica inerente. A capacitância é proporcional à área da junção e a resistência é inversamente proporcional à mobilidade dos elétrons. Essas capacitâncias e resistências indesejáveis são devidas, principalmente, as limitações do processo de fabricação do dispositivo bem como das propriedades dos materiais [6]. Essas imperfeições limitam severamente a sensibilidade de detecção de sinais bem como na geração de sinais na faixa de THz . Valores típicos são da ordem de alguns microwatts para até $1,5\text{ THz}$ [5].

Os NTC's oferecem uma excelente alternativa, do ponto de vista de novos materiais, no projeto desses dispositivos para altas frequências, na faixa dos THz , haja vista as diminutas áreas de suas junções, que são da ordem de 2 nm de diâmetro, máximo, o que origina baixas capacitâncias, da ordem de dezenas de $aF\ \mu m$ e da alta mobilidade eletrônica, podendo chegar até $200.000\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}$ [6].

Diferentemente dos diodos Schottky de junção planar, o nível de contato de Fermi, não controla as propriedades dos dispositivos homólogos com NTC. Como consequência, pode-se escolher a melhor tensão de limiar para um desempenho ótimo do dispositivo [6]-[7].

A Fig. 4 mostra a representação esquemática básica de um diodo Schottky, cujo projeto emprega dois metais diferentes, nas duas pontas do NTC do tipo p . Os metais empregados

possuem funções de trabalho (Φ) diferentes. Um com função de trabalho bem menor que a do NTC, para se conseguir o contato Schottky e a do outro metal, com função de trabalho bem maior que a do NTC, para se conseguir o contato ôhmico [6].

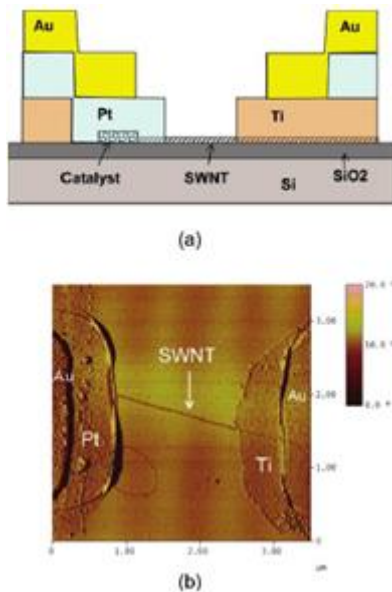


Fig. 4. (a) Representação esquemática do diodo Schottky, (b) Imagem típica obtida através de um microscópio de força atômica [6].

Na Fig. 4a, o contato Schottky é obtido com o uso do titânio (Ti), com $\Phi_{Ti} = 4,33 eV < \Phi_{NTC}$. A $\Phi_{NTC} \approx 4,9 eV$. O contato ôhmico com o uso da platina (Pt), com $\Phi_{Pt} = 5,65 eV > \Phi_{NTC}$ [6]. O NTC do dispositivo foi obtido através do crescimento de um catalizador de nano partículas de ferro sobre um substrato de silício. Entre o substrato e o NTC há uma camada de $\sim 400 nm$ de dióxido de silício.

A Fig. 5 mostra as características de corrente-tensão contínua, dc, para quatro diodos diferentes, do tipo Schottky, fabricados no mesmo substrato e na mesma fornada, com tensão de porta em zero V . Todos os diodos possuem um único NTC com característica semicondutora, entre os dois contatos, formados por diferentes metais, neste caso, por titânio e platina [6].

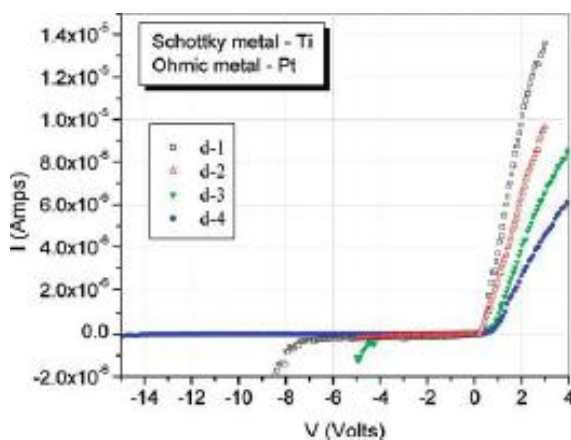


Fig. 5. Características dc de corrente-tensão de quatro diodos Schottky [6].

Diferentemente dos dispositivos de estado sólido que são projetados dessa forma, nota-se na Fig. 5, que as características dc de corrente-tensão, para os quatro diodos, são bastante diferente. Essas diferenças podem ser atribuídas, as características do NTC, ao comprimento total e a sobreposição que o NTC faz com os contatos metálicos [8].

Há outro tipo de diodo, também para alta frequência, que utiliza múltiplos NTC's em paralelo entre os contatos metálicos, em um mesmo dispositivo [6].

Cada dispositivo possui de 8 a 10 NTC's. Cada NTC pode ter comportamento tanto metálico como o de um semiconductor. Basta haver um NTC com características metálicas para que não exista o efeito desejado de retificação.

Os NTC's que apresentam comportamento metálico são selecionados e literalmente queimados, através de um processo que é descrito em [9]. Repete-se esse processo, até que a característica dc de corrente-tensão, do dispositivo, apresente comportamento de retificação.

A Fig. 6 mostra as curvas dc de corrente-tensão para diodos Schottky, com múltiplos NTC's entre seus contatos, mas que sofreram o processo descrito em [9]. Esta Fig. mostra claramente a mudança na característica corrente-tensão de um comportamento resistivo para um de retificação, após a queima seletiva dos NTC's metálicos.

O gráfico inserido na Fig. 6 mostra, em detalhe, a curva característica dc de corrente-tensão de um retificador para baixas tensões de polarização.

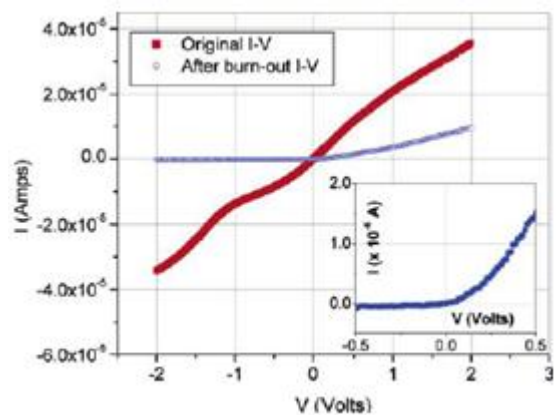


Fig. 6. Características dc de corrente-tensão de um diodo Schottky com múltiplos NTC's [6].

A Fig. 7 mostra as curvas características corrente-tensão de dispositivos simétricos, isto é, os contatos metálicos são feitos a partir do mesmo material. Todas as medidas elétricas foram feitas a temperatura ambiente no ar, usando o analisador Agilent 4140B [10].

A imagem da Fig. 7a foi obtida através do uso de um microscópio de varredura eletrônica. Na Fig. 7b, usa-se o paládio, Pd , como o metal de contato, resultando em um comportamento de um semiconductor do tipo p , com razão ligado-desligado de 10^6 . Na Fig. 7c, usa-se o titânio, Ti , como o metal de contato, resultando em um comportamento ambivalente, ou seja, para tensões negativas de polarização de porta, o dispositivo apresenta comportamento tipo p e para

tensões de polarização positiva, o mesmo dispositivo apresenta características semicondutoras do tipo n . A razão ligado-desligado é de 10^4 . Já para a Fig. 7d, usa-se o alumínio, Al , como o metal de contato, resultando em uma razão ligado-desligado de 10^3 para tensões de polarização de porta negativas e de 10^6 para polarização de porta positiva. Esse dispositivo com contatos de Al possui comportamento levemente ambivalente, sugerindo que o Al possui uma barreira Schottky maior na interface Al -CNT para portadores do tipo p do que para tipo n [10].

Como observa-se na Fig. 7, que a simples mudança do tipo do material a ser usado como contatos, altera o comportamento do dispositivo, podendo o mesmo ter comportamento do tipo p , do tipo n ou ambivalente.

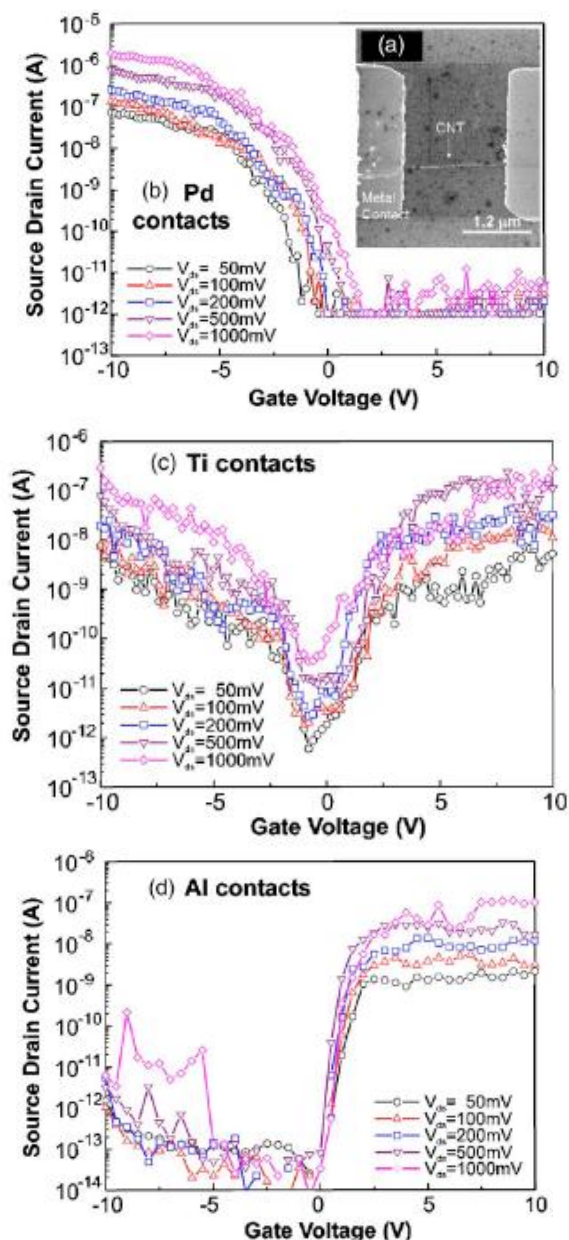


Fig. 7. Curvas características dc de corrente-tensão de um diodo Schottky simétrico, para três metais diferentes como contato [10].

B. Nano transistores baseados em NTC

A estrutura básica de um transistor de efeito de campo, FET, de estado sólido, é composta de dois eletrodos de metal, que são denominados de fonte e dreno, interligados por um canal semicondutor em uma pastilha de silício. Há também um terceiro eletrodo, chamado de porta, que fica isolado do canal por uma fina camada de óxido de silício. A tensão de polarização de porta é quem controla o fluxo de corrente, através da variação da largura do canal, entre os terminais de fonte e dreno. Nos FET com NTC, o canal semicondutor de silício é substituído por um NTC. Esse NTC, de parede simples, é depositado sobre eletrodos de metal com alta função trabalho, $\Phi > 5 eV$. Esses eletrodos são normalmente de ouro ou platina [11].

Em 1998, apareceram as primeiras demonstrações que os NTC poderiam ser usados nos projetos de transistores de efeito de campo [12]. Exemplo de tal dispositivo é mostrado na Fig. 8 [12].

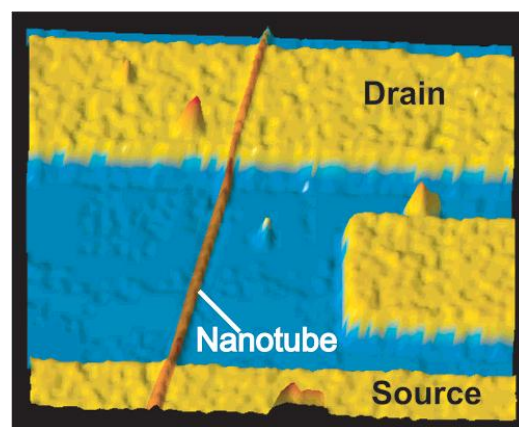


Fig. 8. Imagem obtida através de um microscópio de força atômica de um FET com NTC [12].

Na Fig. 8, vê-se claramente, o NTC posicionado no topo, interligando dessa forma, os dois eletrodos de metais nobres. Esses eletrodos são os terminais de fonte e do dreno do FET. Os eletrodos são fabricados em cima de um filme de SiO_2 , que por sua vez foi depositado em cima de uma bolacha de silício. Essa bolacha serve como terceiro terminal. Esse terminal secundário tem a função de porta.

Tais dispositivos com construção semelhante à mostrada na Fig. 8 tem comportamento de um FET tipo p . Possui uma razão entre corrente ligado-desligado da ordem de 10^5 . Esses dispositivos, embora sejam funcionais, apresentam uma alta resistência parasítica de contato, sendo tipicamente $\geq 1 M\Omega$, baixa corrente entre fonte e dreno e uma baixa transcondutância, da ordem de $10^{-9} A/V$ [12].

Para se reduzir a resistência de contato e melhorar as características do FET a NTC, faz-se uma variação do esquema mostrado na Fig. 8, conforme proposto por [11]. Nesta montagem, o NTC é disperso em uma lamina de silício oxidado. Os terminais de fonte e dreno são fabricados por cima do CNT semicondutor, conforme esquema da Fig. 9 [12]. Os terminais são feitos de titânio ou cobalto.

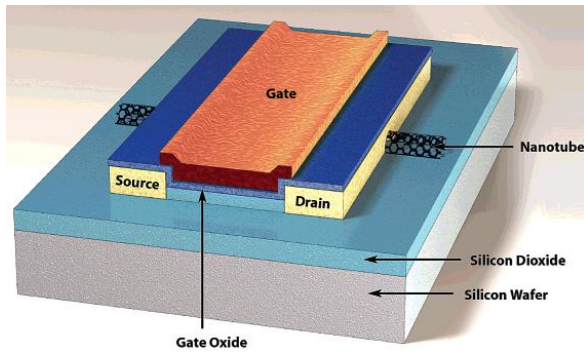


Fig. 9. Representação esquemática de um FET com NTC com porta por cima [12].

A redução na resistência parasita é conseguida através de um tratamento térmico entre o metal e o NTC [12]. Dessa forma, a resistência que era maior que $1\text{ M}\Omega$, reduziu-se para aproximadamente $30\text{ K}\Omega$. É uma redução bastante significativa.

A Fig. 10 mostra as características de saída de um FET com NTC [12].

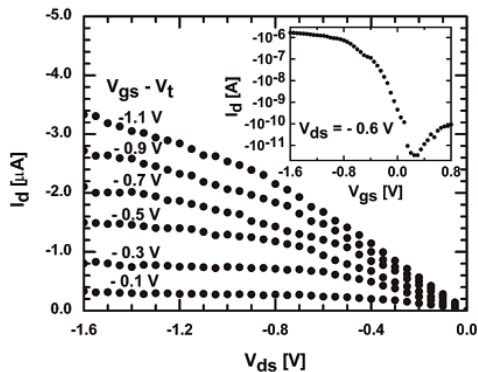


Fig. 10. Características elétricas de saída de um FET com NTC com fonte, dreno e porta de titânio, a temperatura ambiente e porta por cima [12].

A curva da Fig. 10 foi obtida, a temperatura ambiente, com os terminais de dreno, fonte e porta feitos de titânio. A espessura é de 15 nm para o filme de SiO_2 de porta [12].

O dispositivo do esquema da Fig. 9, também pode ser chaveado, usando a bolacha de silício, como porta inferior. Quando se compara os resultados obtidos com o chaveamento de porta superior com o de porta inferior, obtêm-se uma melhor realização com o dispositivo chaveado com porta superior [12].

C. Diodos emissores de luz com NTC

Outra aplicação que está sendo bastante difundida dos NTC são nos chamados dispositivos opto-eletrônicos. Esse interesse crescente baseia-se no fato da possibilidade de se produzir tais dispositivos a um custo reduzido, com alta eficiência, baixo peso e alta flexibilidade, permitindo assim, a integração em circuitos multifuncionais [13].

Diodos emissores de luz, LED's, já foram desenvolvidos [14]. Entretanto esses diodos necessitam do uso de pelo menos, três terminais independentes. Isso aumenta o grau de

complexidade tanto de projeto, como de fabricação de tais dispositivos.

Diodos de junção $p-n$ de dois terminais são os dispositivos básicos nos projetos de sistemas opto-eletrônicos modernos. Esses dispositivos possuem vantagens como emissores de luz, pois são leves, baratos, fáceis de fabricar e principalmente, possui baixíssimo consumo de energia [13].

A Fig. 11 mostra a estrutura básica de um LED baseado em NTC, assimétrico. Esse diodo é composto basicamente por um CNT de comprimento de cerca de $1\text{ }\mu\text{m}$, que faz o papel de canal. Esse CNT é não dopado. Um dos terminais é feito de escândio, Sc , e o outro de paládio, Pd . Entre o NTC e o substrato de silício, que neste caso está fortemente dopado, existe uma camada dielétrica de SiO_2 . Uma fina camada de filme poly (methyl methacrylate), PMMA, cobre todo o dispositivo para assegurar um longo tempo de estabilidade [13].

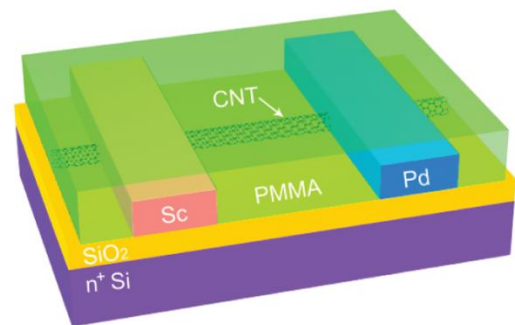


Fig. 11. Estrutura básica de LED baseado em NTC de dois terminais [13].

O escândio forma um contato ôhmico perfeito com a banda de condução, enquanto que o paládio com a banda de valência do NTC [13]. Os contatos assimétricos em contato com o NTC apresenta um comportamento idêntico ao de uma junção $p-n$ dopada. A Fig. 12 apresenta o resultado de medidas realizadas de corrente-tensão efetuada entre os terminais do LED da Fig. 11, com o terminal feito de escândio aterrado, observando-se claramente o comportamento de retificação de um diodo destacando os trechos A e B, da curva, que são as regiões de em que o diodo está diretamente e inversamente polarizado, respectivamente.

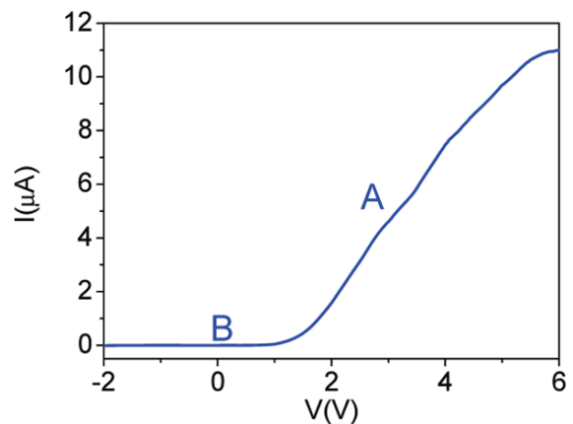


Fig. 12. Curva característica experimental corrente-tensão de um LED baseado em NTC de dois terminais [13].

Na Fig. 13 tem-se esquematicamente o que ocorre quando o LED está na região A ou B da Fig. 12.

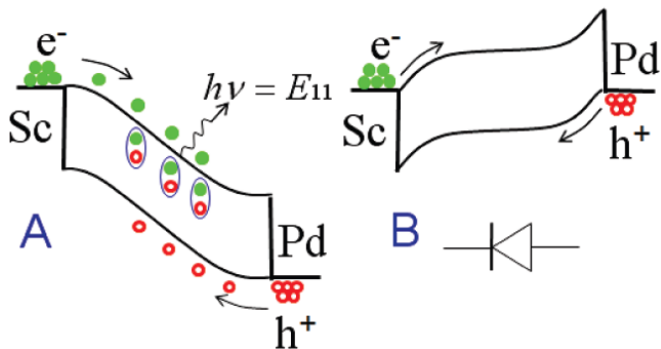


Fig. 13. Diagramas de energia nas regiões A e B de um LED baseado em NTC de dois terminais [13].

Na região A da Fig. 12, o LED está polarizado diretamente. Elétrons oriundos do terminal feito de escândio vencem facilmente a barreira de potencial, sendo injetados facilmente na banda de condução. Da mesma forma buracos que estão no terminal de paládio também são injetados na banda de valência. Quando ocorre a combinação radioativamente dos elétrons e buracos injetados no NTC, ocorre a emissão de fótons [13], conforme mostra a Fig. 13a.

Na região B da Fig. 12, o LED está na região de polarização reversa e tanto os elétrons do terminal de escândio como os buracos pertencentes ao terminal de paládio, estão sujeitos a uma grande barreira de potencial, da ordem do *gap* de energia do NTC, não ocorrendo nenhuma injeção de elétrons e buracos [13], conforme representação esquemática da Fig. 13 b.

A Fig. 14 mostra distribuição de emissão da energia dos fótons ou eletroluminescência, EL. Essa figura mostra claramente um pico de emissão em $0,925 \text{ eV}$, para região de polarização direta e corrente no diodo de $7,5 \mu\text{A}$ [13]. Observa-se também um pico secundário, em L, que pode ser atribuído a defeitos no NTC ou ao aprisionamento de cargas perto a superfícies dielétricas [13].

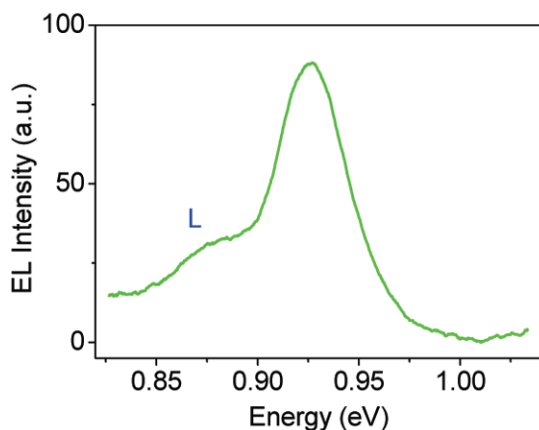


Fig. 14. Eletroluminescência do diodo operando na região de polarização direta e alta corrente $I = 7,5 \mu\text{A}$ [13].

A Fig. 15 mostra que a EL é dependente da corrente bem como a eficiência de emissão varia de dispositivo para dispositivo, conforme Fig. 16 [13].

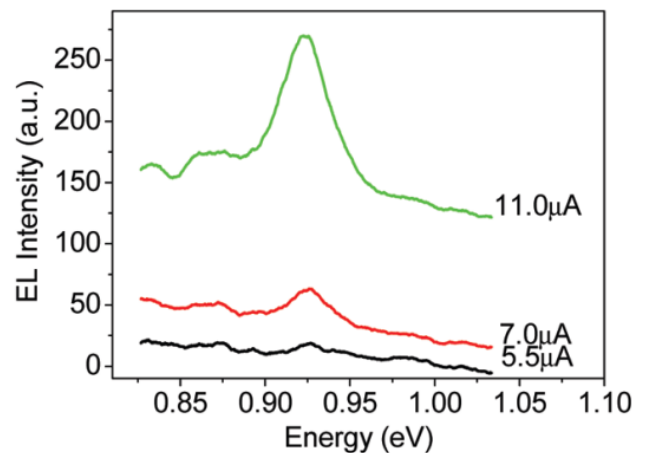


Fig. 15. Eletroluminescência de um diodo para correntes entre $5,5 \mu\text{A}$ e $11 \mu\text{A}$ [13].

Observa-se a ocorrência do pico principal, em torno de $0,925 \text{ eV}$, bem como a presença do pico secundário, em todas as curvas.

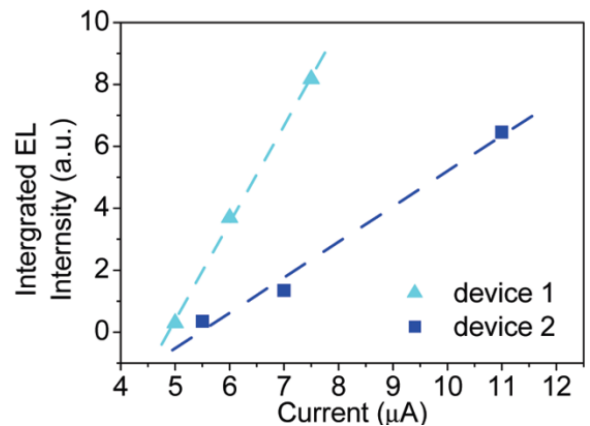


Fig. 16. Eletroluminescência para dois diodos diferentes [13].

A diferença observada entre as curvas para os dois diodos, pode ser explicada devido a maior eficiência de recombinação de forma radioativa, entre os portadores. Dessa forma, a recombinação de elétrons e buracos para o primeiro LED é bem maior que para o outro LED.

III. CONCLUSÃO

Analisando a literatura disponível, este trabalho mostra que os dispositivos que utilizam os NTC's substituem perfeitamente os mesmos dispositivos que empregam o silício ou o germânio como elementos semicondutores.

A utilização dos NTC's na construção de diodos e transistores de efeito de campo permitem aplicações em frequências bastante elevadas tornando possível o uso desses dispositivos como detectores, misturadores, multiplicadores de frequência dentre outras aplicações.

O uso do NTC no projeto de diodos emissores de luz apresenta-se bastante promissor, devido seu tamanho reduzido, baixo peso e principalmente o baixo consumo de energia.

Devido ao seu tamanho reduzido, grande variedade nas propriedades elétricas, ópticas e magnéticas, resistência mecânica e estabilidade química, os NTC's são uns dos mais promissores nano materiais para uso na nano eletrônica.

Entretanto, para que dispositivos com NTC passem a ser fabricados em escala comercial ainda existem alguns desafios a serem vencidos, tais como, o perfeito controle das propriedades físicas e eletrônicas no processo de crescimento dos NTC's, a fabricação de dispositivos FET com NTC ainda é complicado e demanda bastante tempo e adicionalmente, a corrente máxima do FET no estado ligado é da ordem de alguns μA [15], o que é muito baixo.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, v. 354, p. 56, 1991.
- [2] M. Dragoman, D. Dragoman, "Nanoelectronics Principles and Devices", Artech House, Boston/London, 2006.
- [3] Z. Yao, H. W. Ch. Postma, L. Balents e C. Dekker, "Carbon nanotube intramolecular junctions" *Nature*, v. 402, 1999.
- [4] P. N. D'yachkov, "Carbon Nanotubes: Structure, Properties and Applications", Moscow BINOM, 2006.
- [5] P. H. Siegel, *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 50, 910-928, 2002.
- [6] H. M. Manohara, E. W. Wong, E. Schlecht, B. D. Hunt e P. H. Siegel, "Carbon nanotube Schottky diodes using Ti-Schottky and Pt-Ohmic contacts for high frequency applications", *Nano Letters*, Vol. 5, No. 7, 1469-1474, 2005.
- [7] L. Huang, E. F. Chor, Y. Wu e Z. Guo, "Fabrication of single-walled carbon nanotube Schottky diode with gold contacts modified by asymmetric thiolate molecules" *Carbon*, Vol. 48, 1298-1304, 2010.
- [8] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, Ph. Avouris, eds, *Carbon Nanotubes*, Springer, Berlin, 2001.
- [9] P. G. Collins, M. S. Arnold, P. Avouris, "Engineering carbon nanotubes and nanotube circuits using electrical breakdown", *Science*, v. 292, 706-709, 2001.
- [10] M. H. Yang, K. B. K. Teo, W. I. Milne e D. G. Hasko, "Carbon nanotube Schottky diode and directionally dependent field-effect transistor using asymmetrical contacts", *Appl. Phys. Lett.* 87, 253116, 2005.
- [11] R. Martel, V. Derycke, C. Lavoie, J. Appenzeller, K. K. Chan et al, "Ambipolar electrical transport in semiconducting single-wall carbon nanotubes", *Phys. Rev. Lett.* 87, 25, 2001.
- [12] Ph. Avouris, "Molecular electronics with carbon nanotubes", *Acc. Chem. Res.*, v. 35, n°. 12, 2002.
- [13] S. Wang, Q. Zeng, L. Yang, Z. Zhang, Z. Wang et al, "High-performance carbon nanotube light-emitting diodes with asymmetric contacts", *Nano Letters*, Vol. 11, 23-29, 2011.
- [14] J. A. Misewich, R. Martel, Ph. Avouris, J. C. Tsang, S. Heinze et al, "Electrically induced optical emission from a carbon nanotube FET", *Science*, Vol. 300, 2003.
- [15] S. Aikawa, R. Xiang, E. Einarsson, S. Chiashi, J. Shiomi et al, "Facile fabrication of all-swnnt field-effect transistors", *Nano Res.*, v. 4, n°. 6, 580-588, 2011.