

“O carbono poderá ser o material de base dominante no futuro da microeletrônica. Isto será devido aos nanodispositivos para eletrônica, aos componentes de alto desempenho em comunicação e aos microssistemas. O primeiro campo de aplicação exige novos materiais e dispositivos com novas concepções. O segundo campo que será a ponte entre a atual microeletrônica e este novo material é baseada no desenvolvimento de dispositivos para comunicação (altas potência, alta frequência e alta temperatura). O último campo permitirá o desenvolvimento de dispositivos biocompatíveis e também inertes para eletroquímica.”

Tradução livre do prefácio da publicação “Carbon material for active electronics”, Republicação do Diamond and Related Materials vol. 13 – 2004.

European Materials Research Society (EMRS).

“O carbono poderá ser o material de base dominante no futuro da microeletrônica. Isto será devido aos nanodispositivos para eletrônica, aos componentes de alto desempenho em comunicação e aos microssistemas. O primeiro campo de aplicação exige novos materiais e dispositivos com novas concepções. O segundo campo que será a ponte entre a atual microeletrônica e este novo material é baseada no desenvolvimento de dispositivos para comunicação (altas potência, alta frequência e alta temperatura). O último campo permitirá o desenvolvimento de dispositivos biocompatíveis e também inertes para eletroquímica.”

Tradução livre do prefácio da publicação “Carbon material for active electronics”, Republicação do Diamond and Related Materials vol. 13 – 2004.

European Materials Research Society (EMRS).

“O carbono poderá ser o material de base dominante no futuro da microeletrônica. Isto será devido aos **nanodispositivos para eletrônica**, aos componentes de alto desempenho em comunicação e aos microssistemas. **O primeiro campo de aplicação exige novos materiais e dispositivos com novas concepções.** O segundo campo que será a ponte entre a atual microeletrônica e este novo material é baseada no desenvolvimento de dispositivos para comunicação (altas potência, alta frequência e alta temperatura). O último campo permitirá o desenvolvimento de dispositivos biocompatíveis e também inertes para eletroquímica.”

Tradução livre do prefácio da publicação “Carbon material for active electronics”, Republicação do Diamond and Related Materials vol. 13 – 2004.

European Materials Research Society (EMRS).

“O carbono poderá ser o material de base dominante no futuro da microeletrônica. Isto será devido aos nanodispositivos para eletrônica, aos componentes de alto desempenho em comunicação e aos microssistemas. O primeiro campo de aplicação exige novos materiais e dispositivos com novas concepções. O segundo campo que será a ponte entre a atual microeletrônica e este novo material é baseada no desenvolvimento de dispositivos para comunicação (altas potência, alta frequência e alta temperatura). O último campo permitirá o desenvolvimento de dispositivos biocompatíveis e também inertes para eletroquímica.”

Tradução livre do prefácio da publicação “Carbon material for active electronics”, Republicação do Diamond and Related Materials vol. 13 – 2004.

European Materials Research Society (EMRS).

“O carbono poderá ser o material de base dominante no futuro da microeletrônica. Isto será devido aos nanodispositivos para eletrônica, aos componentes de alto desempenho em comunicação e aos **microssistemas**. O primeiro campo de aplicação exige novos materiais e dispositivos com novas concepções. O segundo campo que será a ponte entre a atual microeletrônica e este novo material é baseada no desenvolvimento de dispositivos para comunicação (altas potência, alta frequência e alta temperatura). O último campo permitirá o desenvolvimento de **dispositivos biocompatíveis** e também **inertes para eletroquímica**.”

Tradução livre do prefácio da publicação “Carbon material for active electronics”, Republicação do Diamond and Related Materials vol. 13 – 2004.

European Materials Research Society (EMRS).

Introdução

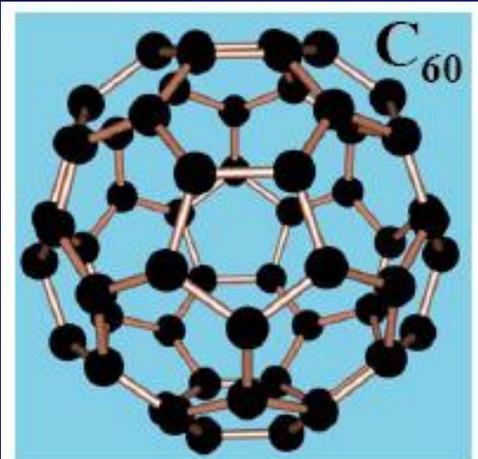
Carbono

- Não metálico.
- Não magnético.
- Dois isótopos estáveis (C_{12} e C_{13}) quatro radioativos (C_{10} , C_{11} , C_{14} , C_{15}).
- Grande reatividade.
- Quatro elétrons na camada de valência.
- Forma diversas cadeias, longas ou curtas.
- Possui diversas formas alotrópicas.

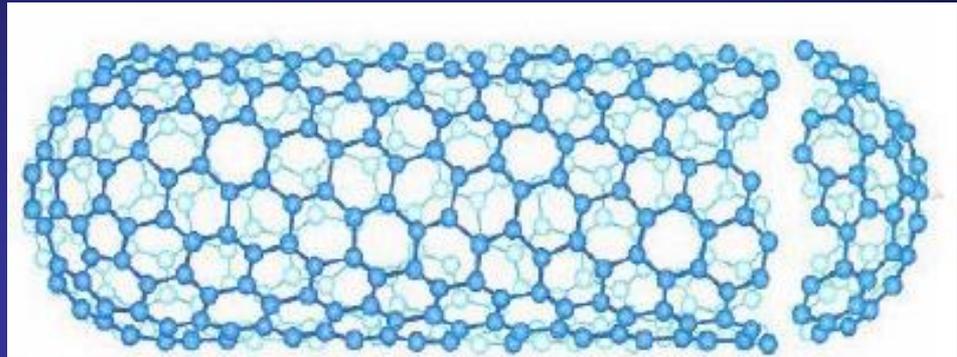
Carbono

- Sete formas alotrópicas cristalinas: grafite (alfa e beta), diamante, diamante hexagonal (Lonsdaleíta - que é uma forma detectada em meteoritos), caoíta, carbono (VI) e os fulerenos.
- Sete formas alotrópicas amorfas: DLC, Wiskers de grafite, fibras de carbono, negro de fumo, carbonita, carbono vítreo, carbono amorfo, carbono poroso.

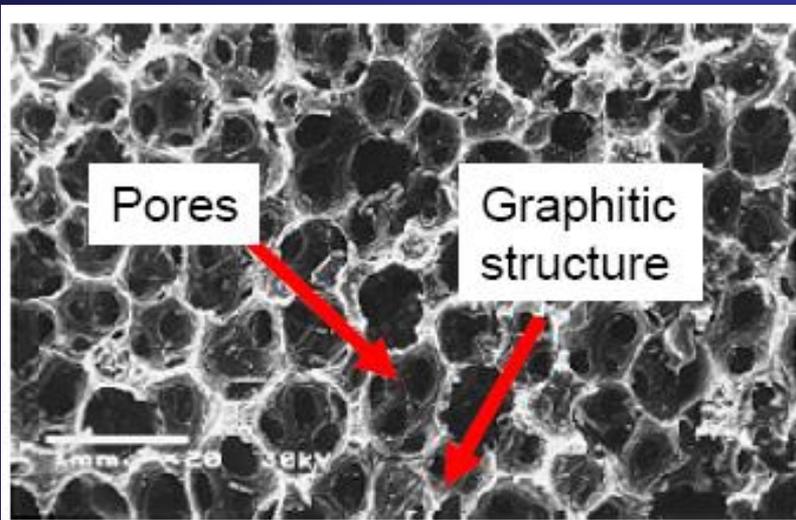
Novas formas do Carbono



Fulerenos, 1985



Nanotubos de Carbono, 1991

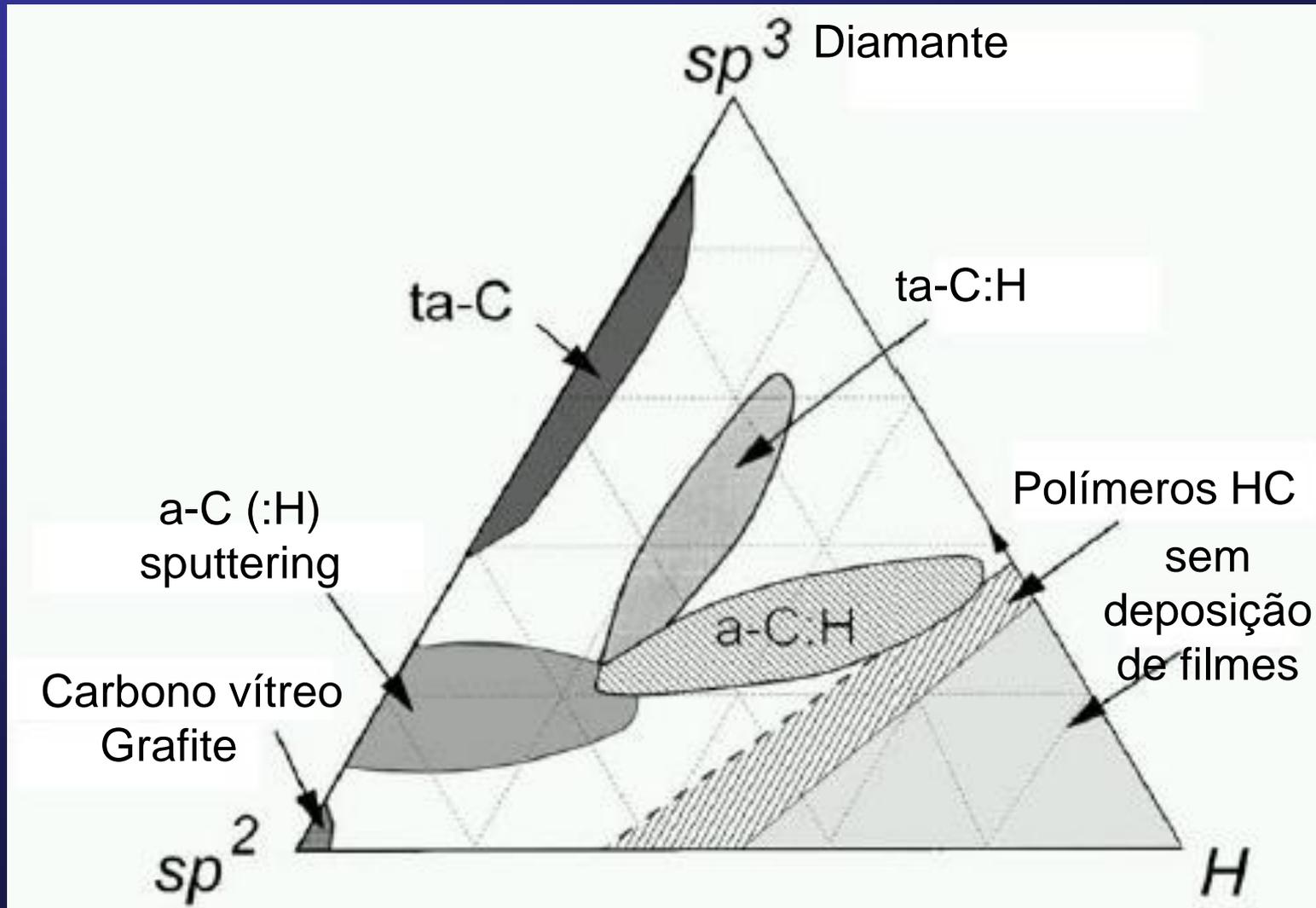


“Espuma de carbono” 2002

Estruturas do Carbono

Dimensão	0-D	1-D	2-D	3-D
Isômero	C ₆₀ Fulerenos	Nanotubo Carbina	Grafite Fibra	Diamante C-amorfo
Hibridização	sp ²	sp ² (sp)	sp ²	sp ³
Densidade (g/cm ³)	1,72	1,2-2,0 2,68-3.13	2,26 ~ 2	3.52 2-3
Comprimento da ligação (Å)	1.40 (C=C) 1.46 (C-C)	1.44 (C=C)	1.42 (C=C) 1.44 (C=C)	1.54 (C-C)
Propriedades eletrônicas	Semicondutor E _{gap} =1,9 eV	Metal ou semicondutor E _{gap} → variável	Semi-metal	Isolante E _{gap} =5,47 eV

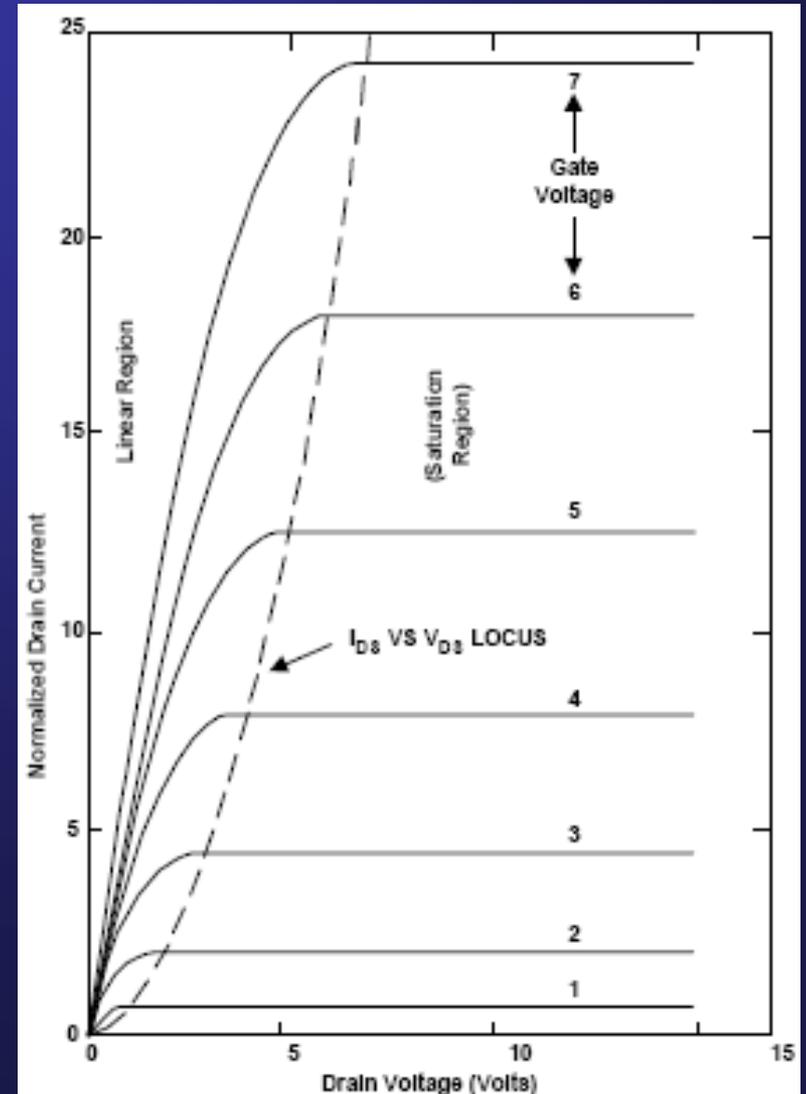
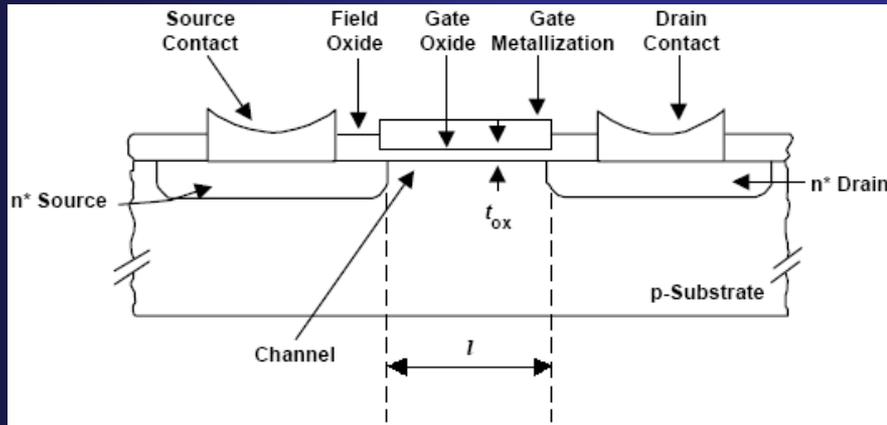
Diagrama de fases do Carbono



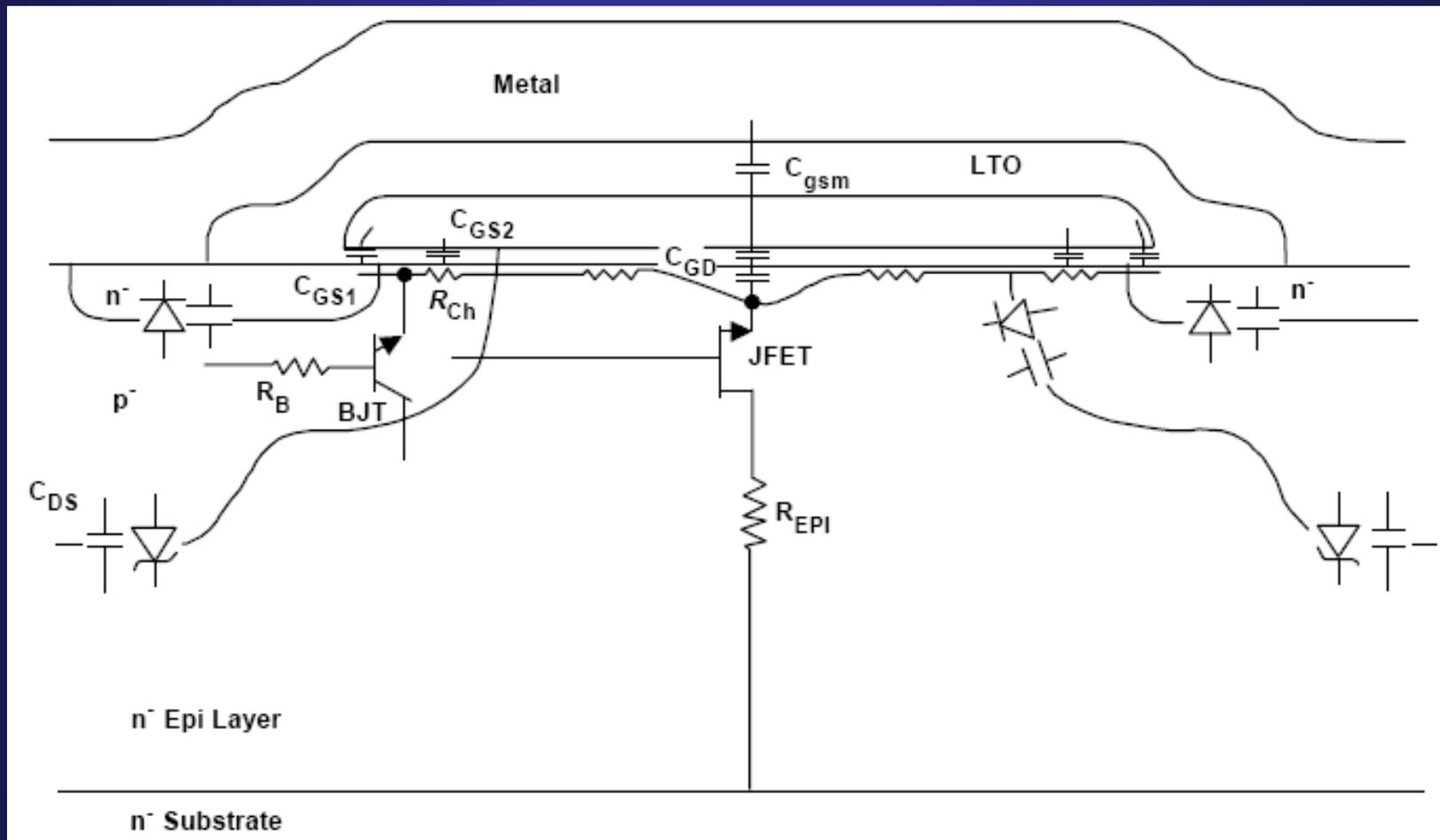
Microeletrônica

- Processo planar.
- Atualmente baseado em silício.
- Principal componente é o MOS-FET.
- Principal tecnologia CMOS.
- Principal dispositivo é o inversor CMOS.

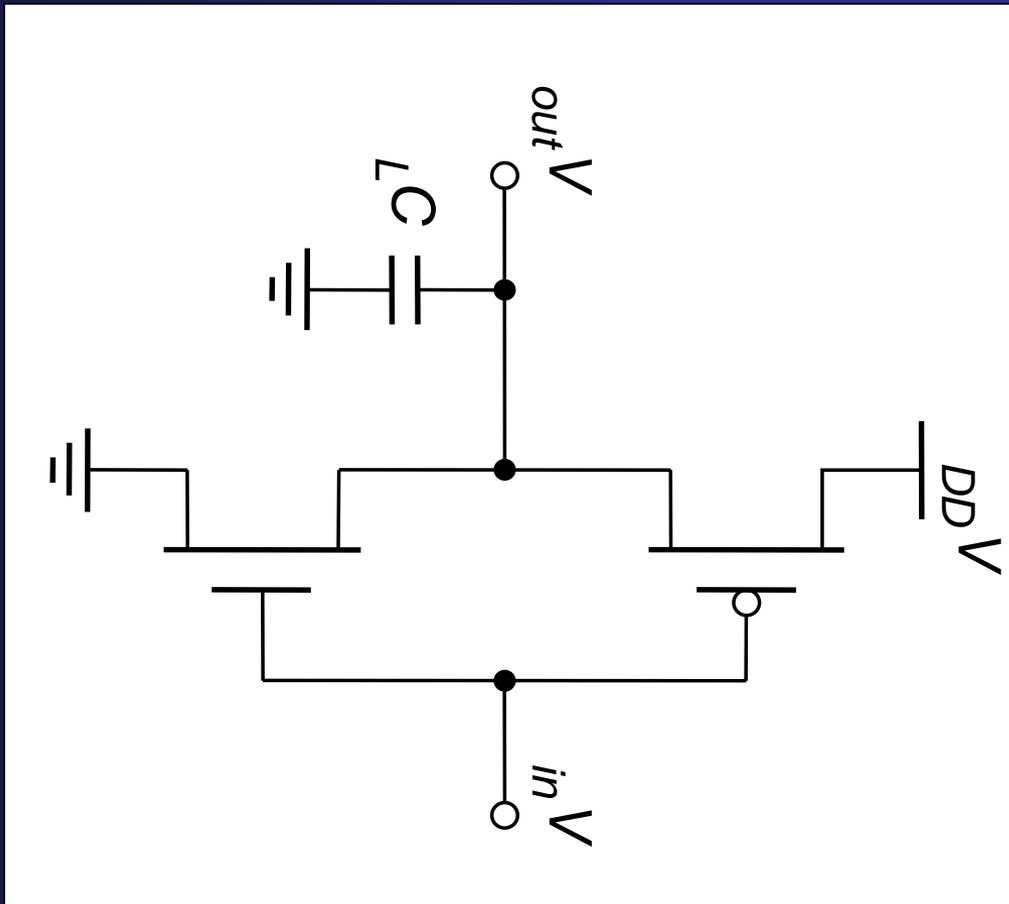
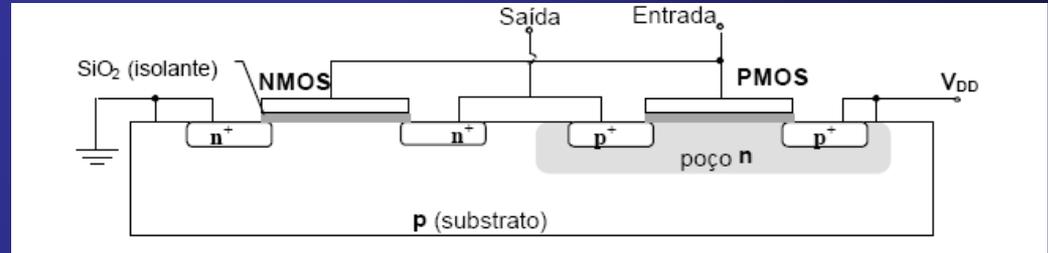
MOS - FET



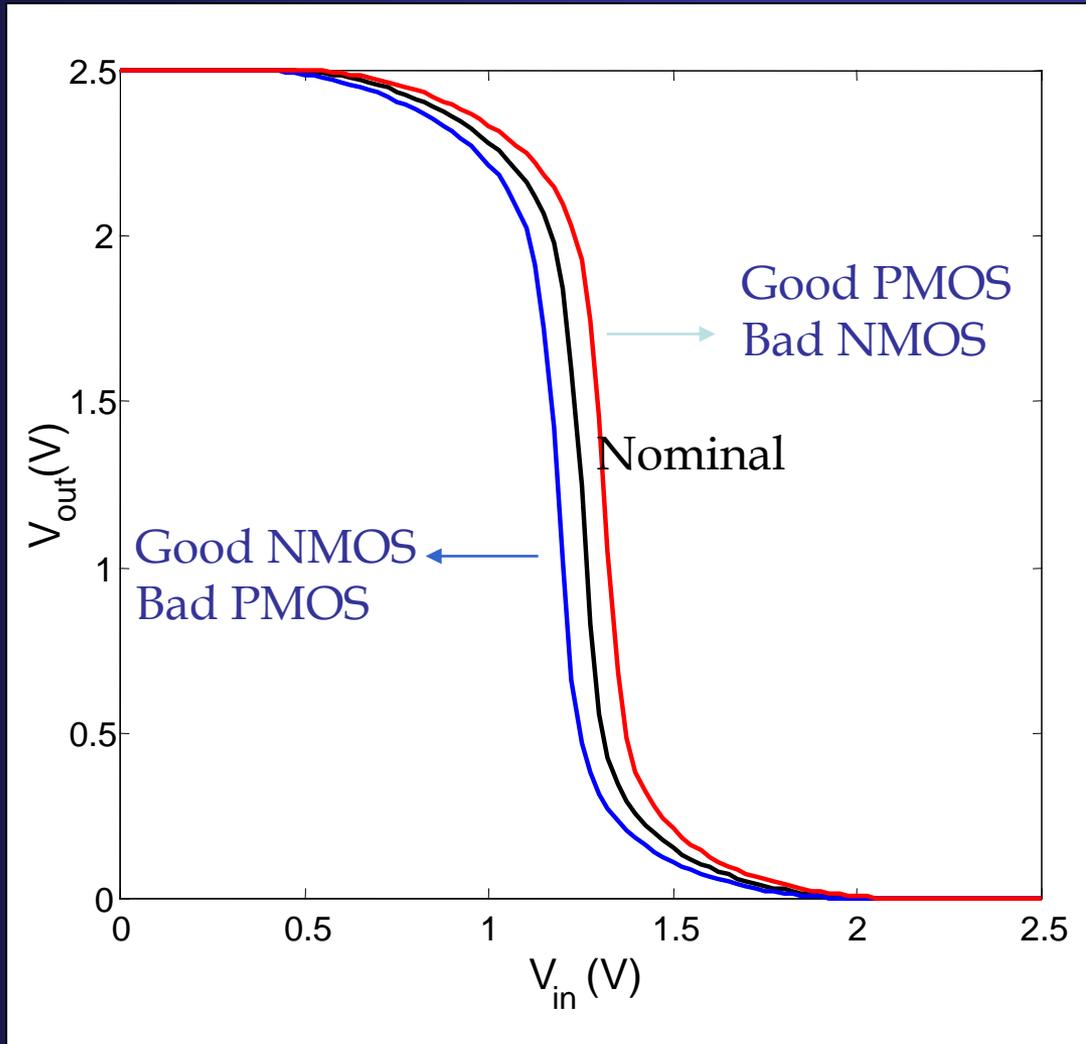
Características Parasitárias de um transistor MOS-FET



Inversor CMOS



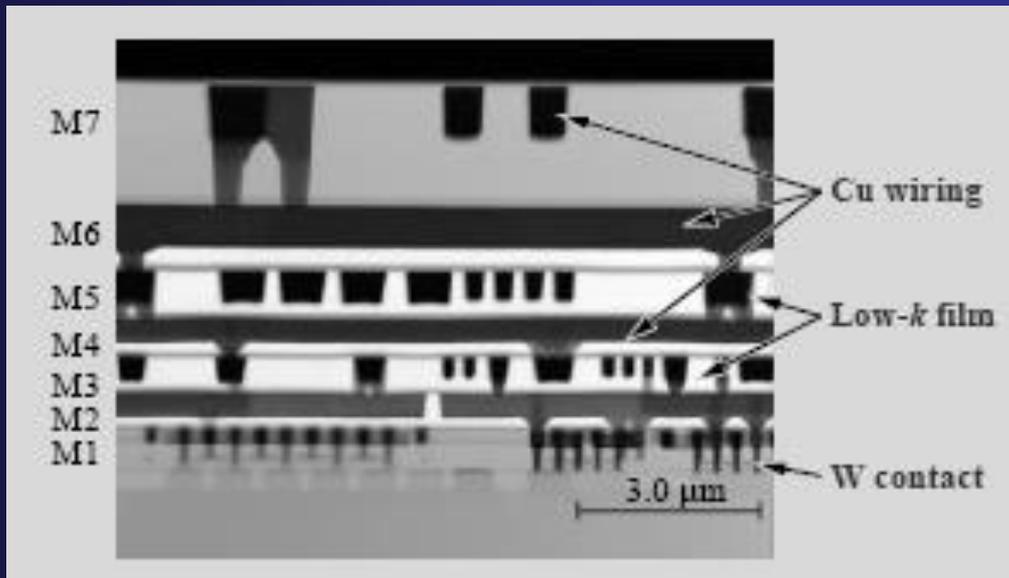
Principais necessidades para a evolução do Inversor CMOS



- Redução da capacitância parasitária.
- Redução da potência de chaveamento.
- Redução da tensão de chaveamento.

Circuitos CMOS

- Redução da capacitância entre níveis de conexão.



- Aumento da velocidade de chaveamento.

- Redução da potência dissipada.

- Melhor isolamento entre dispositivos.

**Eletrônica e
Microeletrônica
baseadas em Carbono**

Eletrônica e Microeletrônica baseadas em Carbono

**Eletrônica e Microeletrônica
baseadas em filmes de Diamante**

Filmes de Diamante

O uso de filmes finos de diamante tem sido de interesse nas últimas duas décadas devido a diversas características:

- Inerte quimicamente;
- Alta resistência mecânica;
- Alta condutividade térmica (21 W/cm.K), (Si – 1,5 W/cm.K);
- Possibilidade de deposição a partir de 450 °C;
- Alta dureza (100 GPa);
- Extremamente compatível com a tecnologia baseada em silício;
- Resistente a radiação eletromagnética;
- Resistente a temperaturas elevadas (> 4000 °C) em ambiente não oxidante.

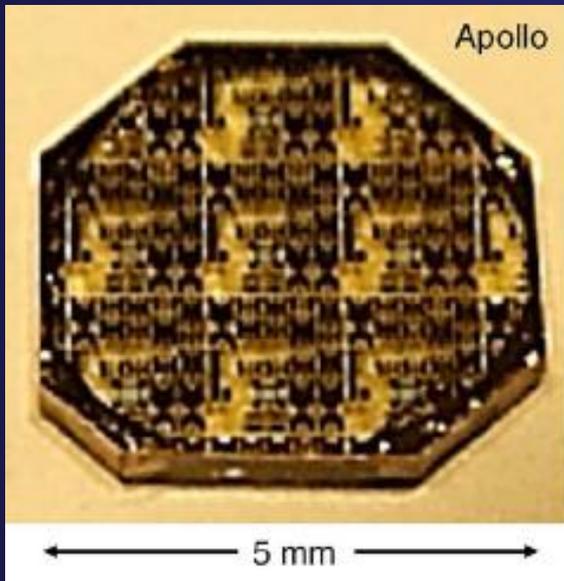
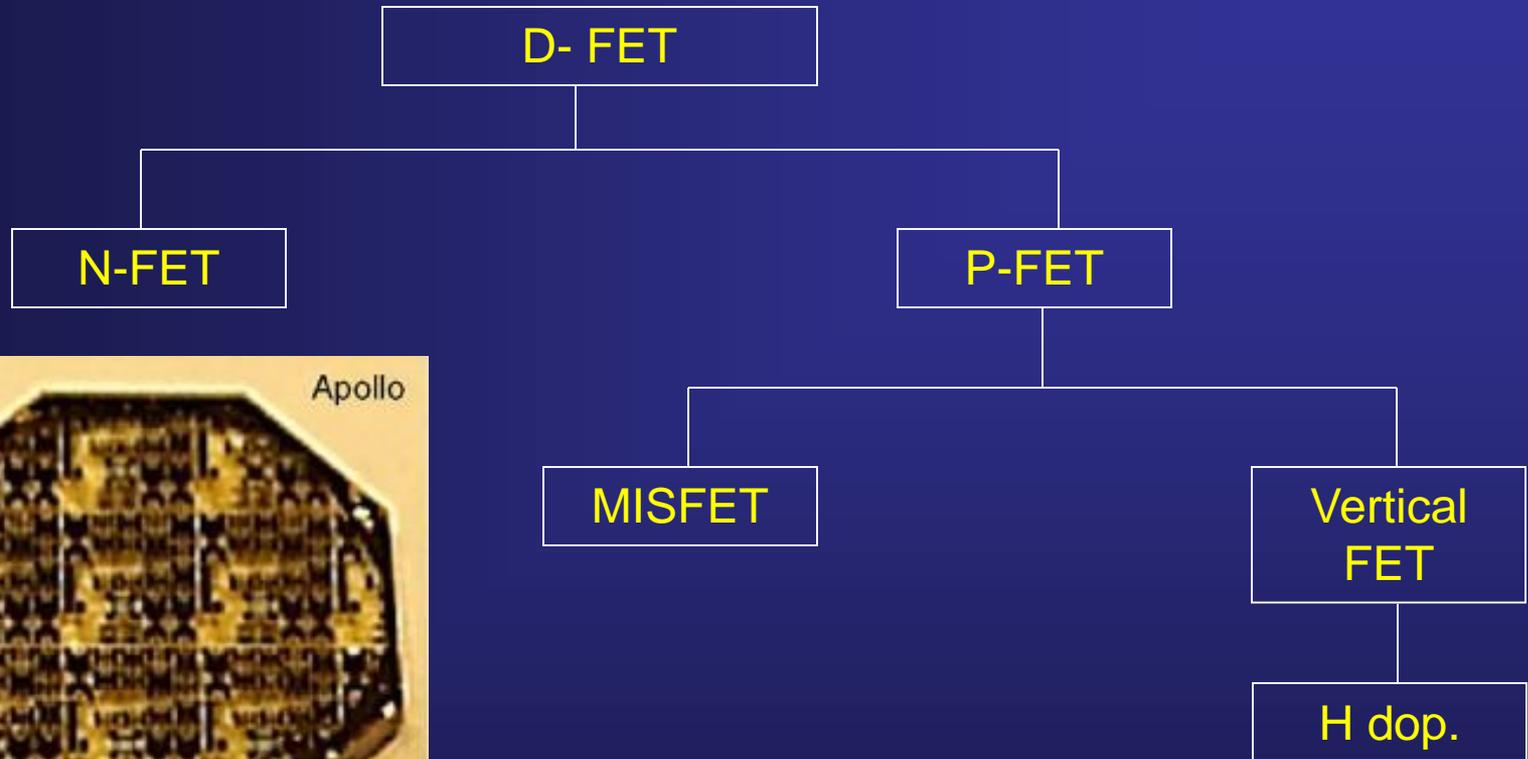
Aplicações dos filmes de Diamante

- Substrato para dispositivos híbridos;
- Janelas para *displays* em *flat panels*;
- Encapsulamento para eletrônica de alta potência e optoeletrônica;
- Isolação para circuitos de alta velocidade;
- Encapsulamento para lasers de estado sólido;
- Substrato para dispositivos de alta temperatura;
- Substratos inertes a radiação;
- Lâminas SOI (*Silicon On Insulator*);
- Eletrodos para emissores de campo;
- Material para transistores de efeito de campo (D-FET).

Propriedades elétricas dos filmes de Diamante

Propriedade	Diamante	Silício
Band Gap	5,45 eV	1,12 eV
Mobilidade eletrônica	2000 cm ² / Vs	1420 cm ² / Vs
Mobilidade de lacunas	1800 cm ² / Vs	470 cm ² / Vs
Tensão de ruptura dielétrica	10 ⁷ V/cm	10 ⁵ V/cm
Resistividade	10 ¹⁶ Ω.cm	3 x 10 ⁵ Ω.cm
Constante dielétrica	5,7	7,6
Energia para geração de pares	13 a 16 eV	3,6 eV

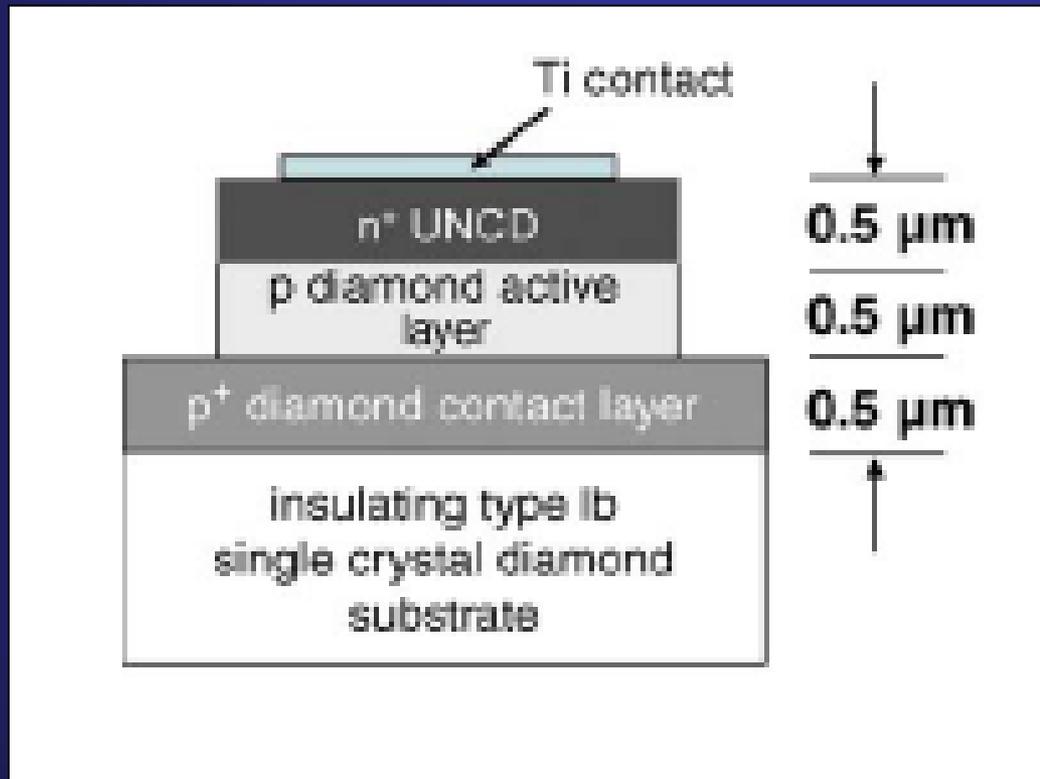
Tipos de dispositivos D-FET



CI-MOS fabricado em substrato de Diamante

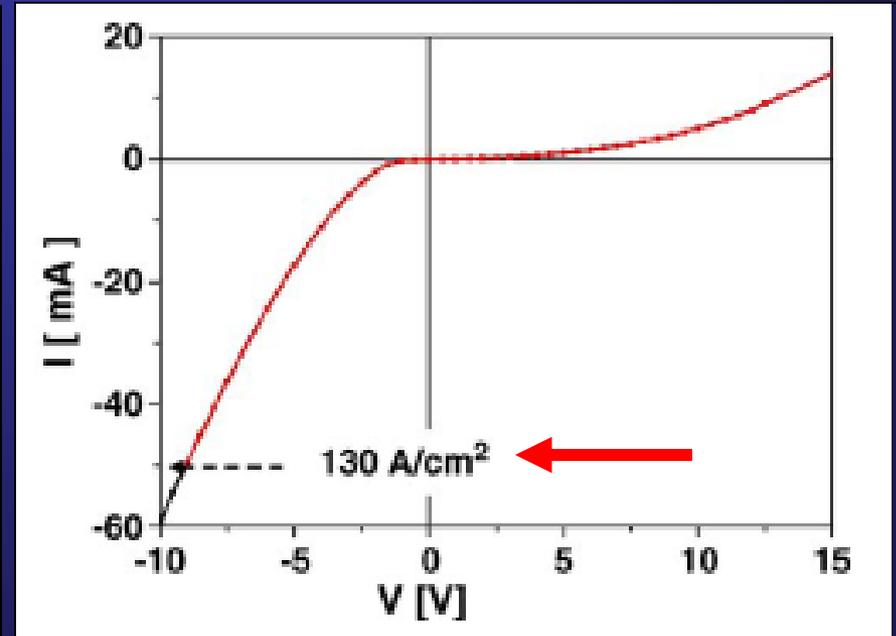
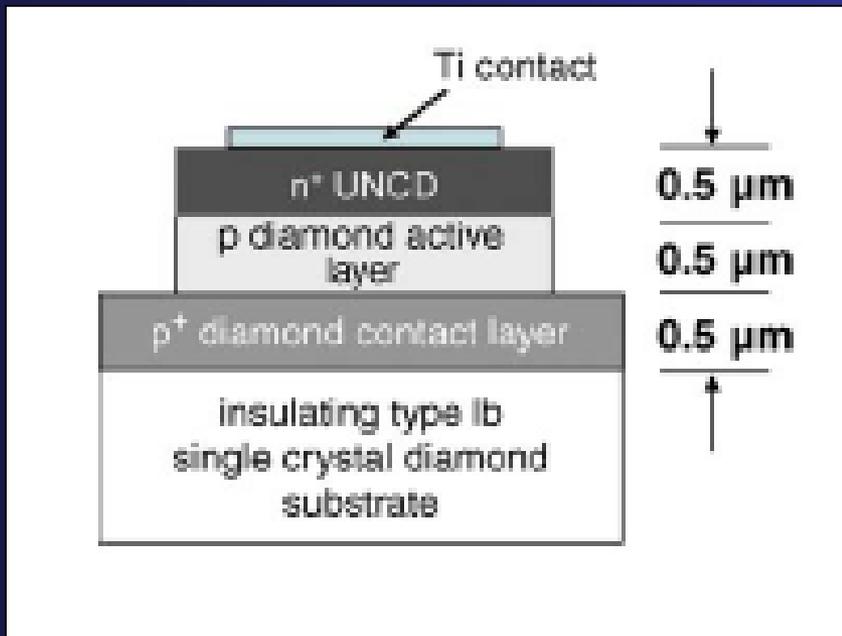
(Apollo Diamond Inc.USA)

Diodo baseado em Diamante



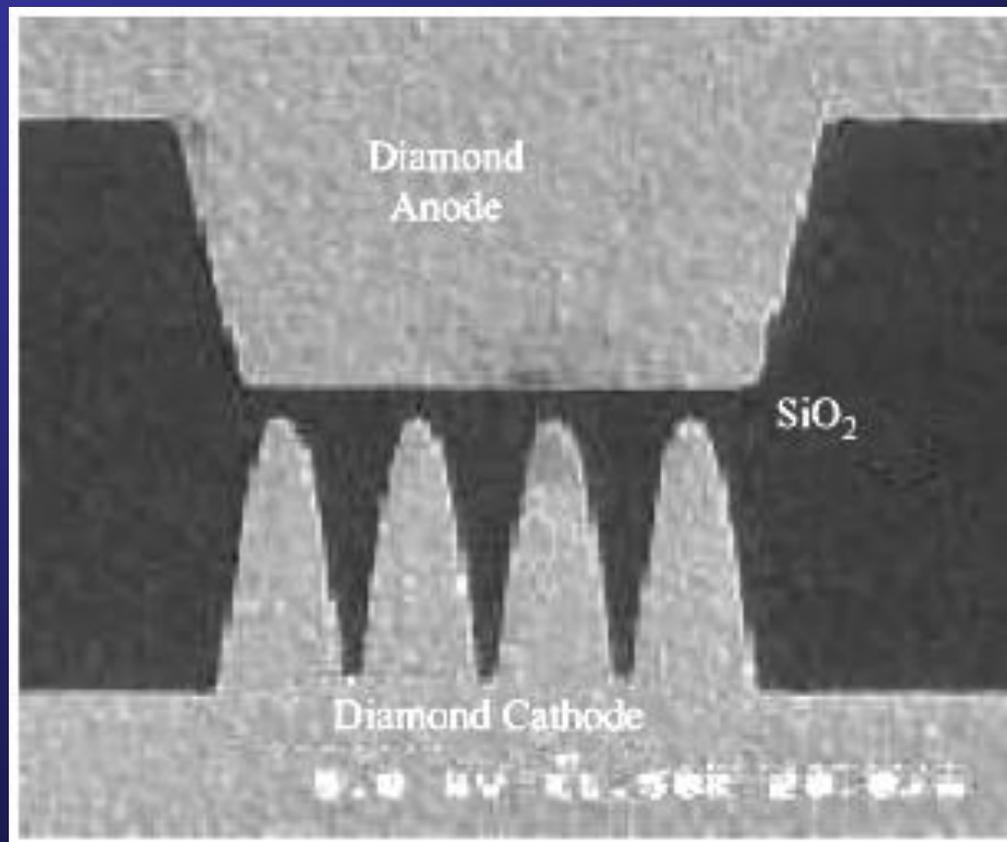
Kohn, E.; Denisenko, A.; "Concepts for diamond electronics", Thin Solid Films (2006).

Diode baseado em Diamante



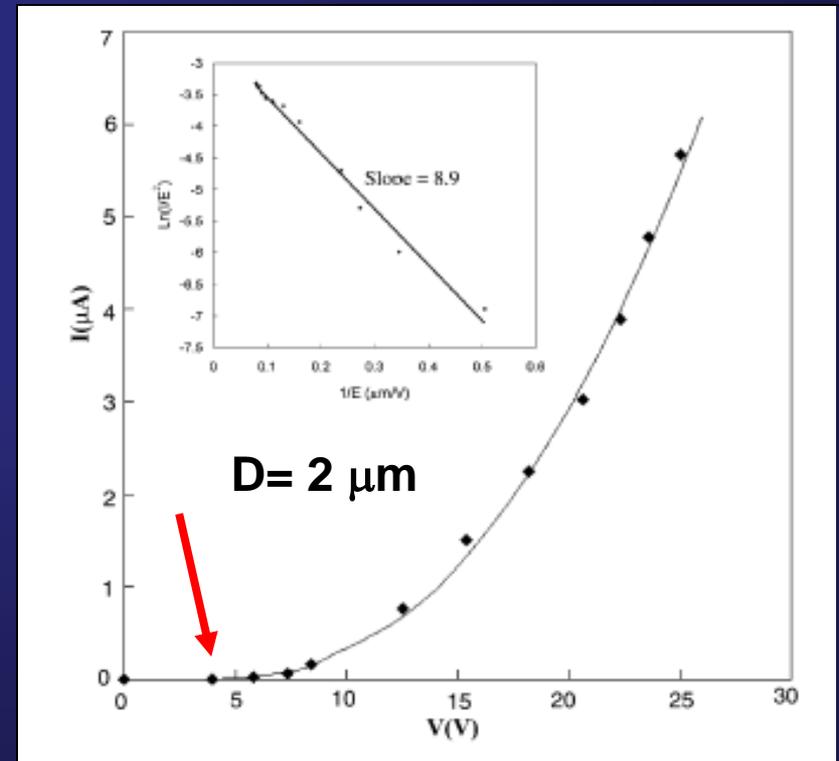
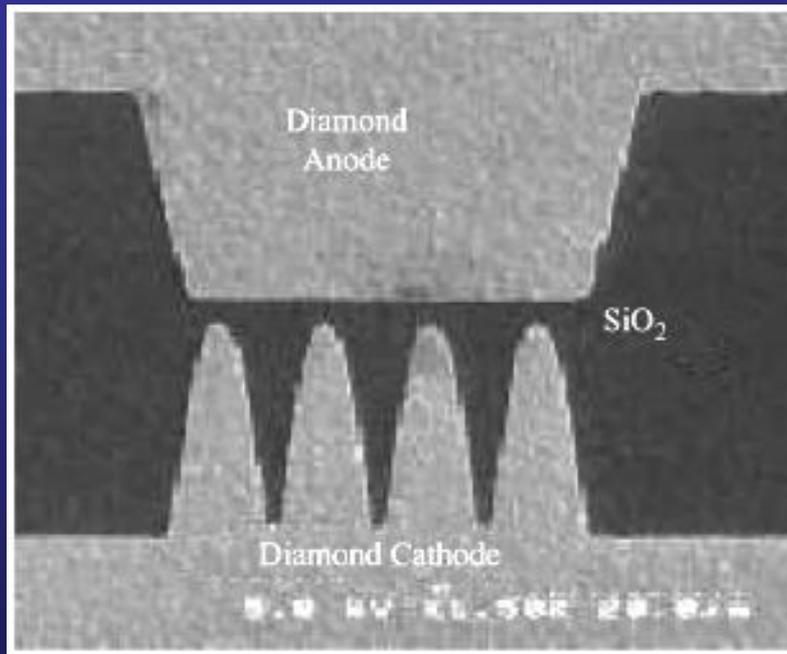
Kohn, E.; Denisenko, A.; "Concepts for diamond electronics", Thin Solid Films (2006).

Diodo de emissão lateral baseado em filmes de Diamante



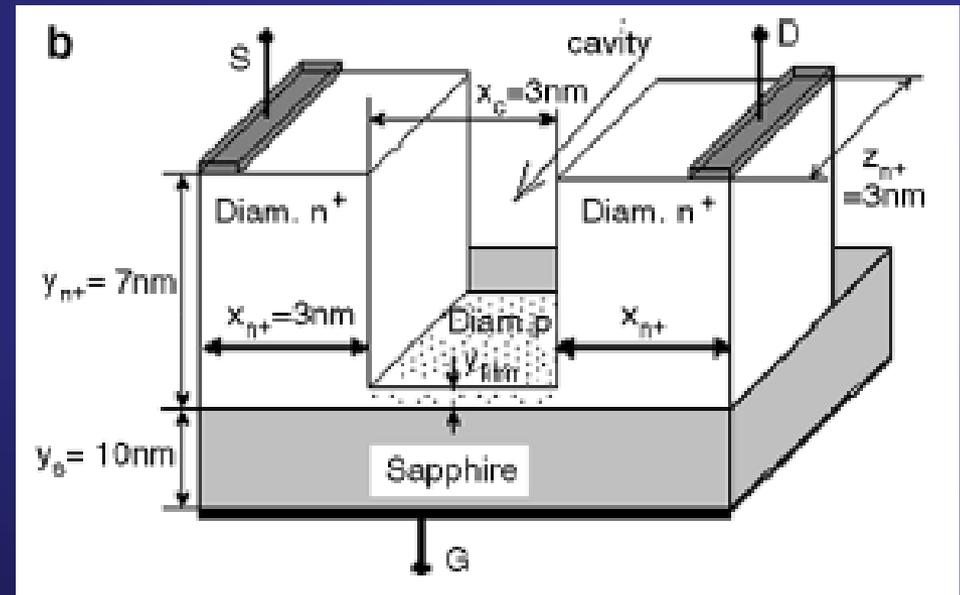
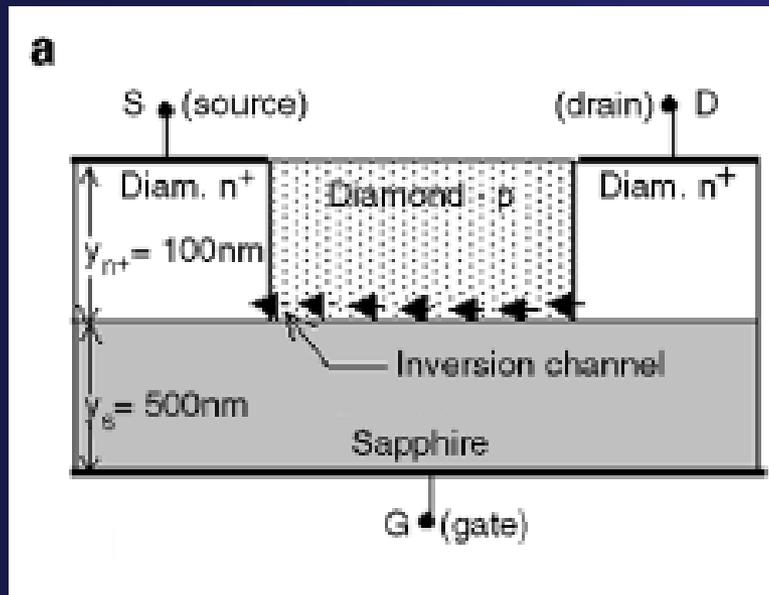
Kang, W. P.; Davidson, J. L.; Wong, Y. M.; Holms, K.; “Diamond vacuum field emission devices”, *Diamond and Related Materials*, v. 13, pp. 975-981, 2004.

Diodo de emissão lateral baseado em filmes de Diamante



Kang, W. P.; Davidson, J. L.; Wong, Y. M.; Holms, K.; "Diamond vacuum field emission devices", Diamond and Related Materials, v. 13, pp. 975-981, 2004.

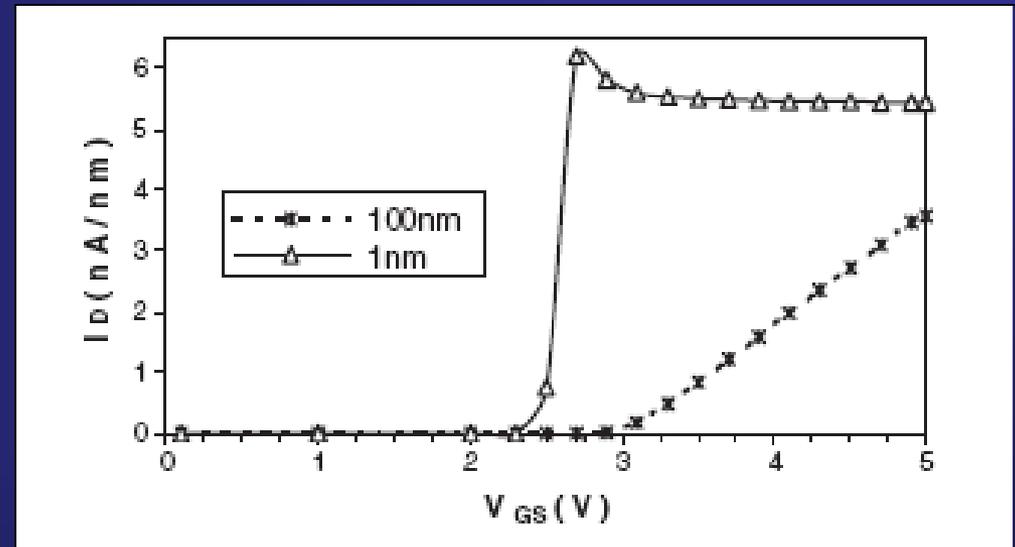
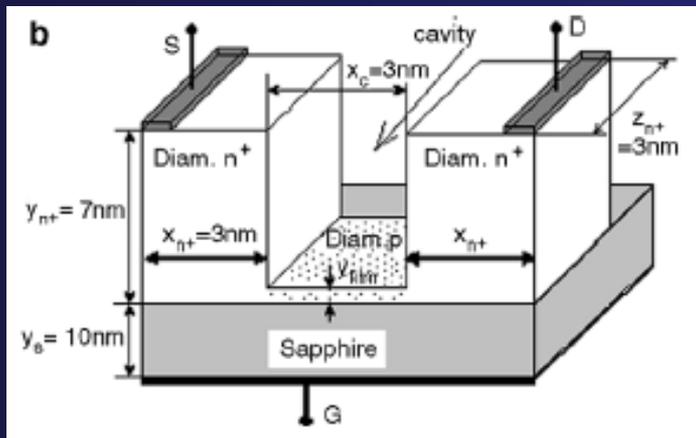
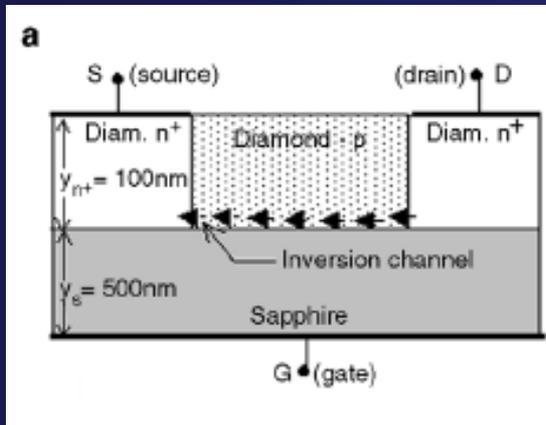
Nano-FET baseado em Diamante



Nano-FET com porta de
a) 100 nm e b) 1 nm.

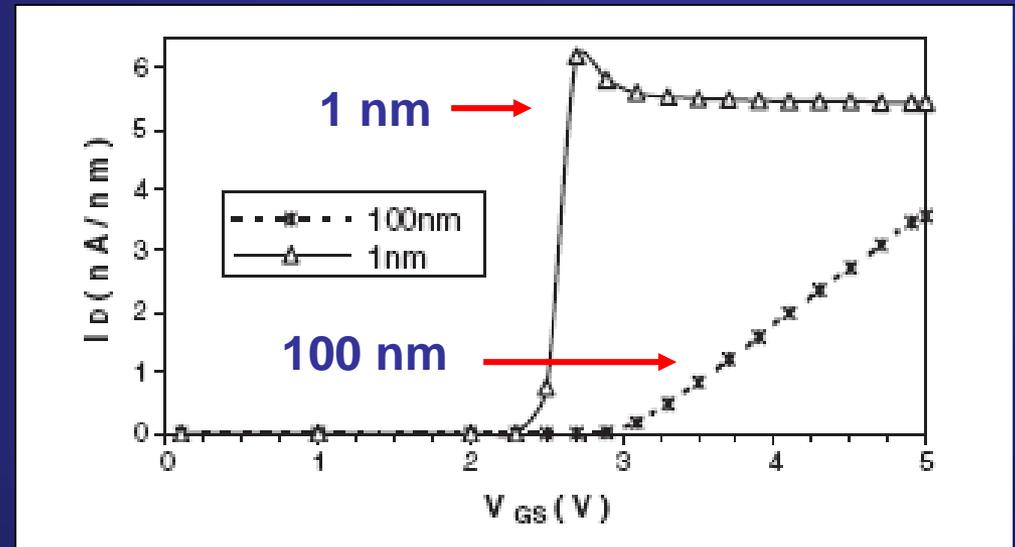
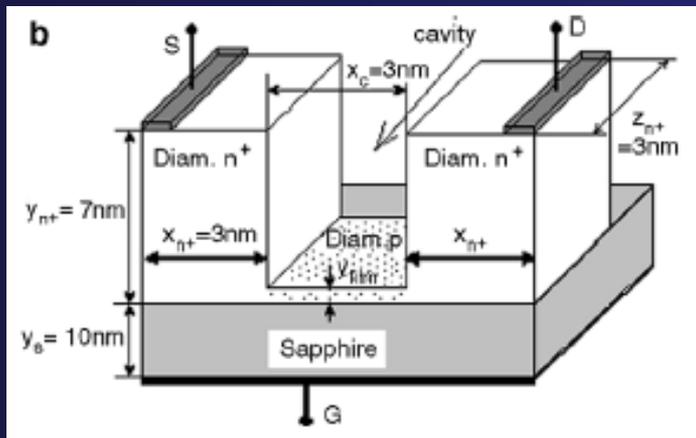
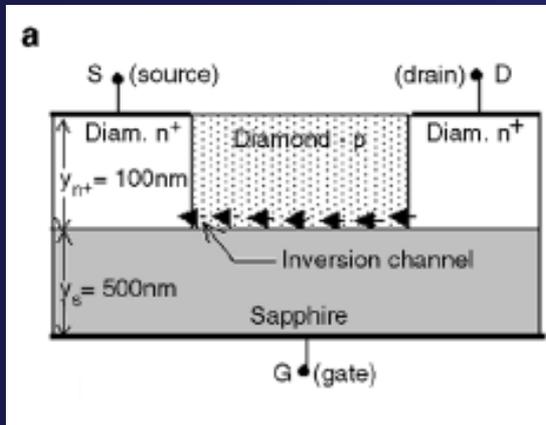
Raveriu, C.; Rusu, A.; Udrea, F.; Raveriu, F.; "Simulations results of same diamond on insulator nano-MISFETs"; Diamond and Related Materials, v. 15, pp. 777-782, 2006.

Nano-FET baseado em Diamante



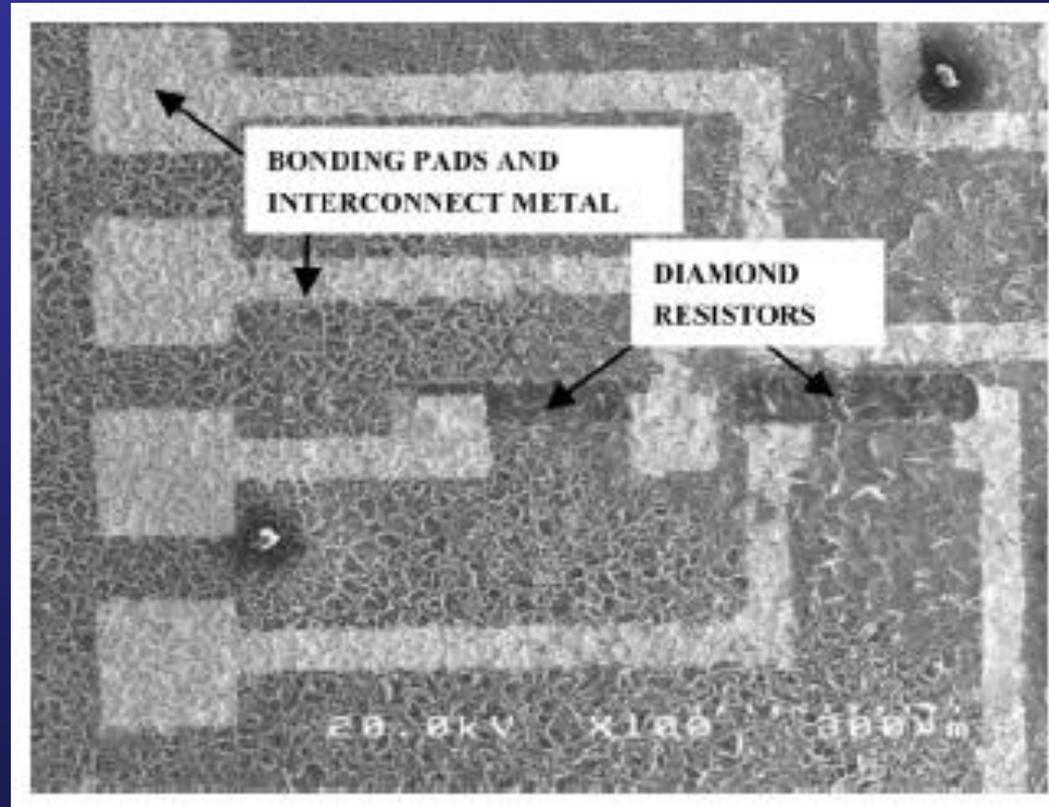
Raveriu, C.; Rusu, A.; Udrea, F.; Raveriu, F.; "Simulations results of same diamond on insulator nano-MISFETs"; Diamond and Related Materials, v. 15, pp. 777-782, 2006.

Nano-FET baseado em Diamante



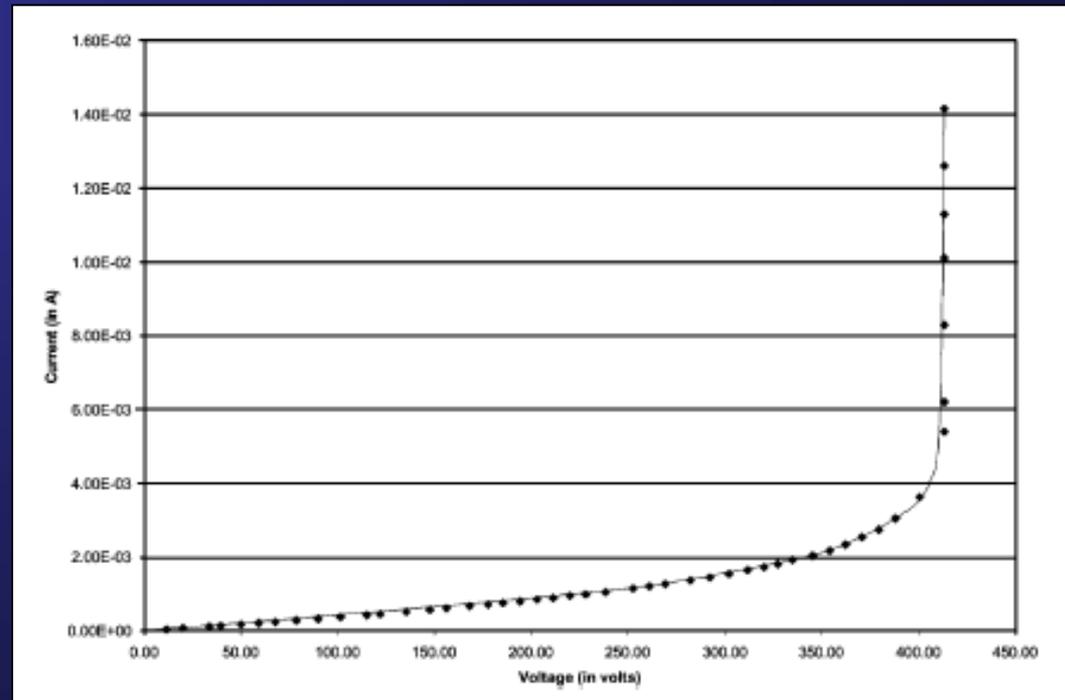
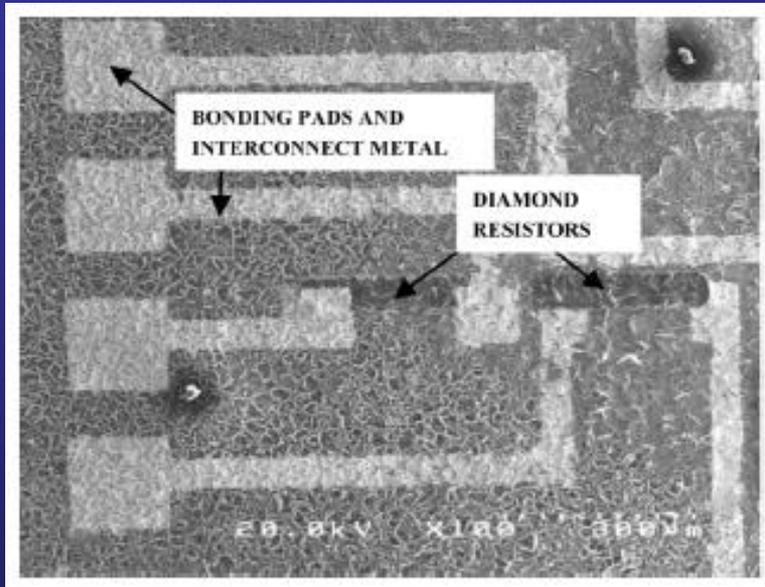
Raveriu, C.; Rusu, A.; Udrea, F.; Raveriu, F.; "Simulations results of same diamond on insulator nano-MISFETs"; Diamond and Related Materials, v. 15, pp. 777-782, 2006.

Resistores baseados em Diamante



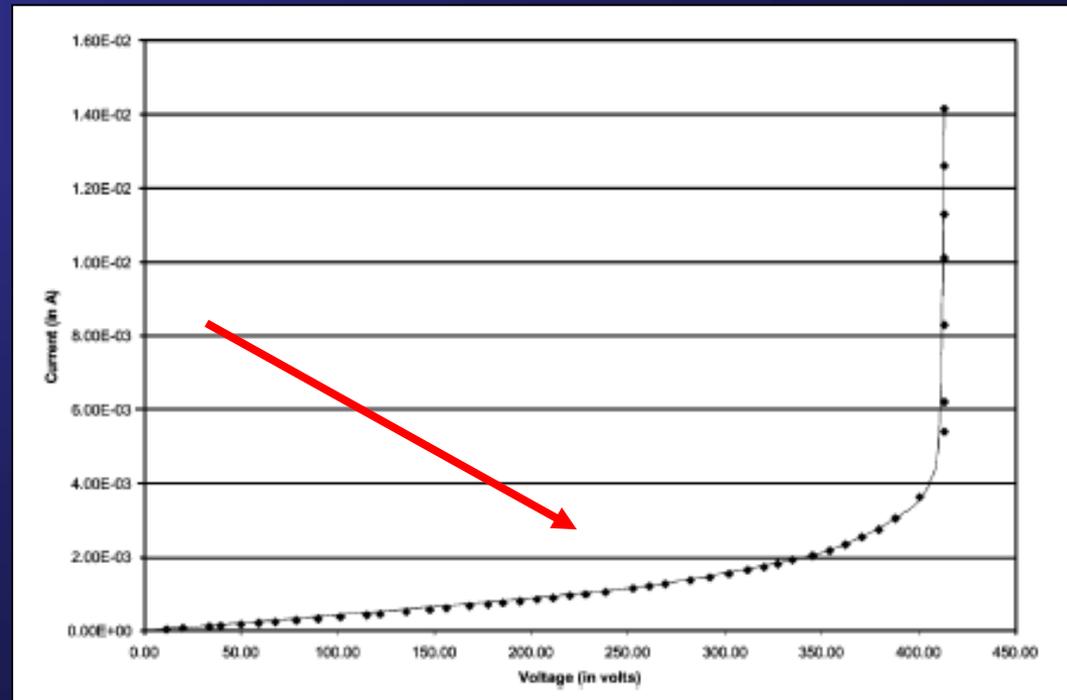
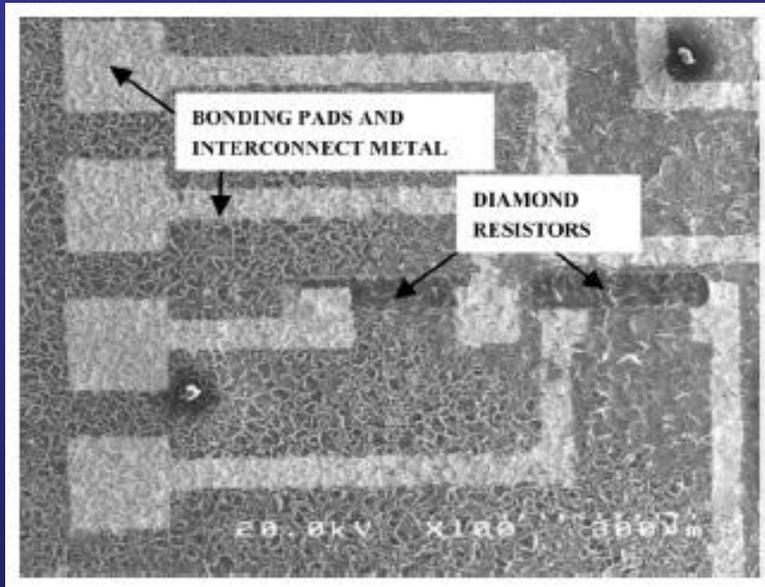
Davidson, J. et al.; “CVD diamond for components and emitters”, Diamond and Related Materials, v. 10, pp. 1736-1741, 2001.

Resistores baseados em Diamante



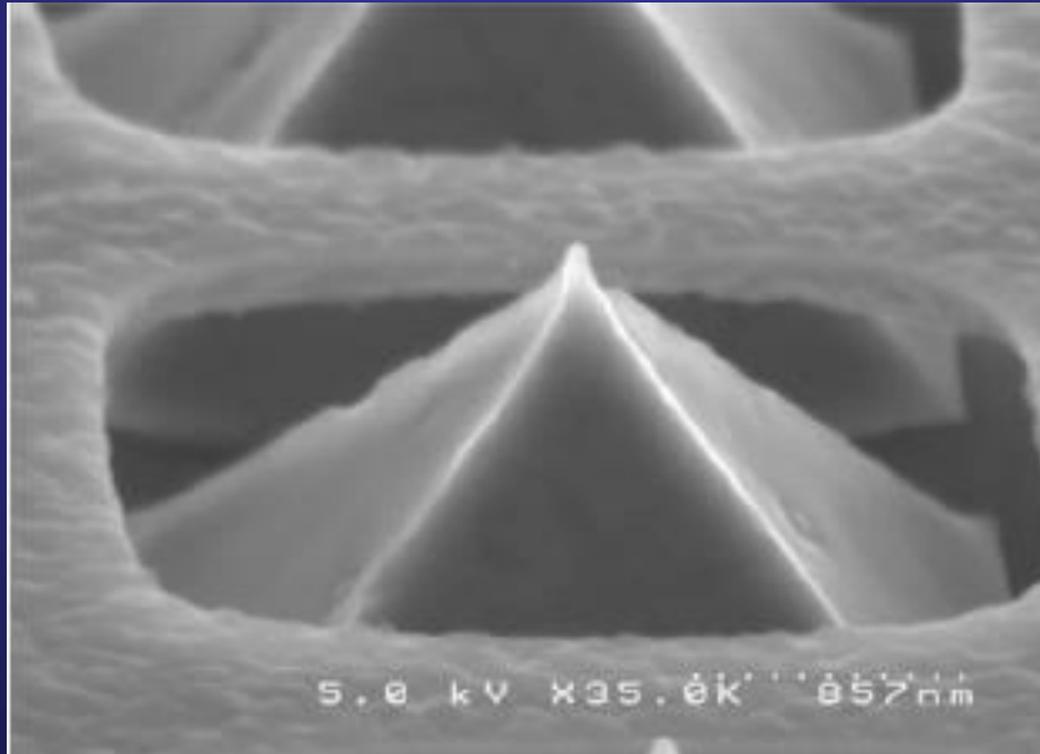
Davidson, J. et al.; “CVD diamond for components and emitters”, *Diamond and Related Materials*, v. 10, pp. 1736-1741, 2001.

Resistores baseados em Diamante



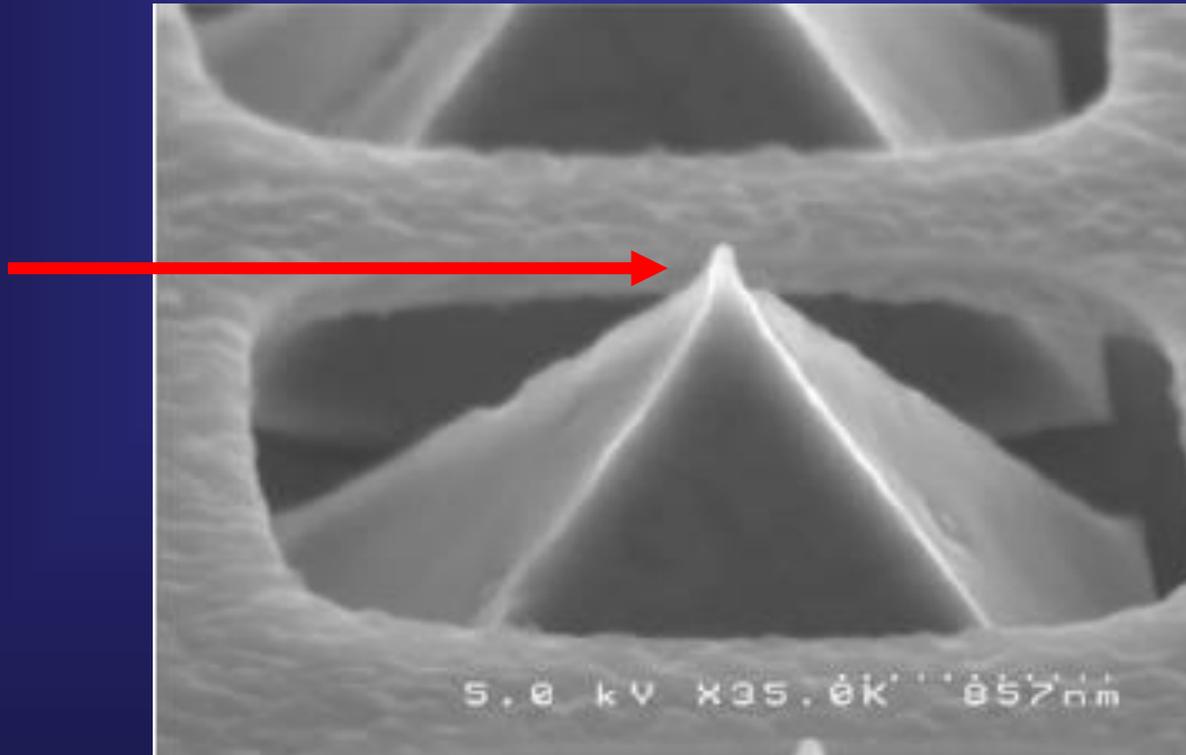
Davidson, J. et al.; "CVD diamond for components and emitters", Diamond and Related Materials, v. 10, pp. 1736-1741, 2001.

Emissores de campo baseados em Diamante



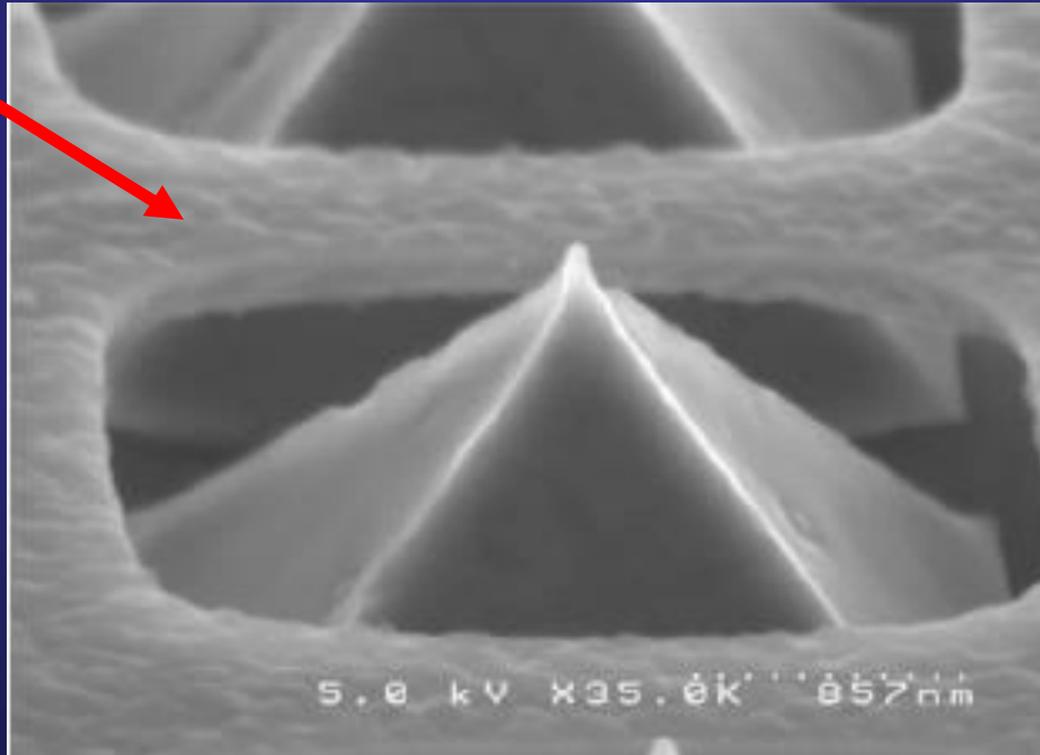
Davidson, J. et al.; “Diamond field emission devices”, Diamond and Related Materials, v. 12, pp. 429-433, 2003.

Emissores de campo baseados em Diamante



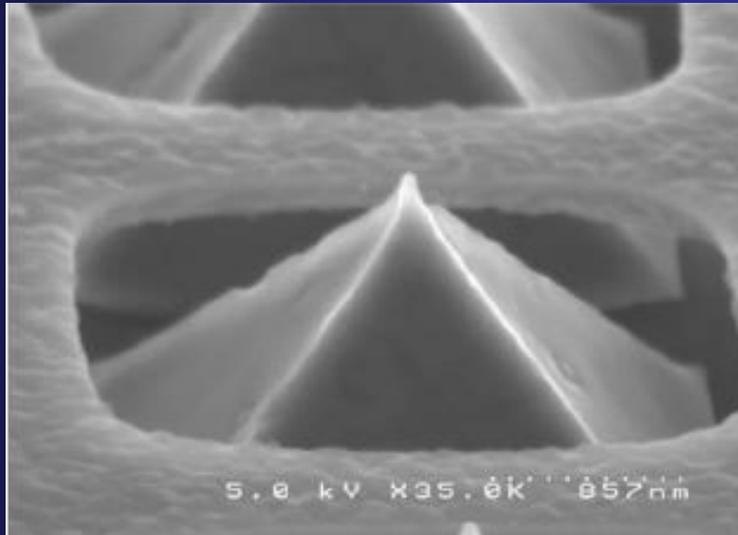
Davidson, J. et al.; "Diamond field emission devices", Diamond and Related Materials, v. 12, pp. 429-433, 2003.

Emissores de campo baseados em Diamante

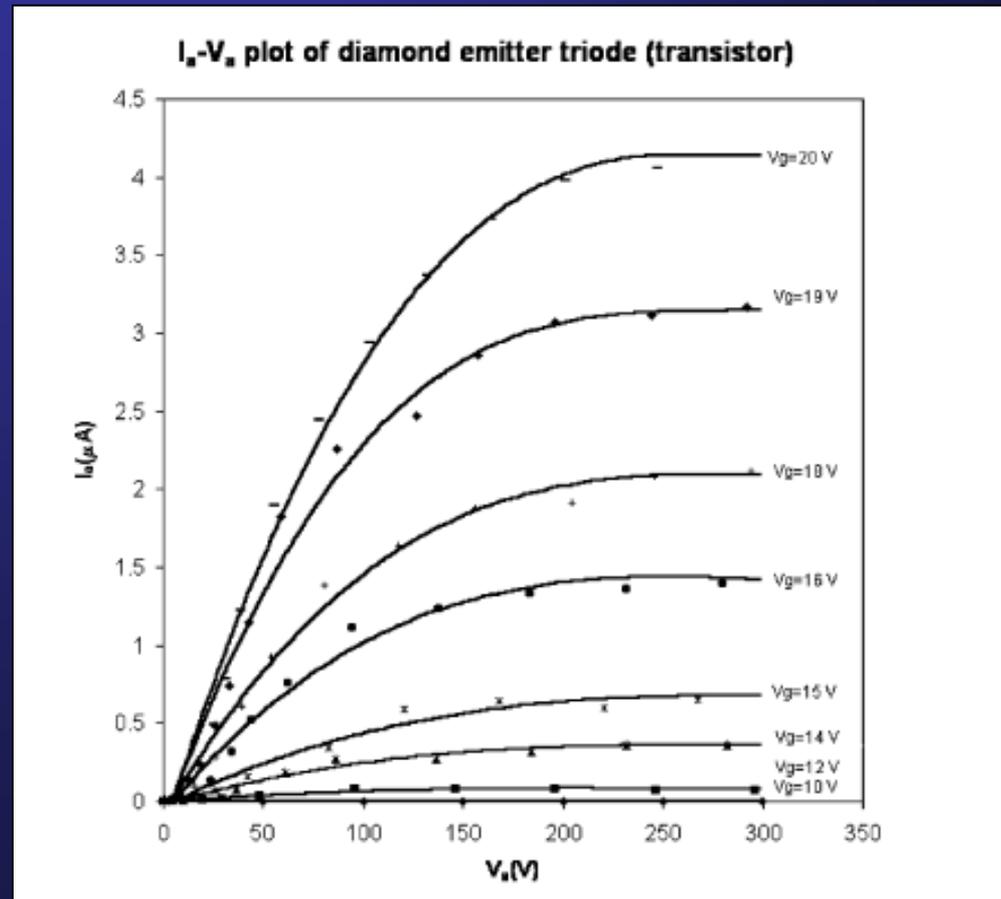


Davidson, J. et al.; "Diamond field emission devices", Diamond and Related Materials, v. 12, pp. 429-433, 2003.

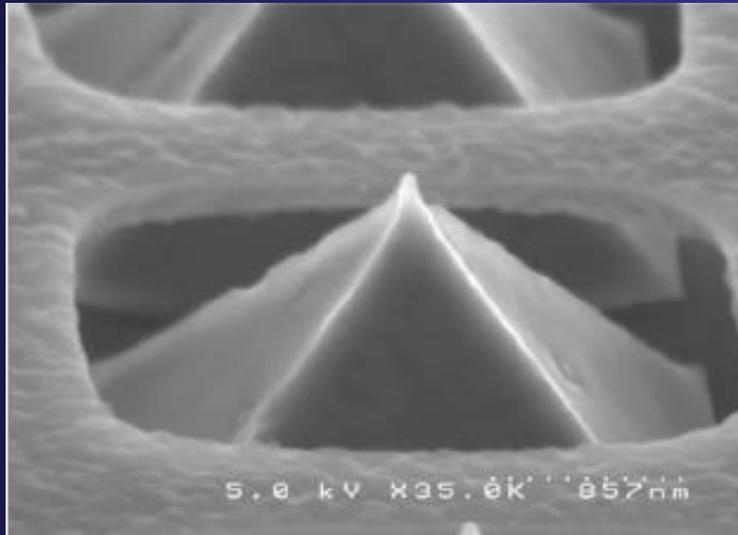
Emissores de campo baseados em Diamante



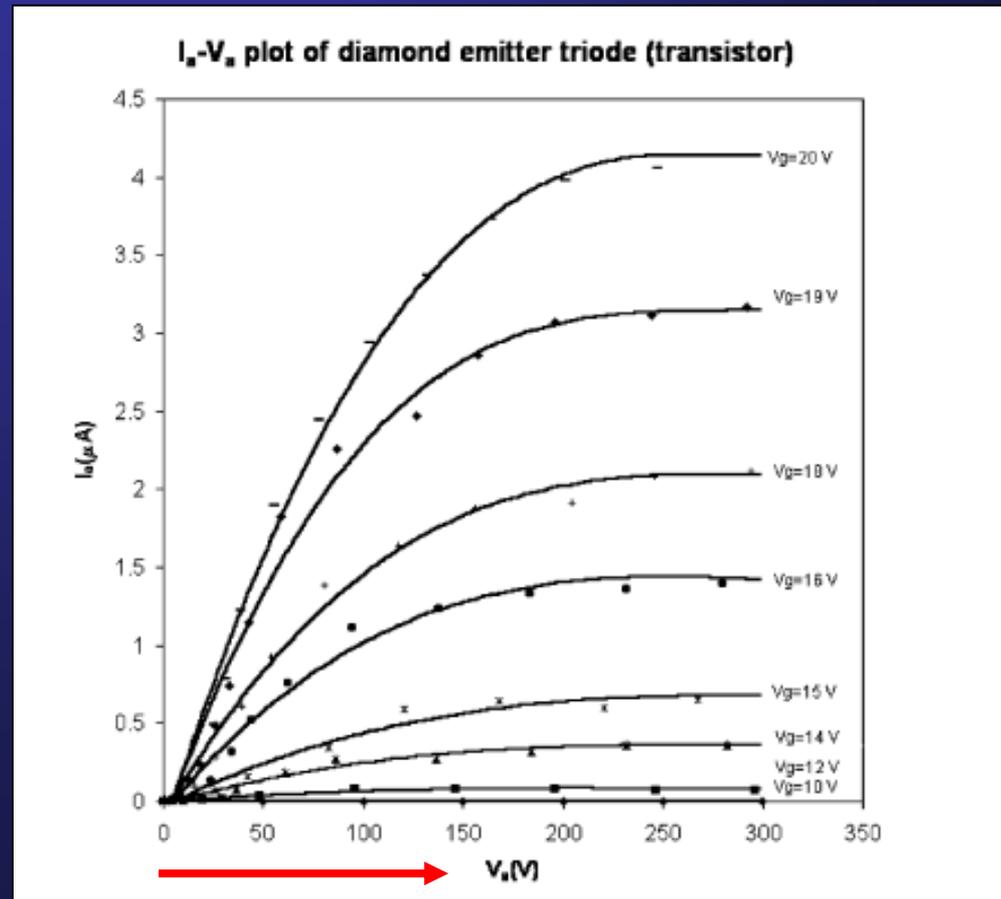
Davidson, J. et al.; “Diamond field emission devices”, *Diamond and Related Materials*, v. 12, pp. 429-433, 2003.



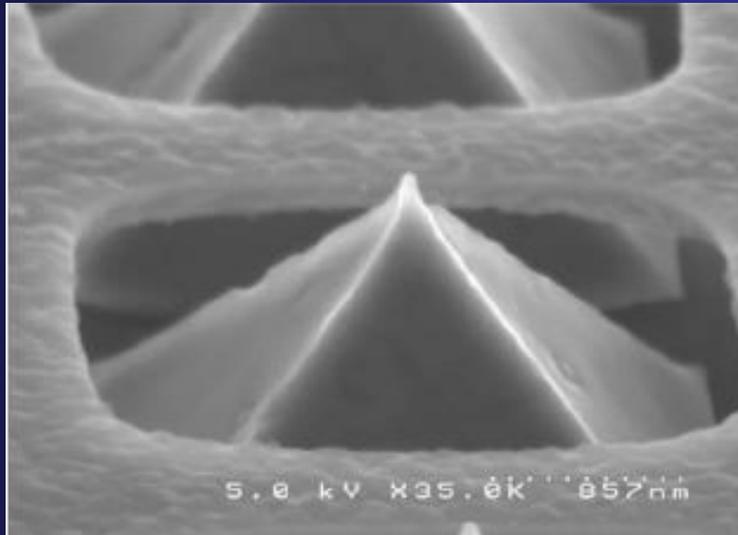
Emissores de campo baseados em Diamante



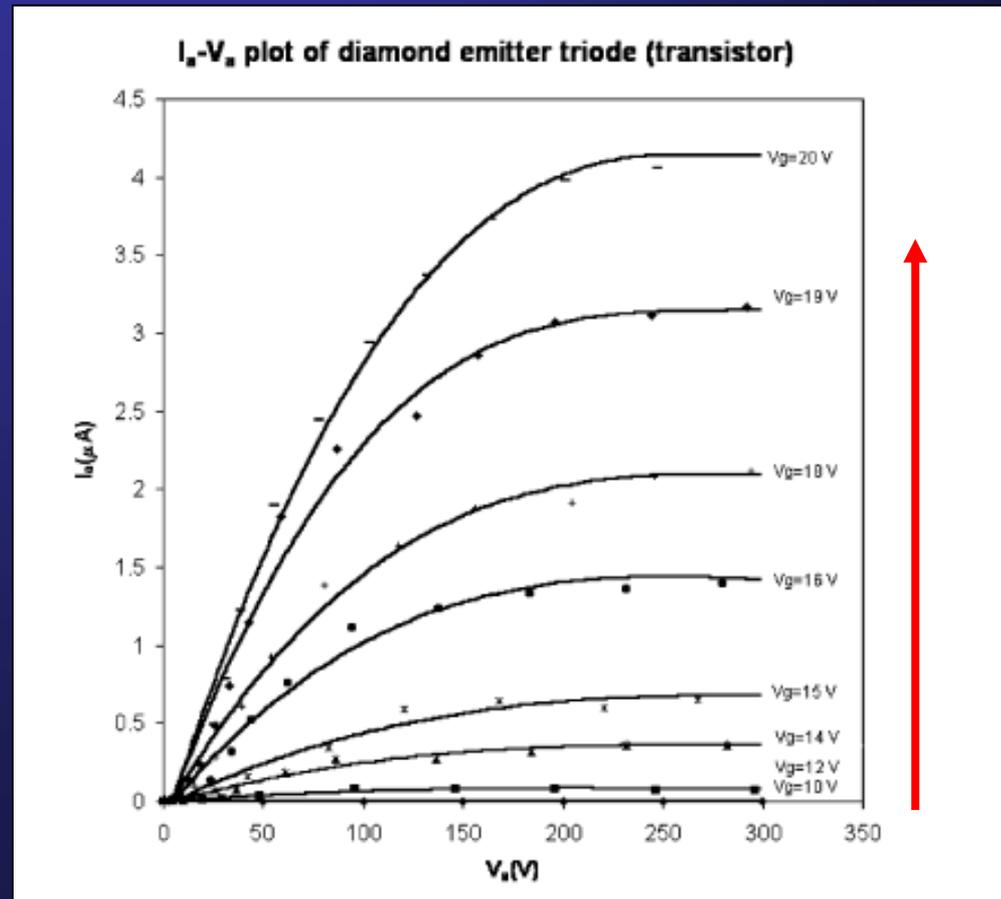
Davidson, J. et al.; “Diamond field emission devices”, Diamond and Related Materials, v. 12, pp. 429-433, 2003.



Emissores de campo baseados em Diamante



Davidson, J. et al.; “Diamond field emission devices”, Diamond and Related Materials, v. 12, pp. 429-433, 2003.



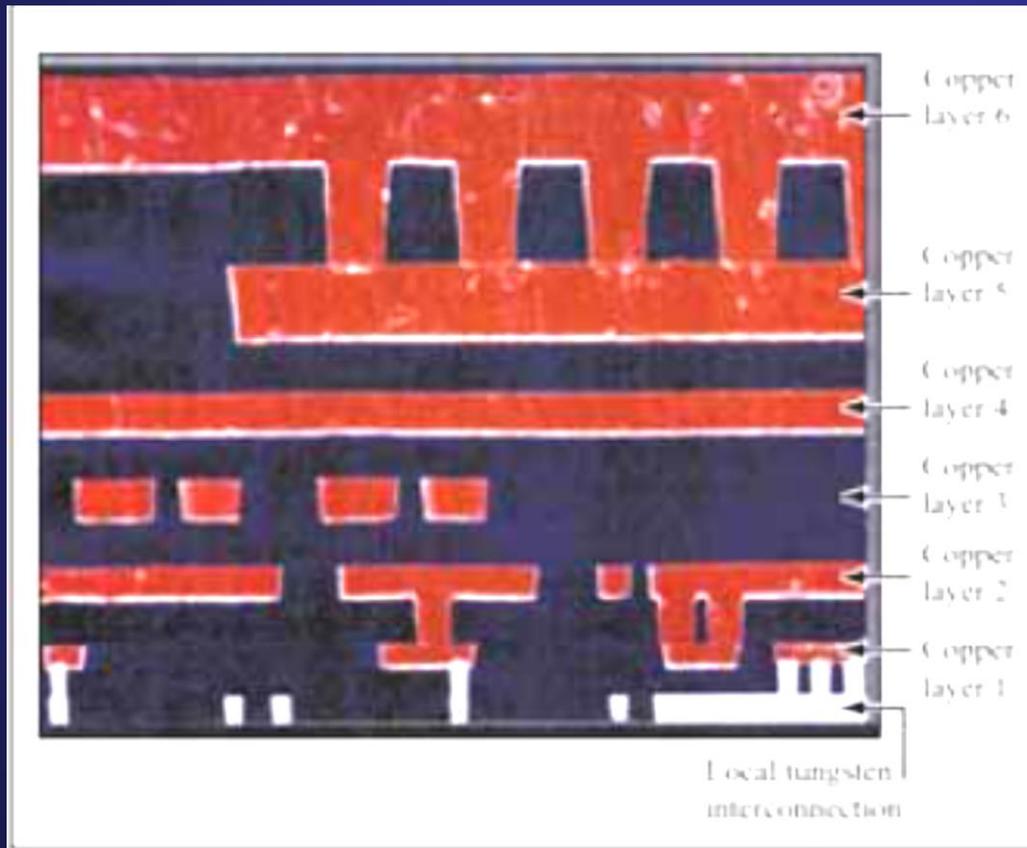
Eletrônica e Microeletrônica baseadas em Carbono

**Eletrônica e Microeletrônica
baseadas em filmes de DLC**

DLC (*Diamond-like Carbon*)

- Baseado em hibridações sp^3 e sp^2 ;
- Apresenta características que podem variar de um isolante a um semicondutor;
- Baixa constante dielétrica ($< 3,0$);
- Alta constante dielétrica quando dopado ($> 6,0$);
- Alta resistividade ($10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$);
- Alta inércia química;
- Alta dureza mecânica (10 a 15 GPa).

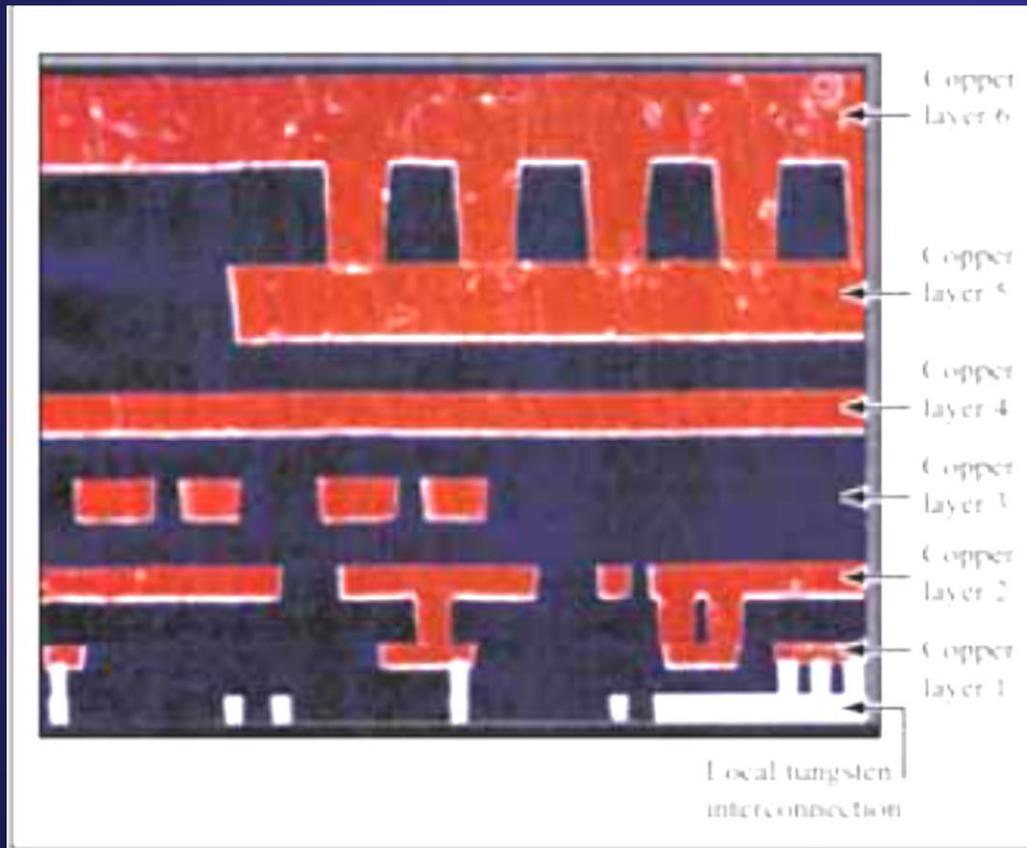
Dielétricos de baixo k baseados em DLC



IBM CMOS 7S
Cu metallisation

DLC → **k = 2,8**

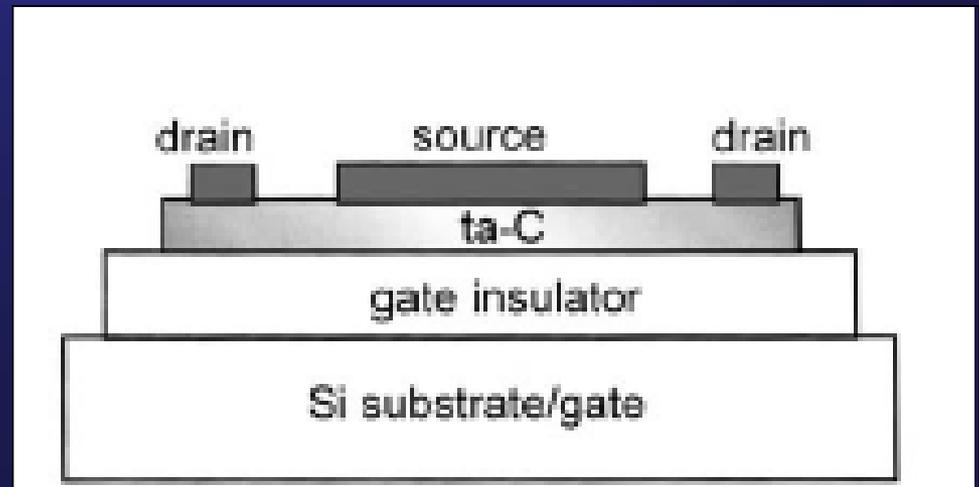
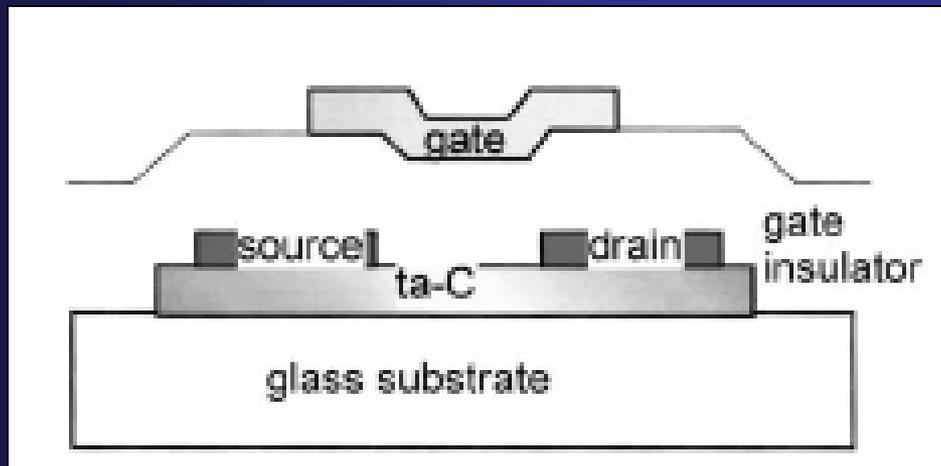
Dielétricos de baixo k baseados em DLC



IBM CMOS 7S
Cu metallisation

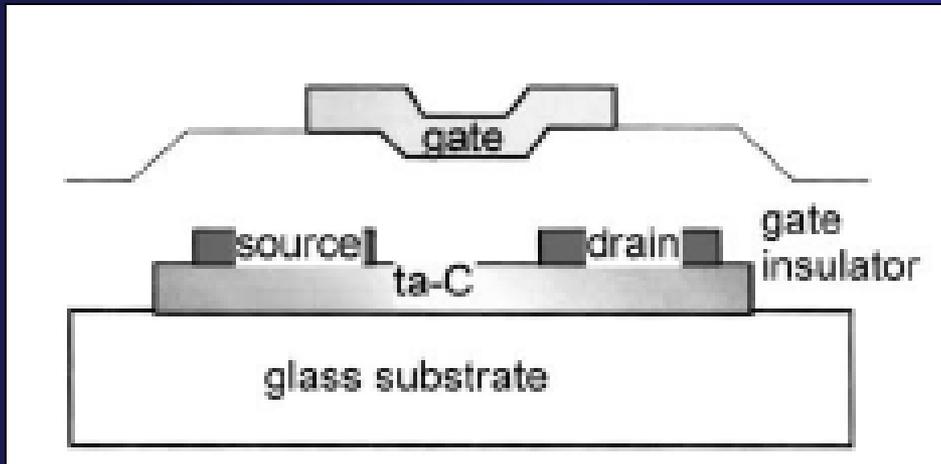
DLC → **k = 2,8**
DLC-F → **k = 2,4**

FETs baseados em DLC



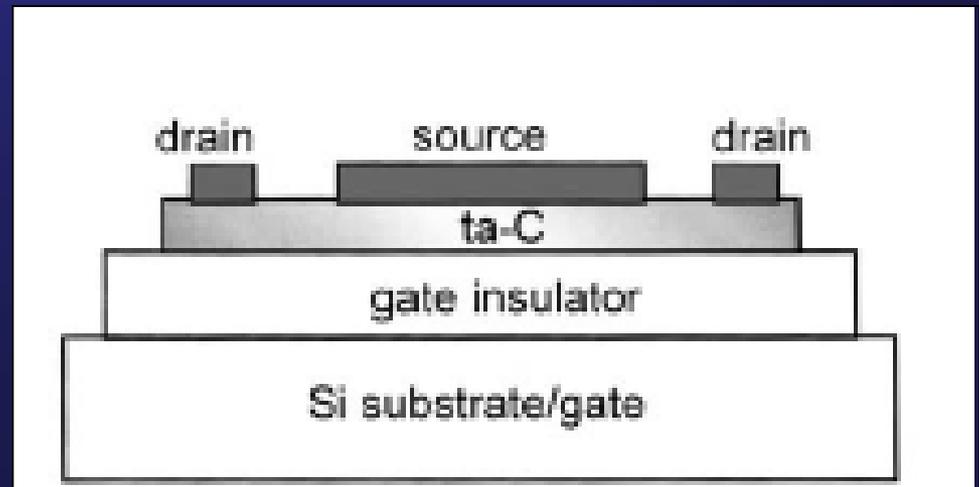
Robertson, J.; "Diamond-like amorphous carbon"; Materials Science and Engineering, v. 37, pp. 129-281, 2002.

FETs baseados em DLC



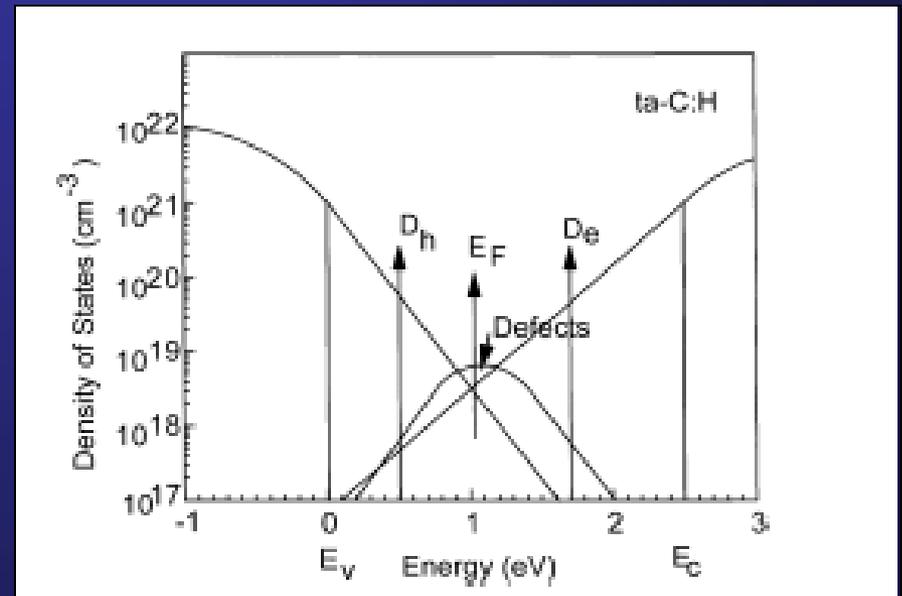
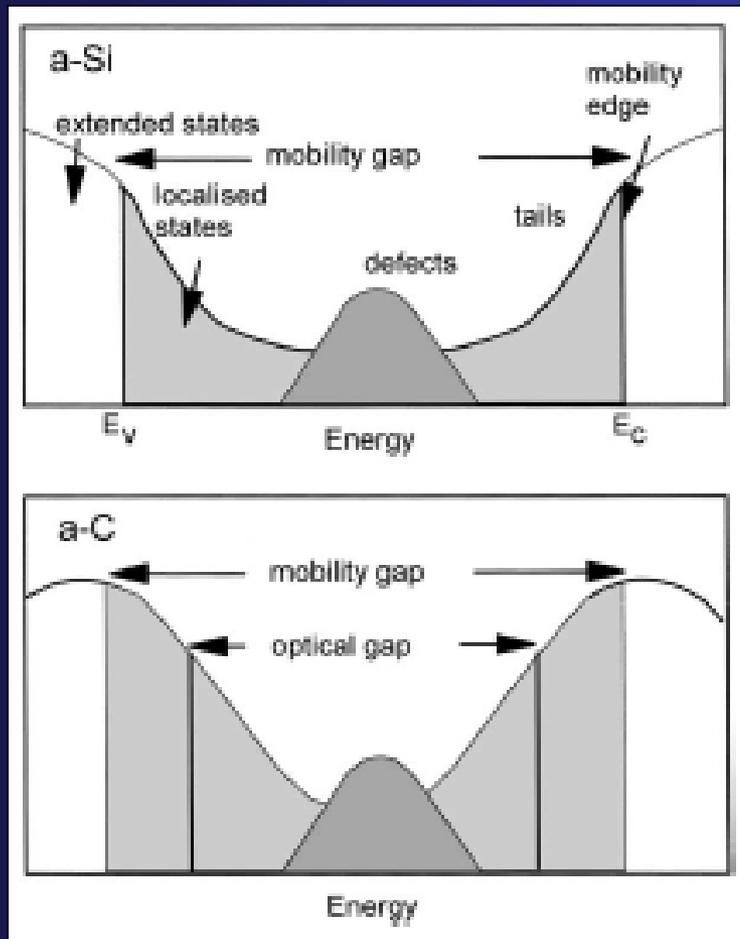
DLC- TFT

bottom gate DLC



Robertson, J.; "Diamond-like amorphous carbon"; Materials Science and Engineering, v. 37, pp. 129-281, 2002.

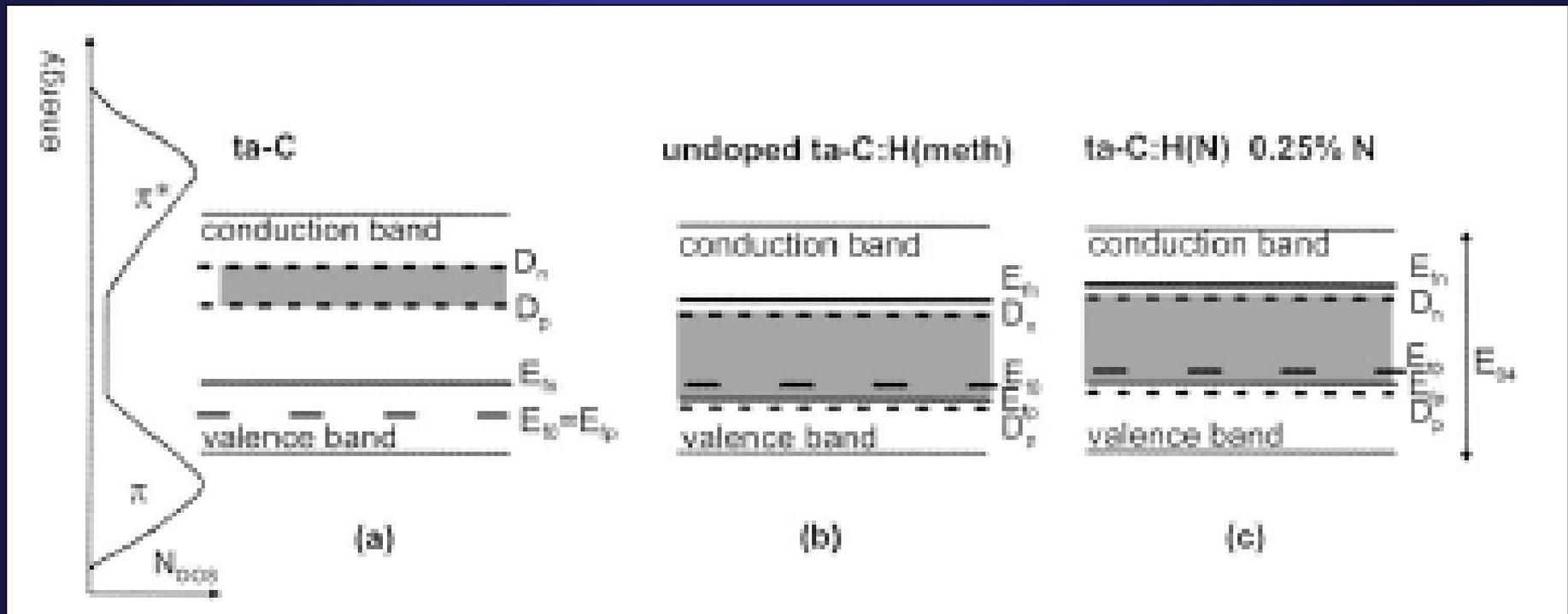
FETs baseados em DLC



Chen, C. W.; Robertson, J.; Journal of Non Crystalline Solids, v. 227/228, pp. 602, 1998.

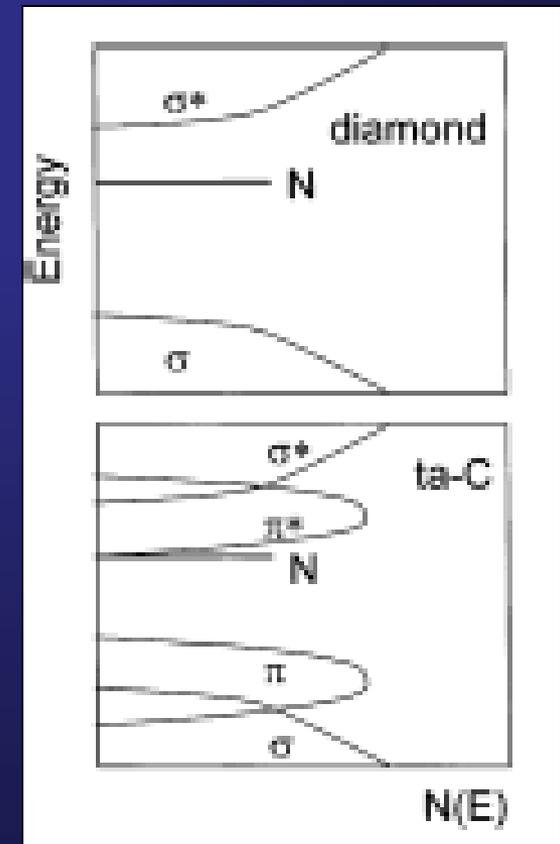
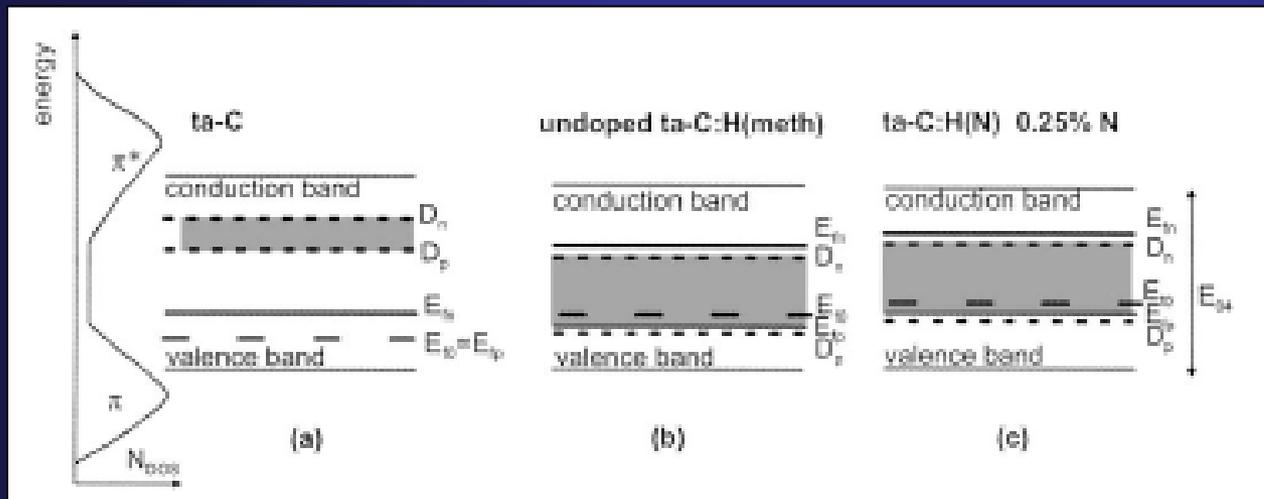
Robertson, J.; Philosophic Magnetic-B, v. 76, pp. 334, 1997.

FETs baseados em DLC



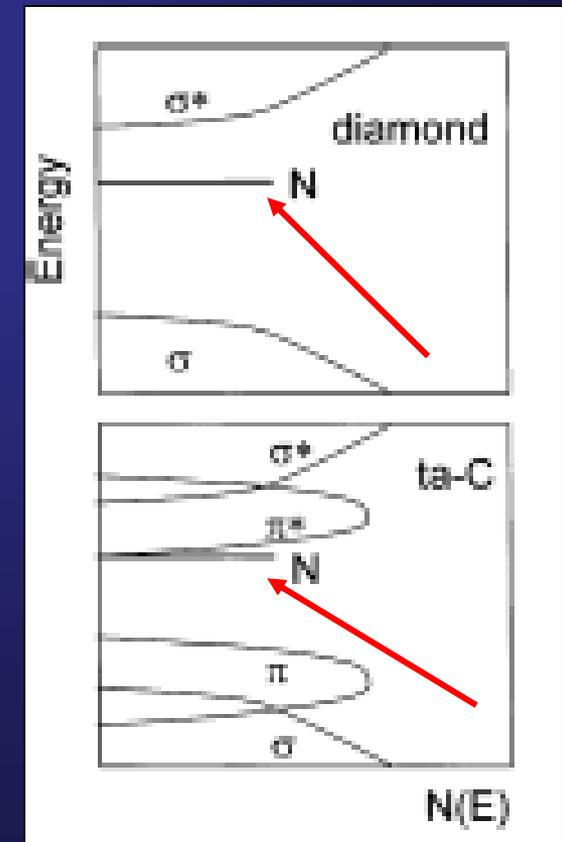
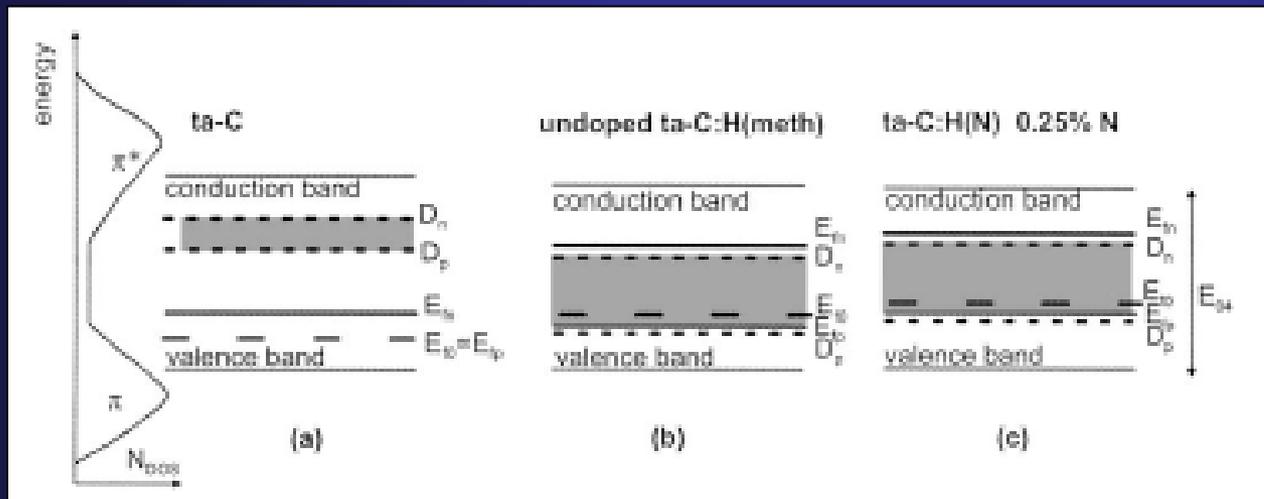
Koizumi, S.; et al.; Applied Physics Letters, vol. 71, pp. 1065, 1997.

FETs baseados em DLC



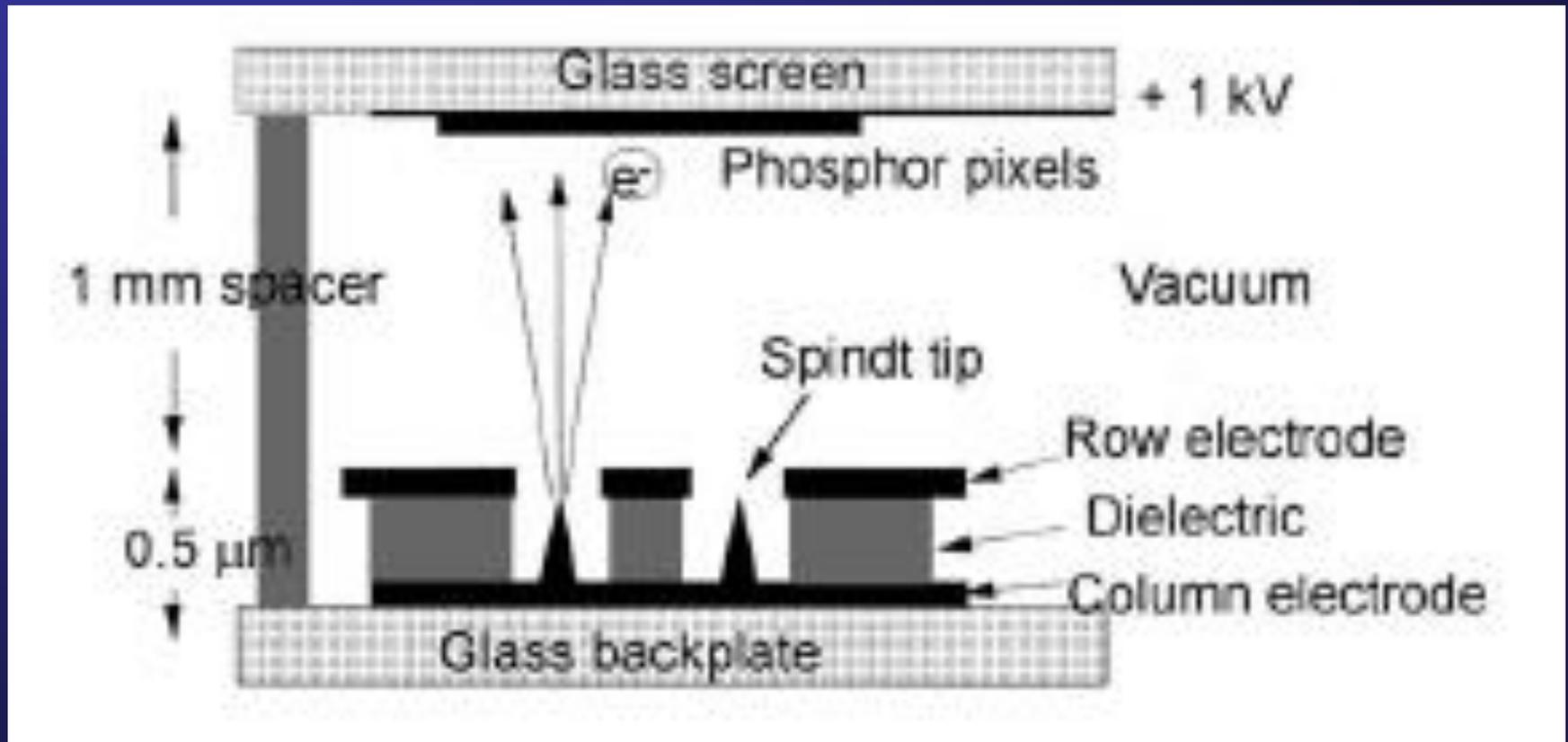
Koizumi, S.; et al.; Applied Physic Letters, vol. 71, pp. 1065, 1997.

FETs baseados em DLC



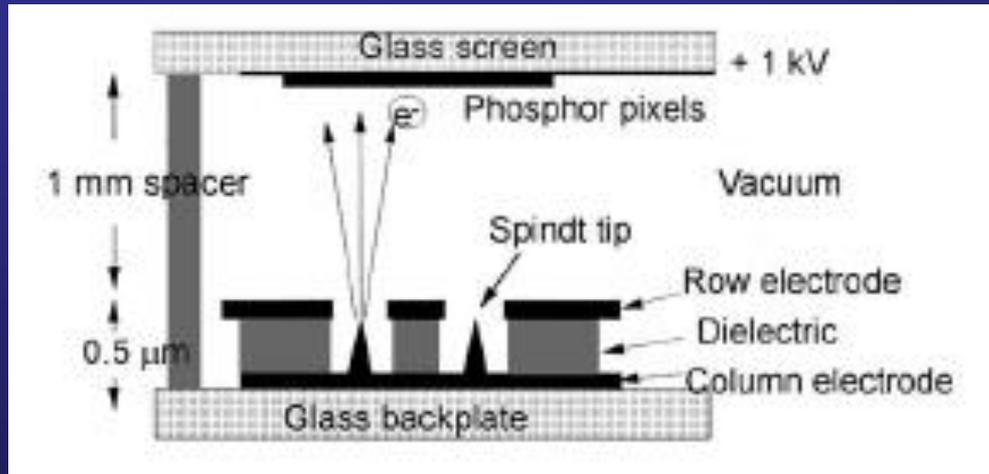
Koizumi, S.; et al.; Applied Physic Letters, vol. 71, pp. 1065, 1997.

Emissores de campo baseados em filmes de DLC

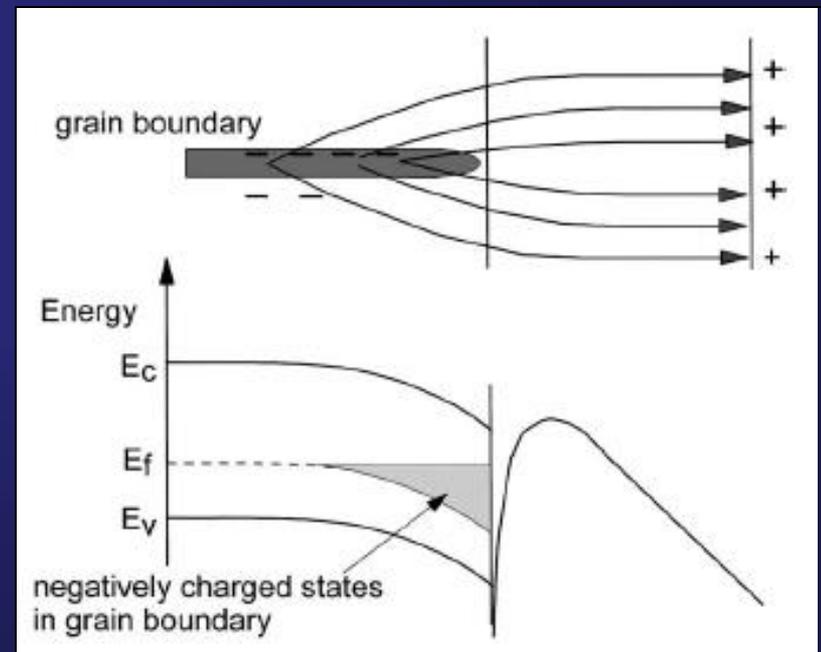


Robertson, J.; Thin Solid Films, v. 296, pp. 61, 1997.

Emissores de campo baseados em filmes de DLC

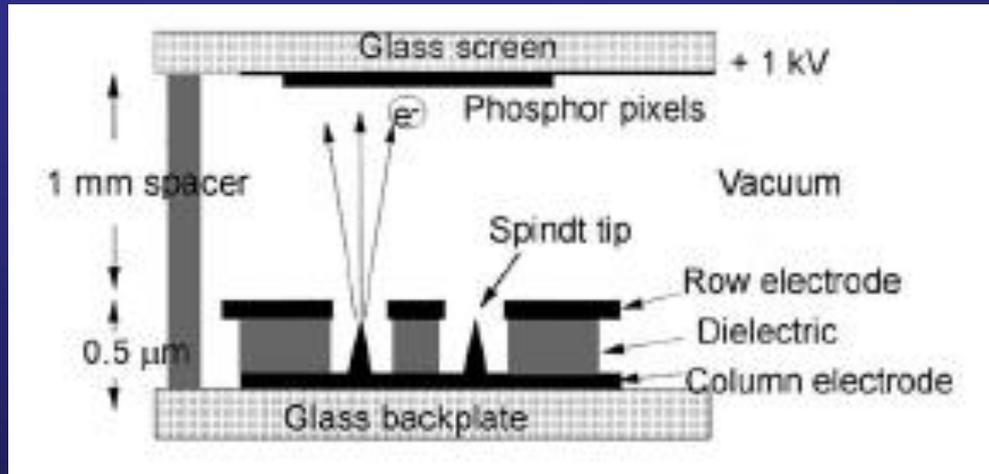


Robertson, J.; Thin Solid Films, v. 296, pp. 61, 1997.

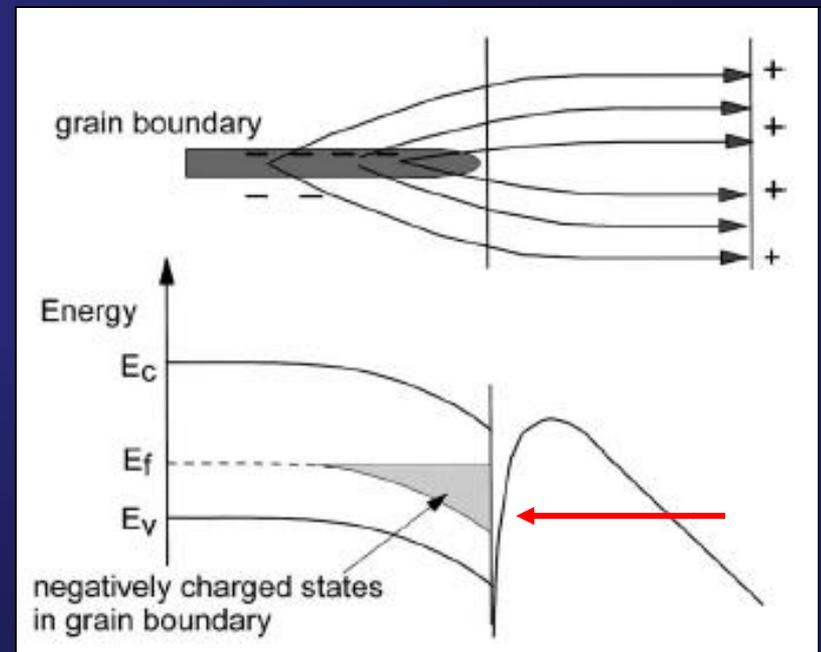


Gröning, O.; Journal of Vacuum Science Technology B, v. 17, pp. 1064, 1999.

Emissores de campo baseados em filmes de DLC

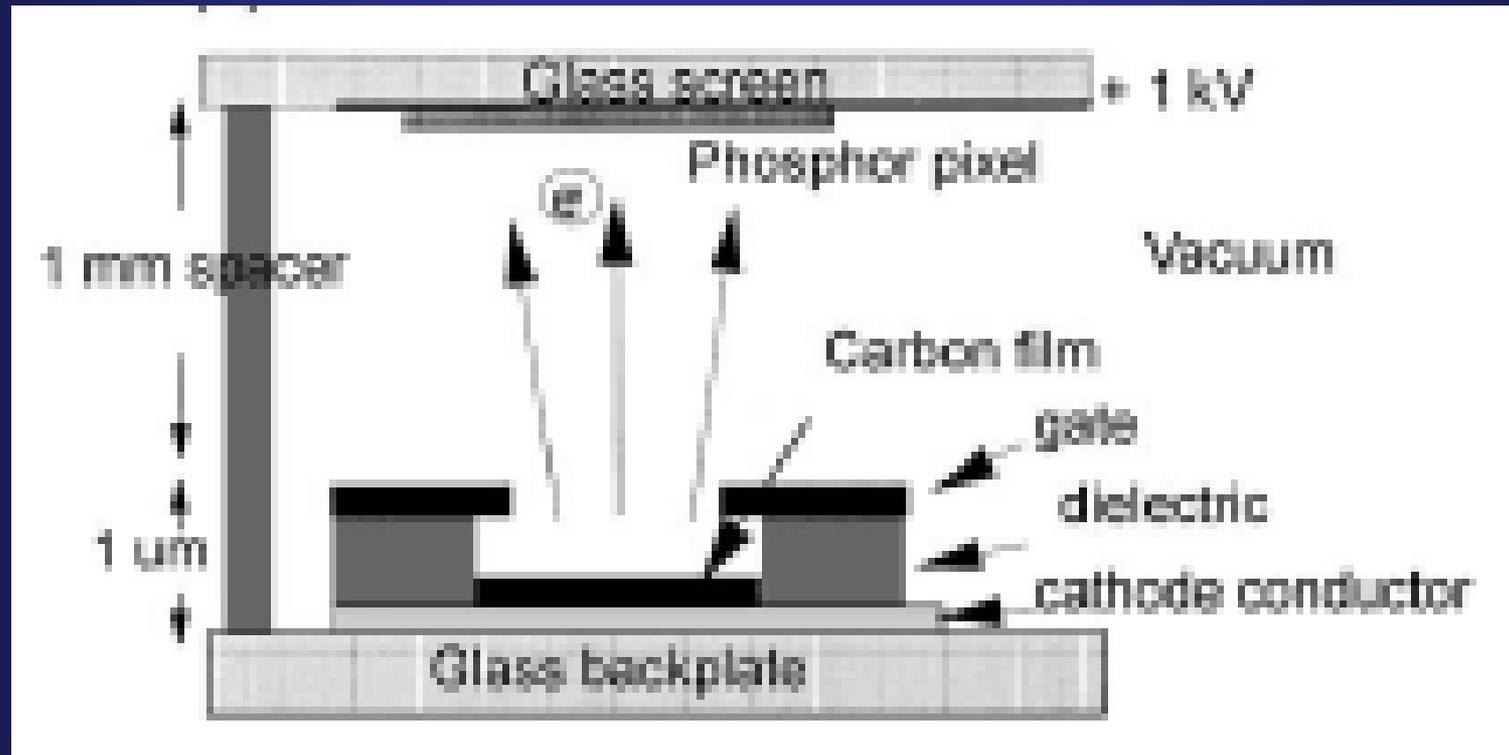


Robertson, J.; Thin Solid Films, v. 296, pp. 61, 1997.



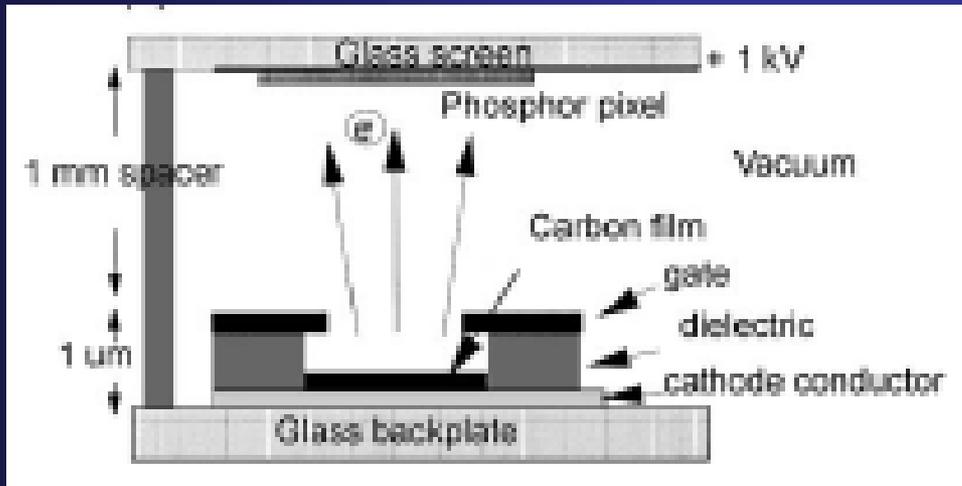
Gröning, O.; Journal of Vacuum Science Technology B, v. 17, pp. 1064, 1999.

Emissores planos de campo baseados em filmes de DLC



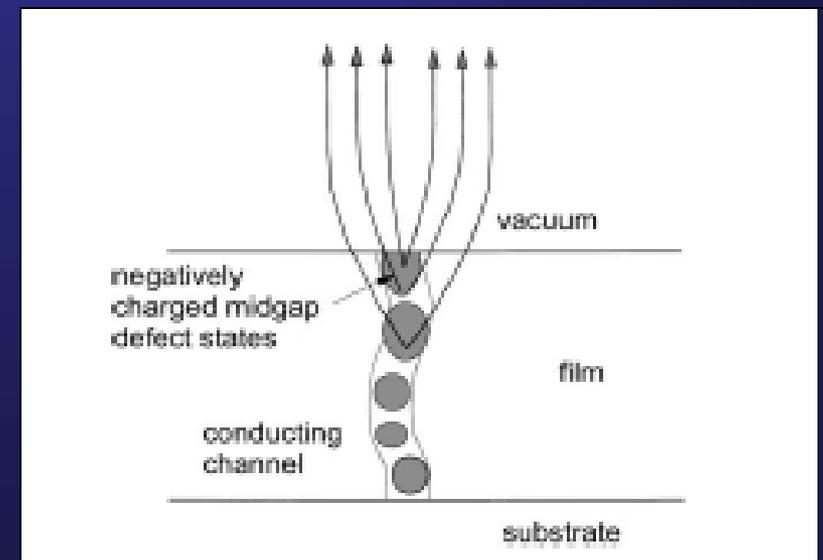
Robertson, J.; Thin Solid Films, v. 296, pp. 61, 1997.

Emissores planos de campo baseados em filmes de DLC

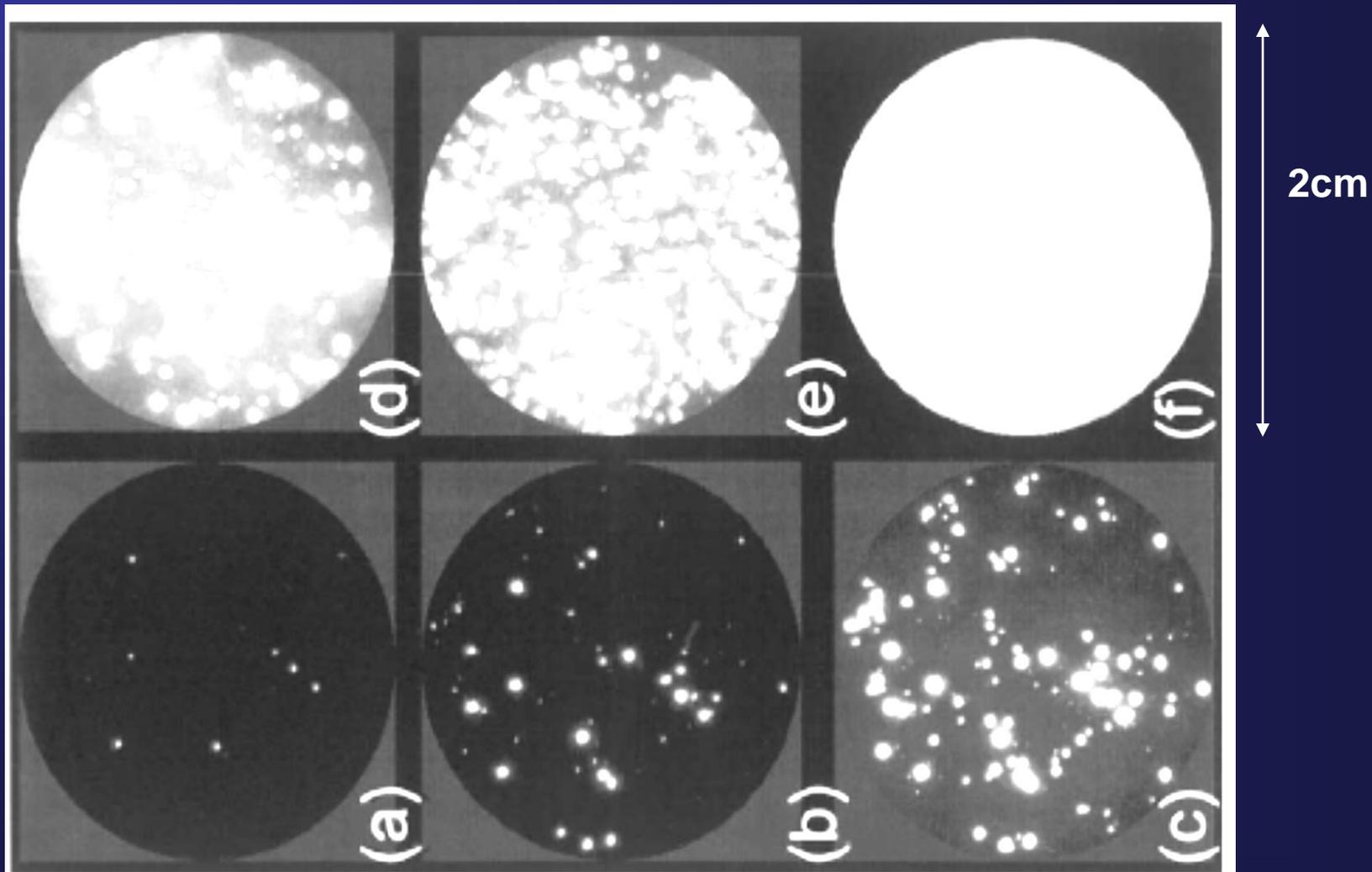


Zhao, J. P.; Applied Physics Letters, v. 76, pp. 191, 2000.

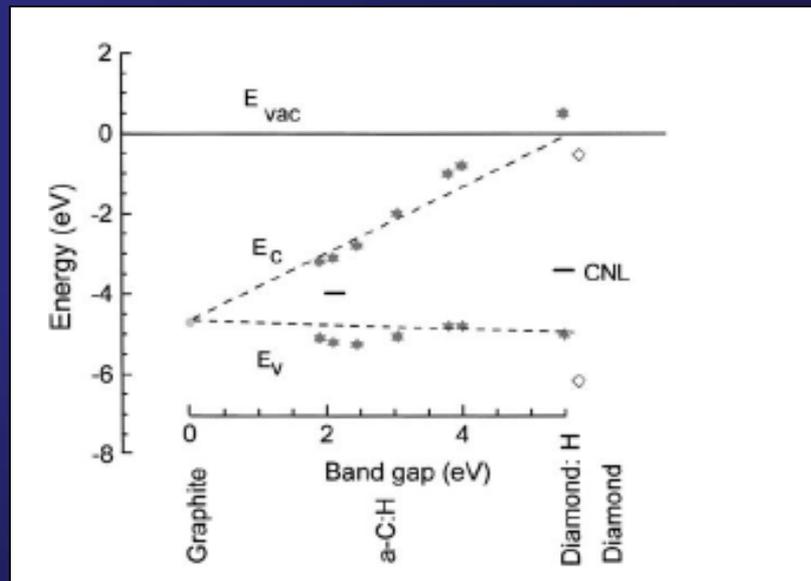
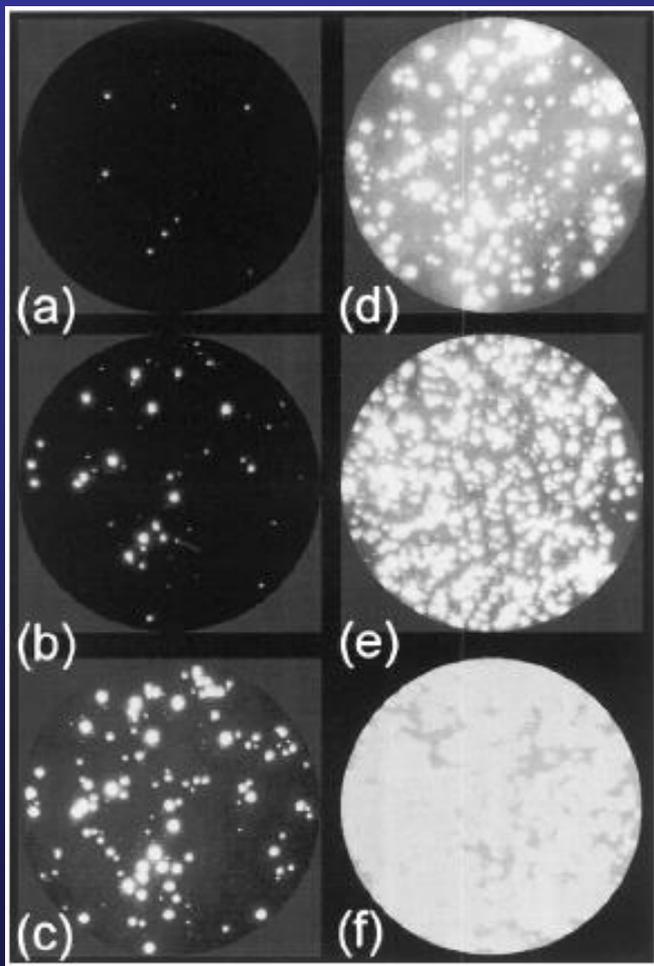
Robertson, J.; Thin Solid Films, v. 296, pp. 61, 1997.



Emissores de campo baseados em carbono nanoestruturado

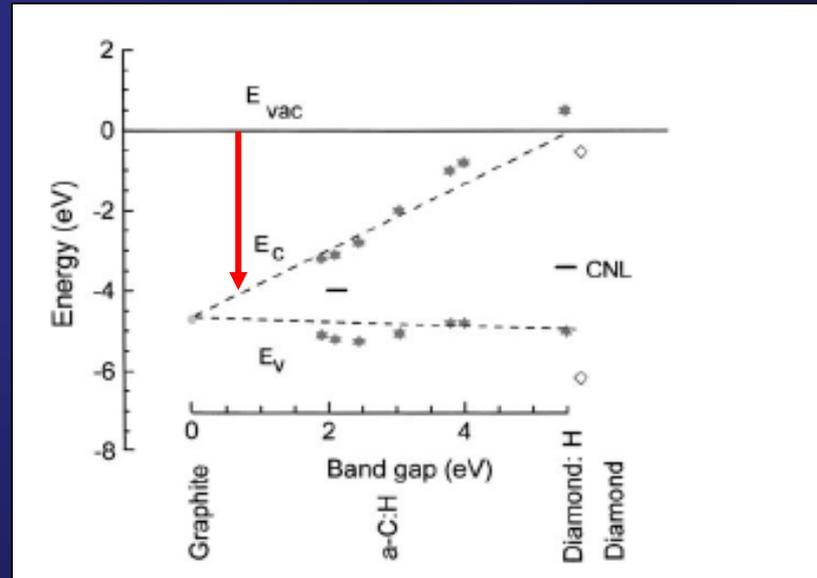
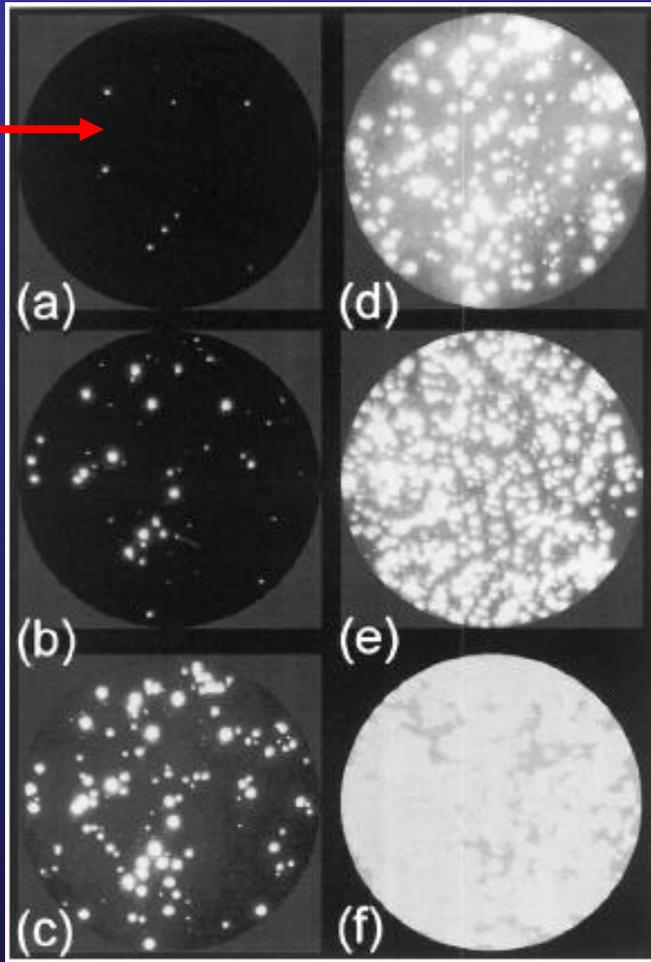


Emissores de campo baseados em carbono nanoestruturado



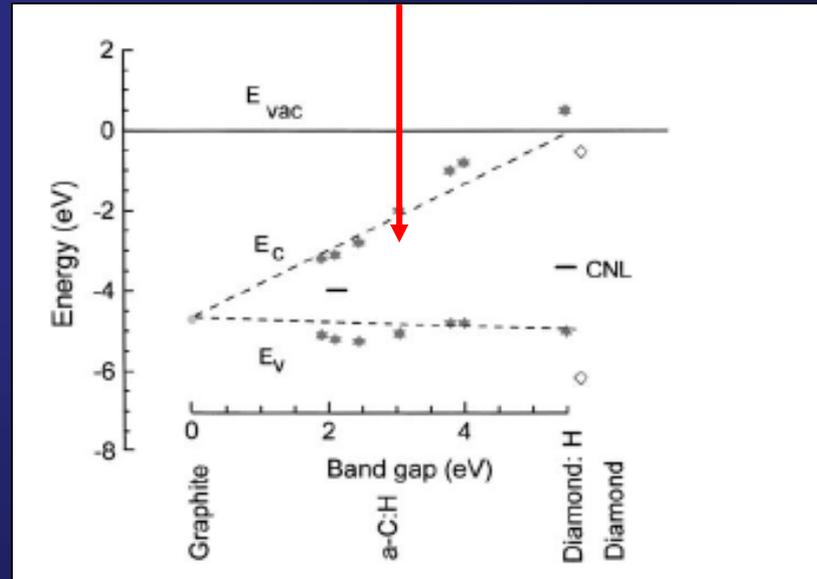
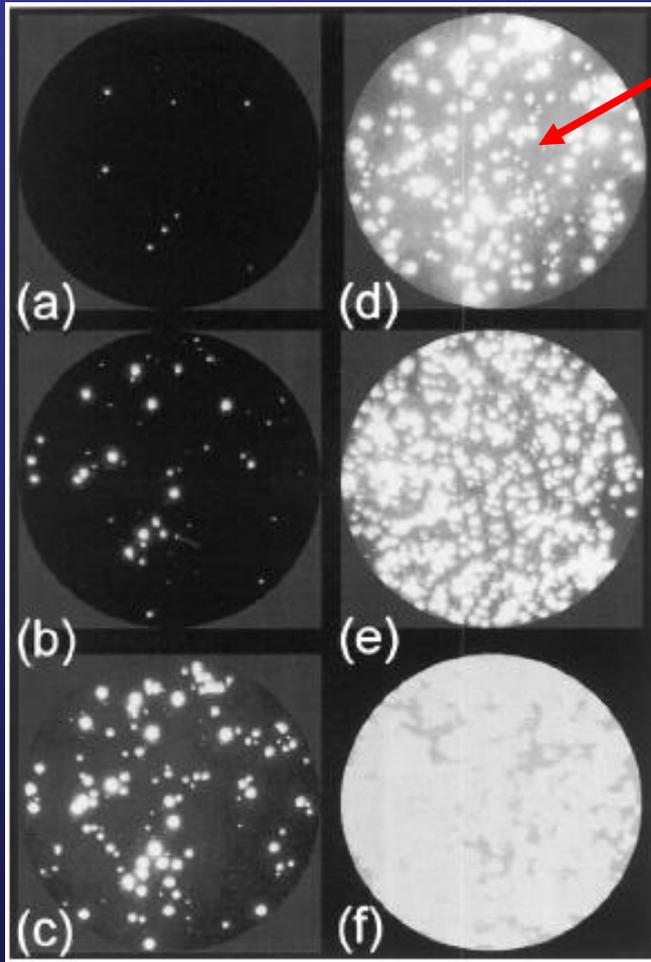
Cui, J. B.; Robertson, J.; Milne, W. I.; Journal of Applied Physics Letters, v. 89, pp. 3490, 2001.

Emissores de campo baseados em carbono nanoestruturado



Cui, J. B.; Robertson, J.; Milne, W. I.; Journal of Applied Physics Letters, v. 89, pp. 3490, 2001.

Emissores de campo baseados em carbono nanoestruturado



Cui, J. B.; Robertson, J.; Milne, W. I.; Journal of Applied Physics Letters, v. 89, pp. 3490, 2001.

Estado da Arte em Microeletrônica Baseada em Carbono

Microeletrônica Baseada em Nanotubos de Carbono

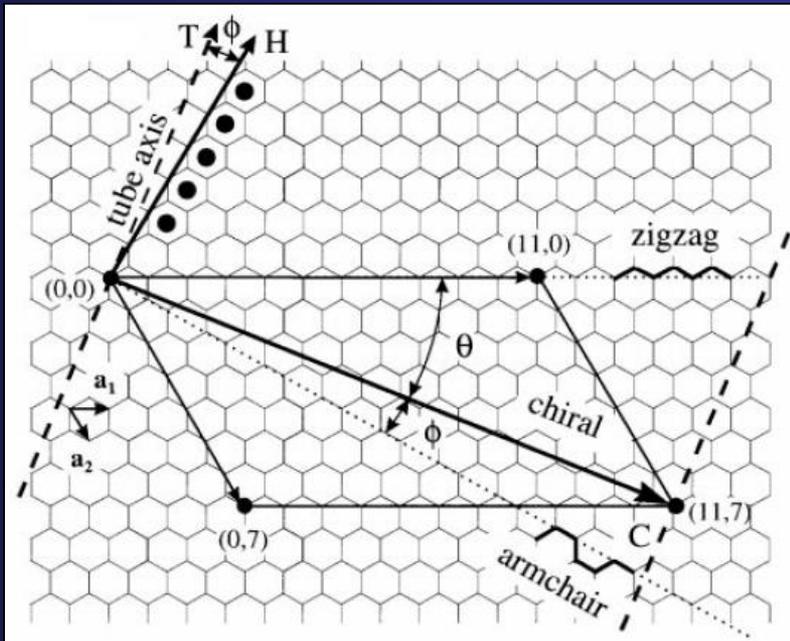
Propriedades dos nanotubos de carbono

Propriedades	Nano Tubos de Carbono
Característica elétrica	Metal ou Semicondutor
Mecanismo de transporte	Balístico
Gap de energia	E_g [eV] = $1/d$
Condutividade térmica	6000 W/ m.K
Diâmetro	1 a 100 nm
Comprimento	> 1 mm
Superfície	> 1500 m ² /g
Elasticidade	1000 Gpa
Transporte	Ambipolar

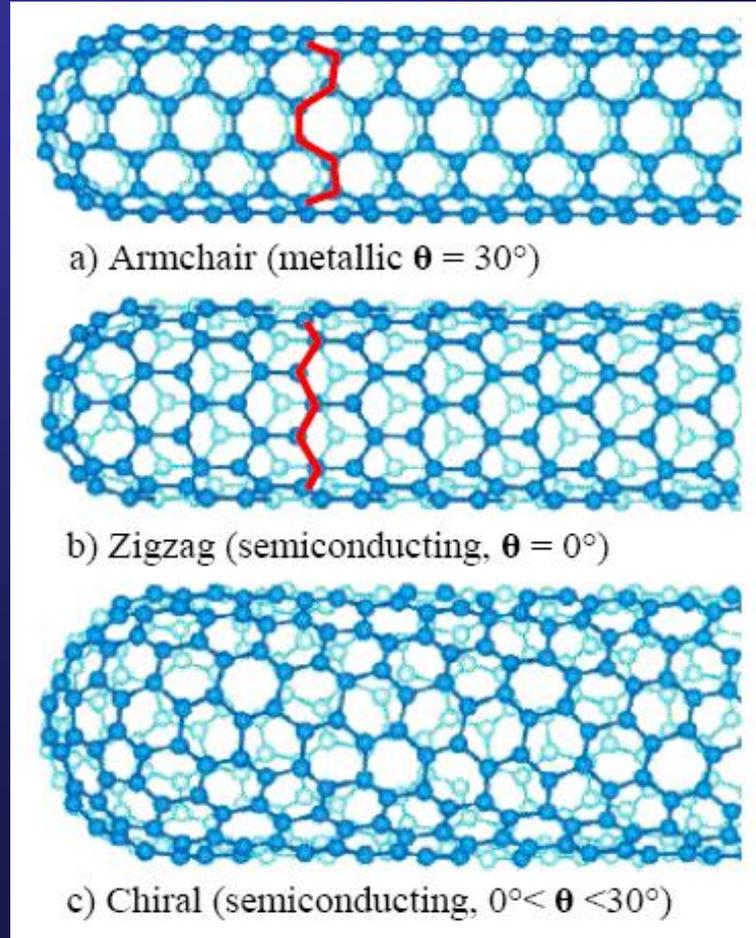
Aplicações dos nanotubos de carbono em eletrônica e microeletrônica

- Transistores de efeito de campo (CNT-FET);
- Conexões intra e inter-dispositivos;
- Microeletrônica em vácuo;
- Emissores de campo;
- Eletrônica de potência.

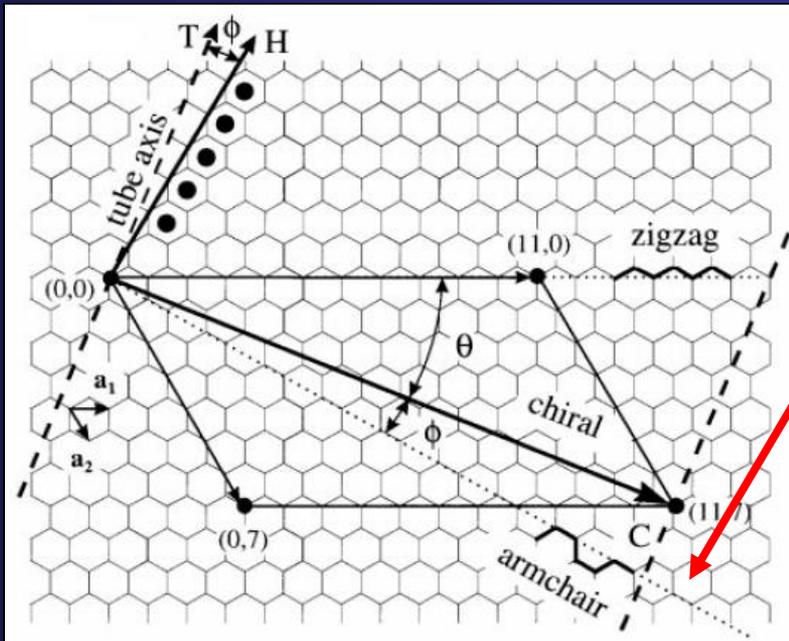
Estrutura dos nanotubos de carbono



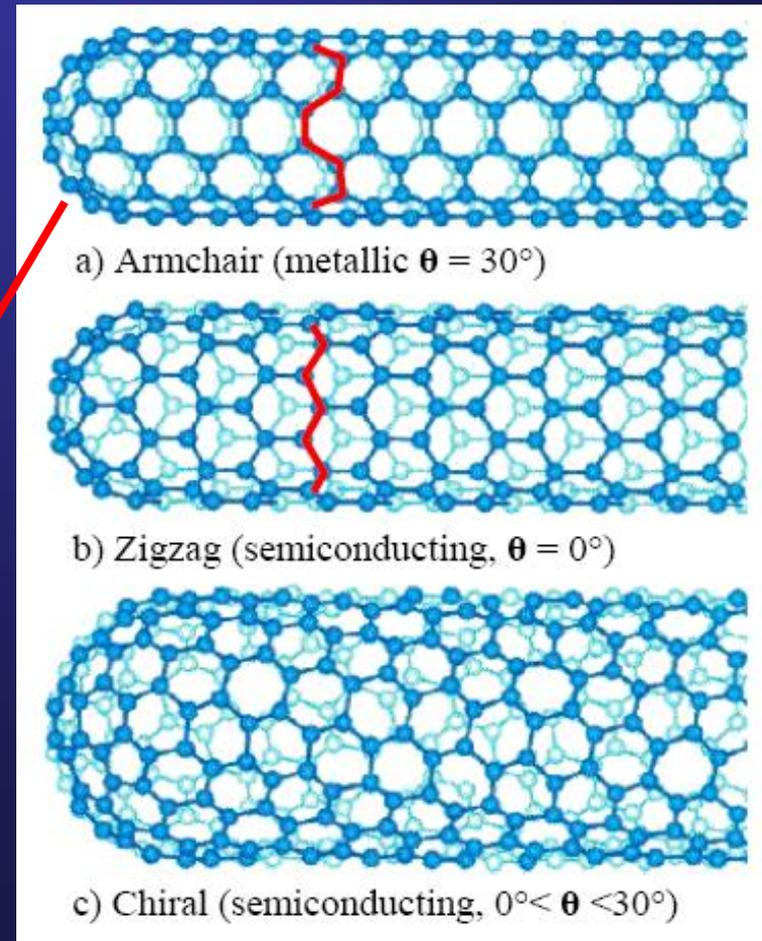
Beebe, P.; Lal, A.; Yu, A.; "A study of carbon nanotubes and their applications in transistors"; 2004



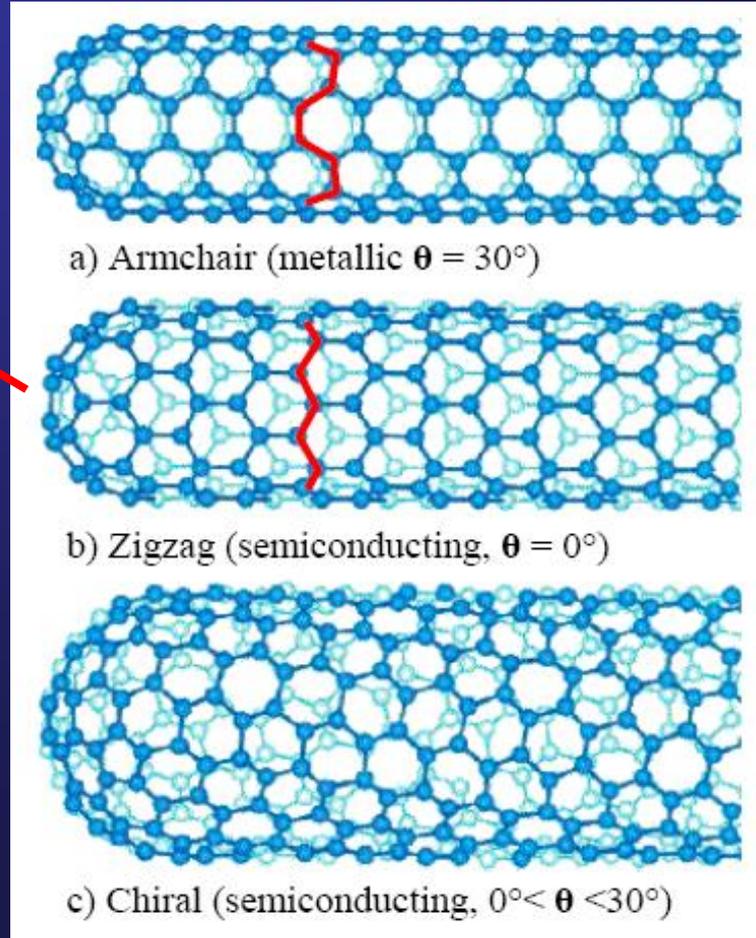
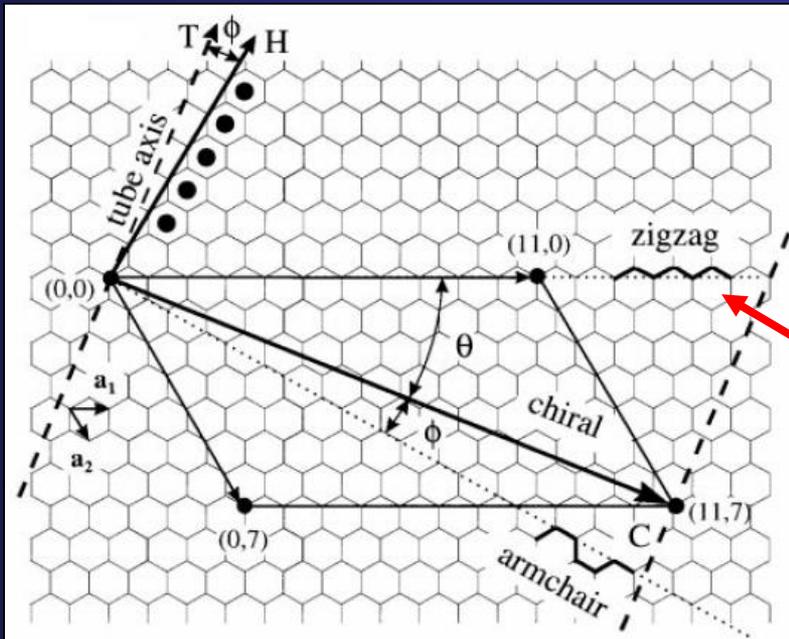
Estrutura dos nanotubos de carbono



Beebe, P.; Lal, A.; Yu, A.; "A study of carbon nanotubes and their applications in transistors"; 2004

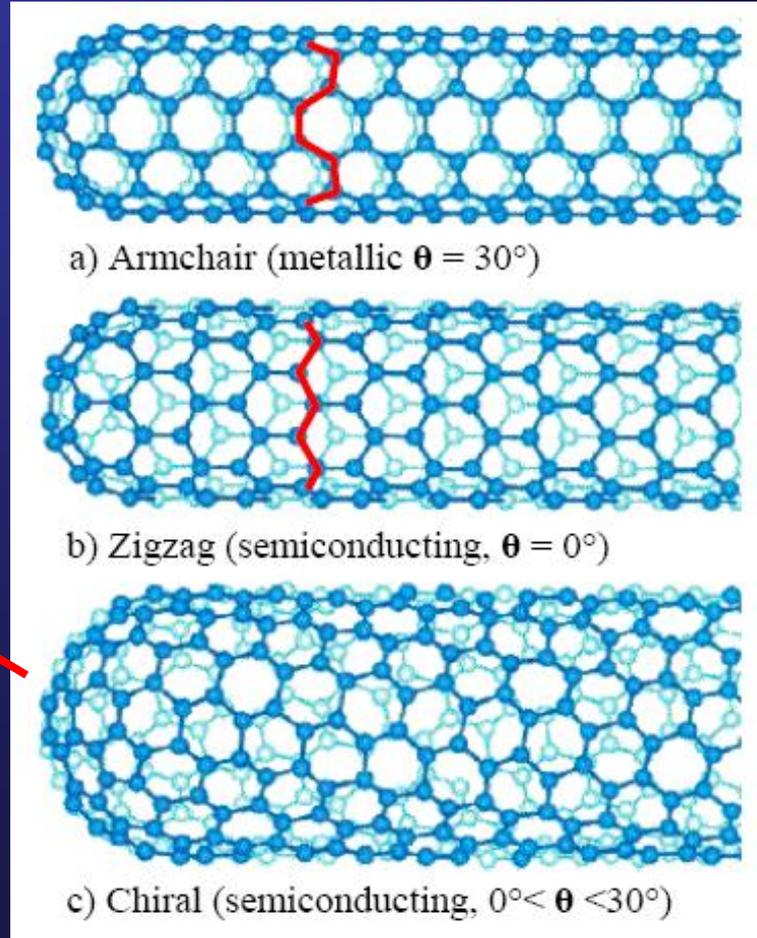
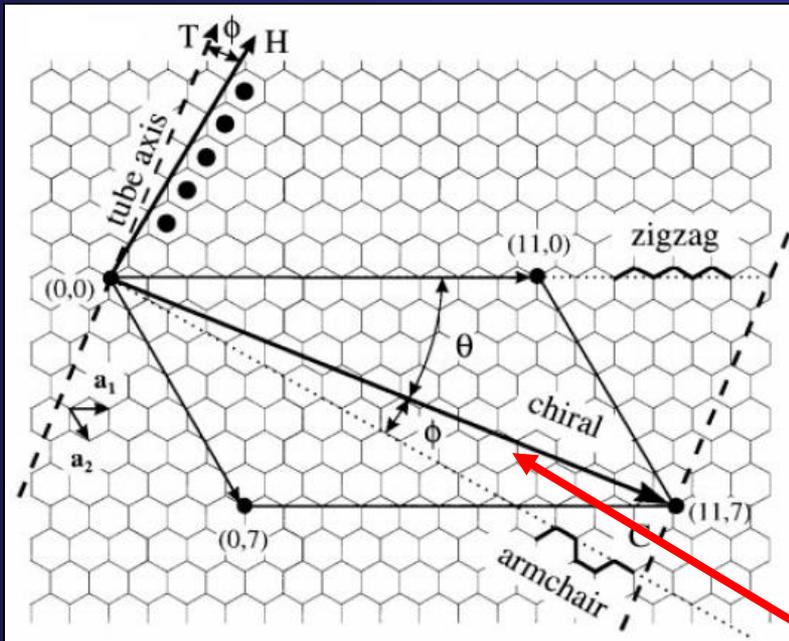


Estrutura dos nanotubos de carbono



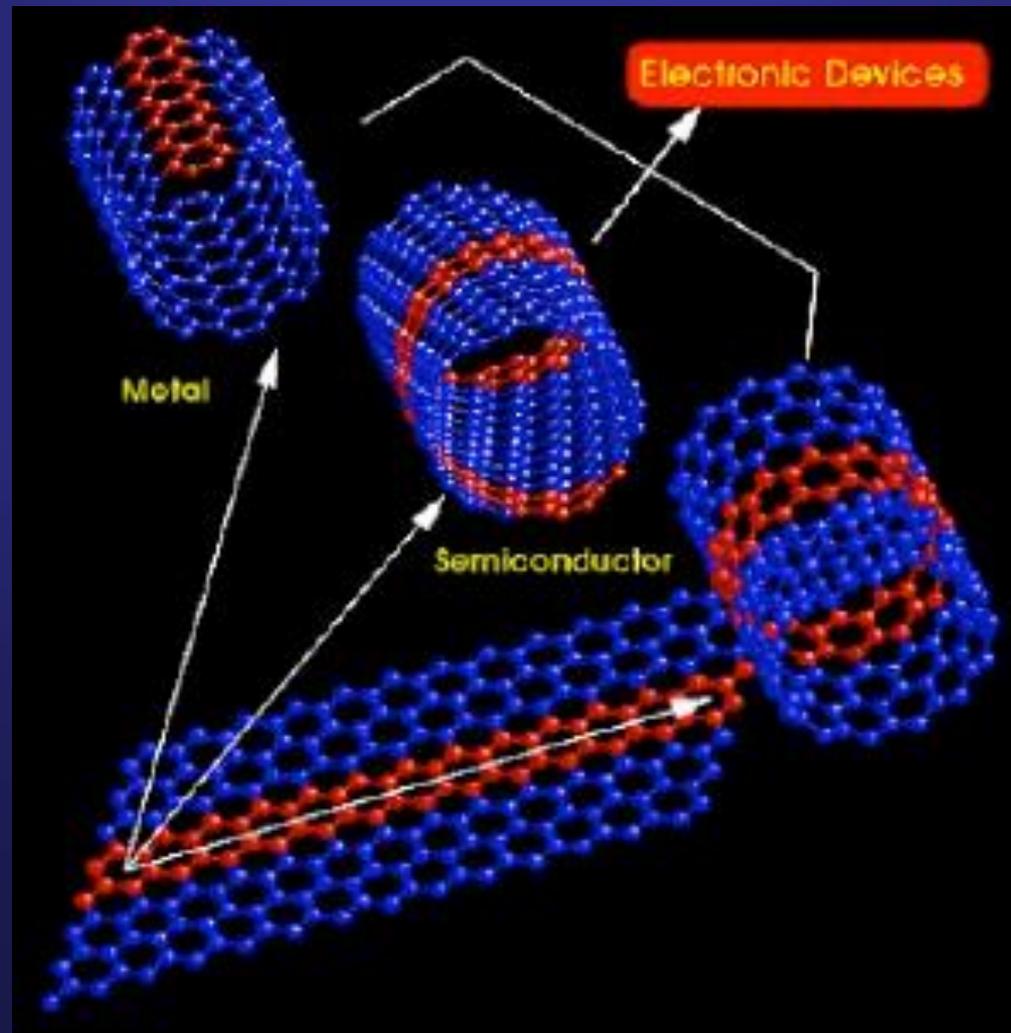
Beebe, P.; Lal, A.; Yu, A.; "A study of carbon nanotubes and their applications in transistors"; 2004

Estrutura dos nanotubos de carbono

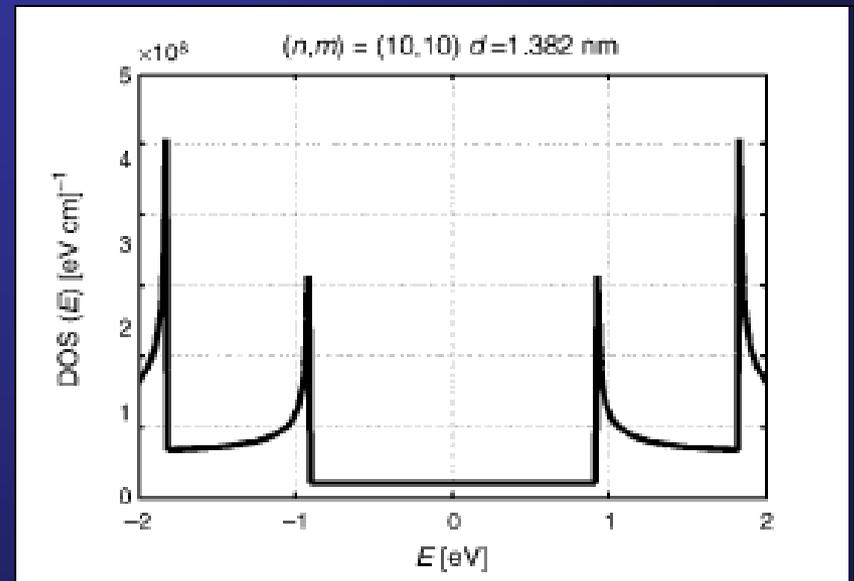
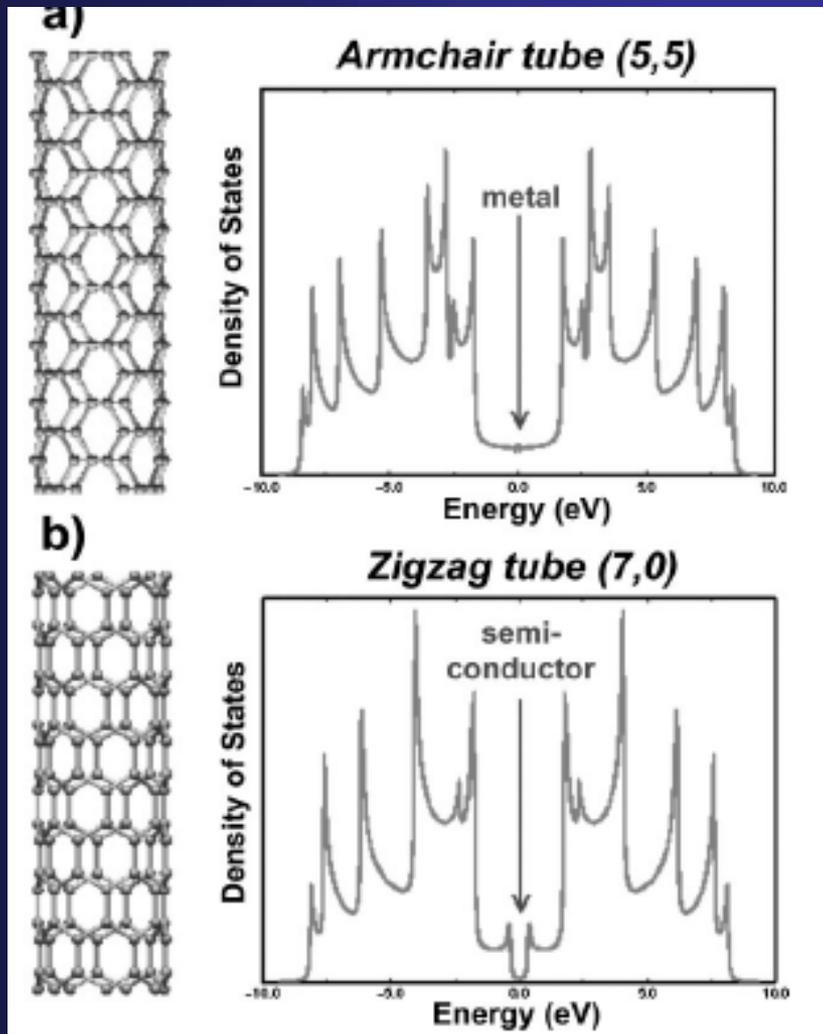


Beebe, P.; Lal, A.; Yu, A.; "A study of carbon nanotubes and their applications in transistors"; 2004

Estrutura dos nanotubos de carbono

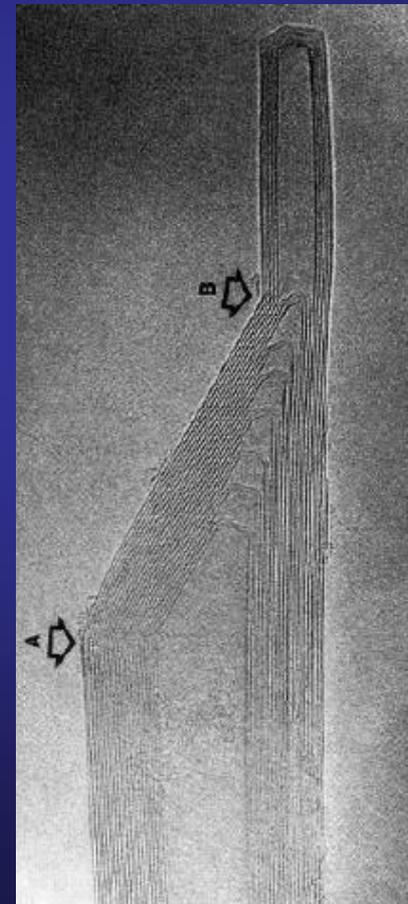
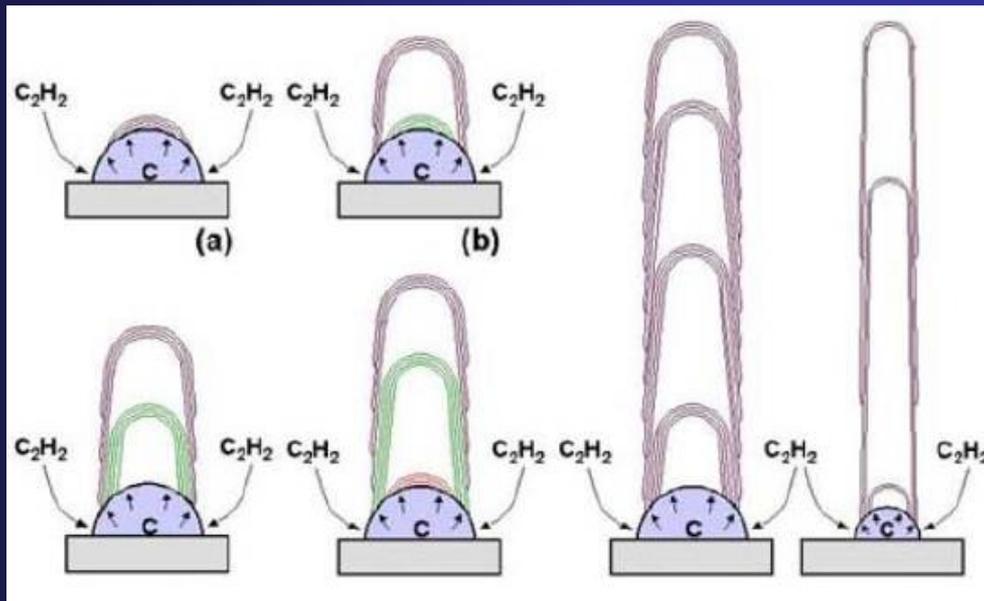
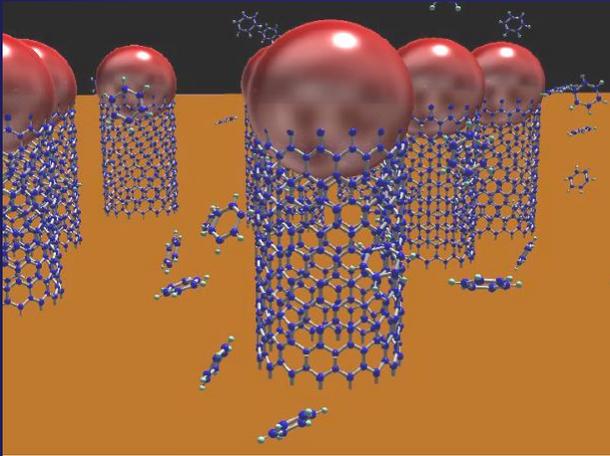


Densidade de estado nos nanotubos



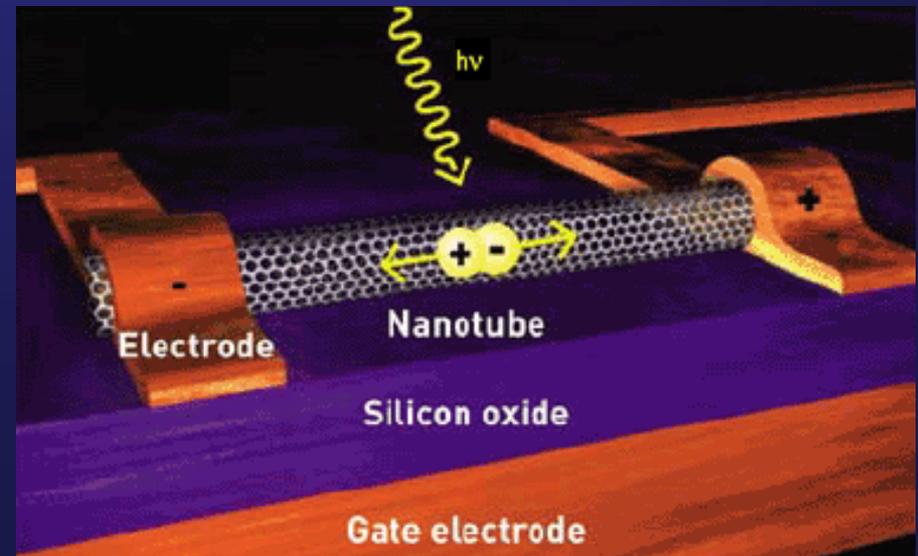
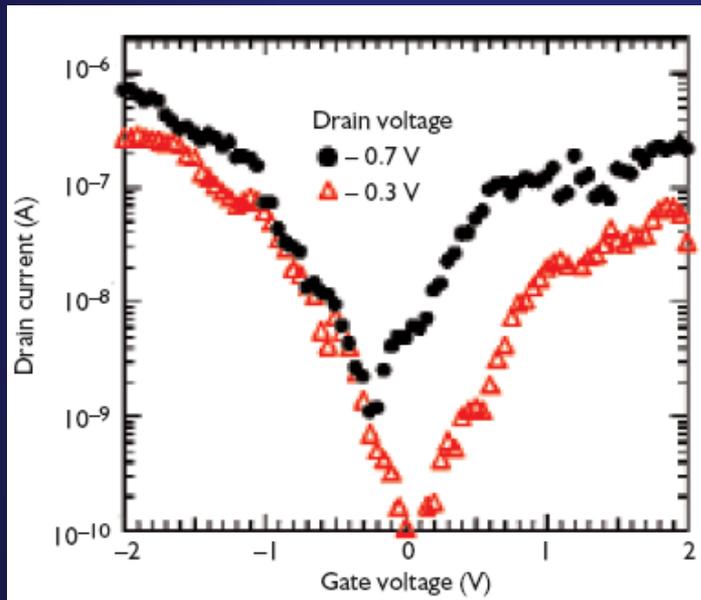
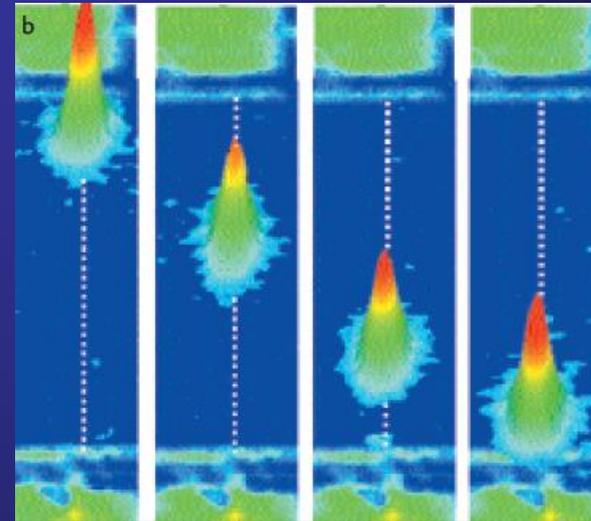
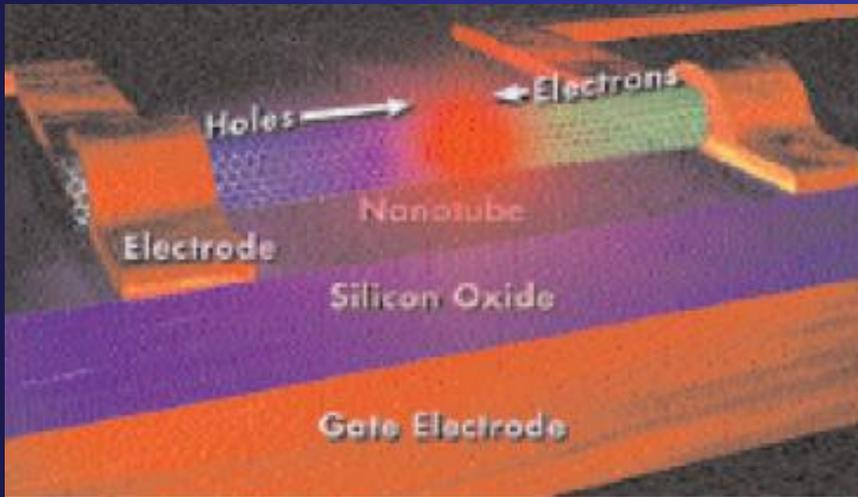
Wolfgang, H.; et al.; “Carbon nanotube application in microelectronics”; IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, v. 27, n. 4, pp. 629, 2004

Crescimento dos nanotubos

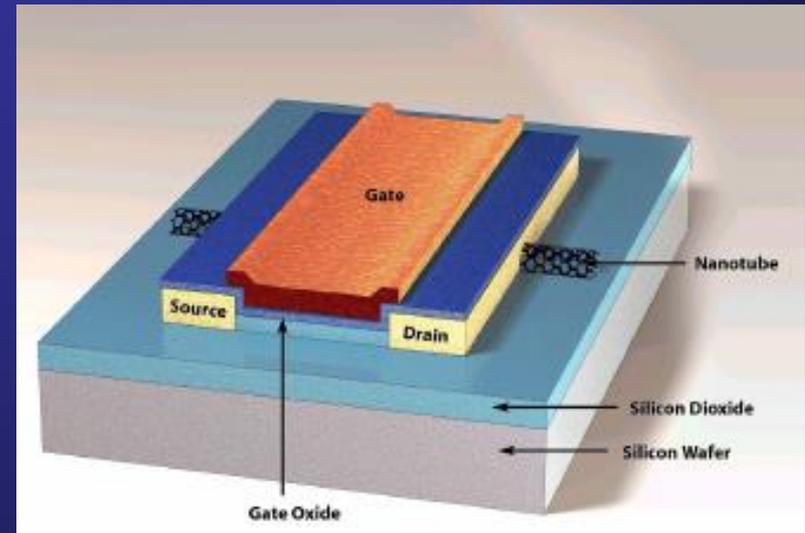
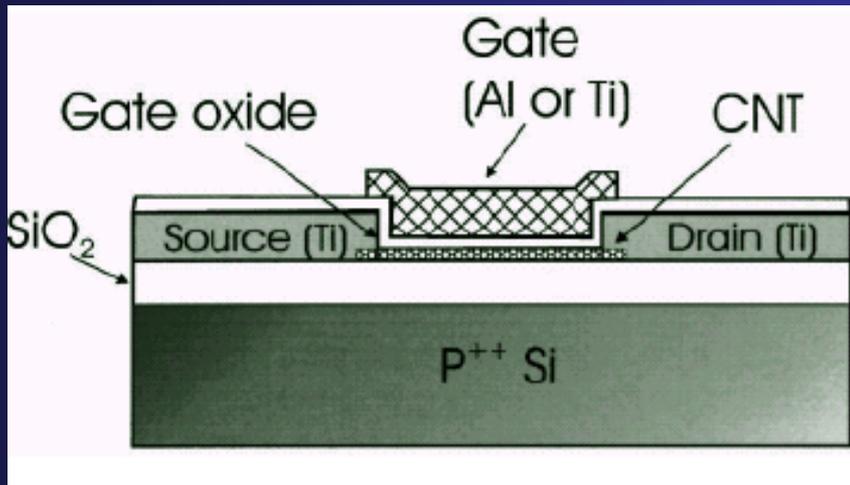


From
Prof. Endo
Japão

condução nos nanotubos

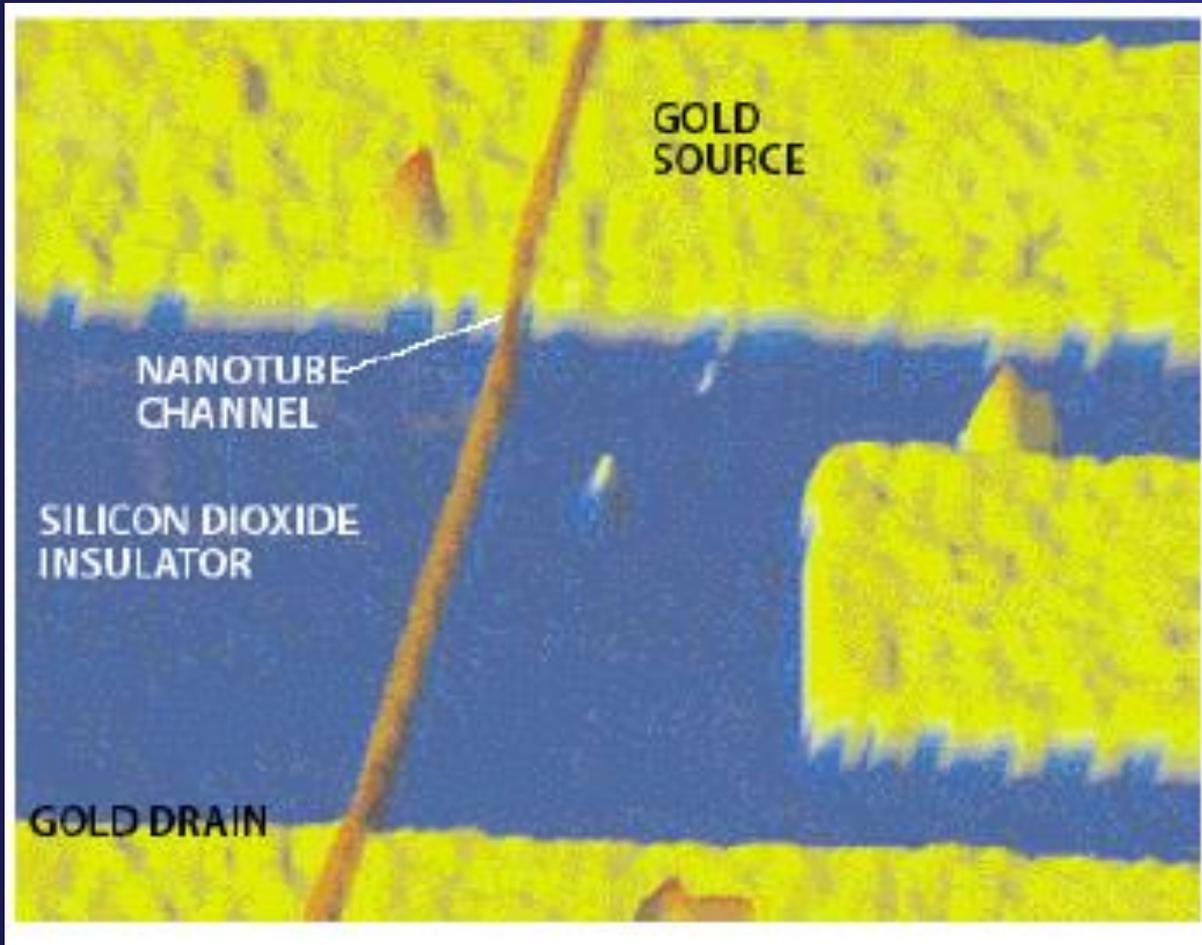


CNT-FET proposto per IBM



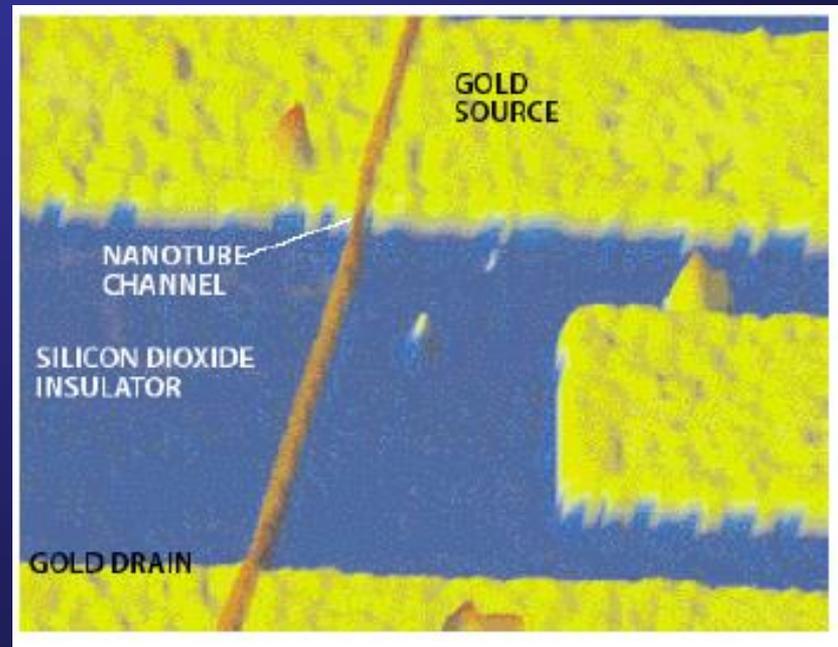
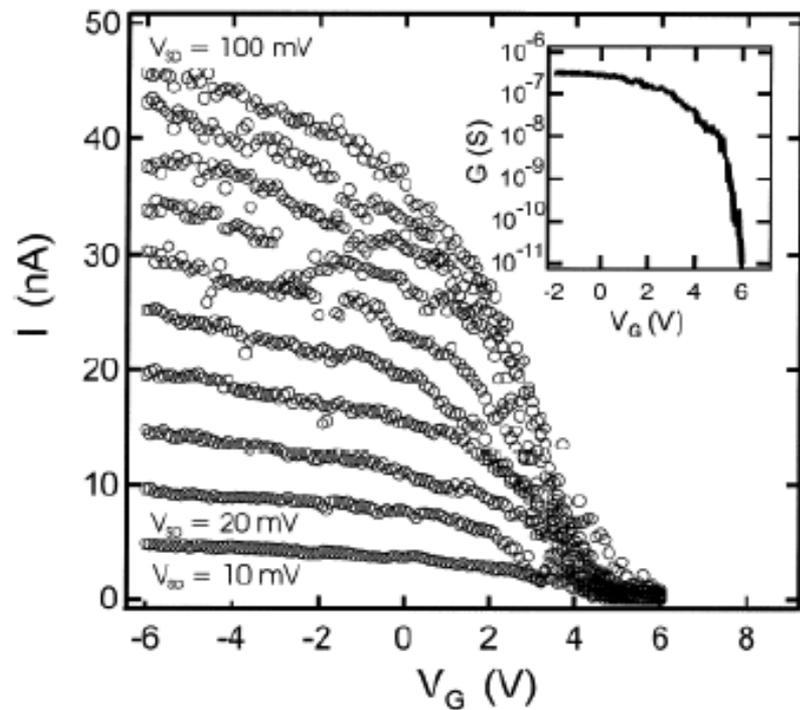
Wind, S. J.; et al.; "Vertical scaling of carbon nanotube field-effect transistors using top gate electrodes", Applied Physics Letters, v. 80, n. 20, pp. 3817-3819, 2002.

Funcionamento do CNT- FET



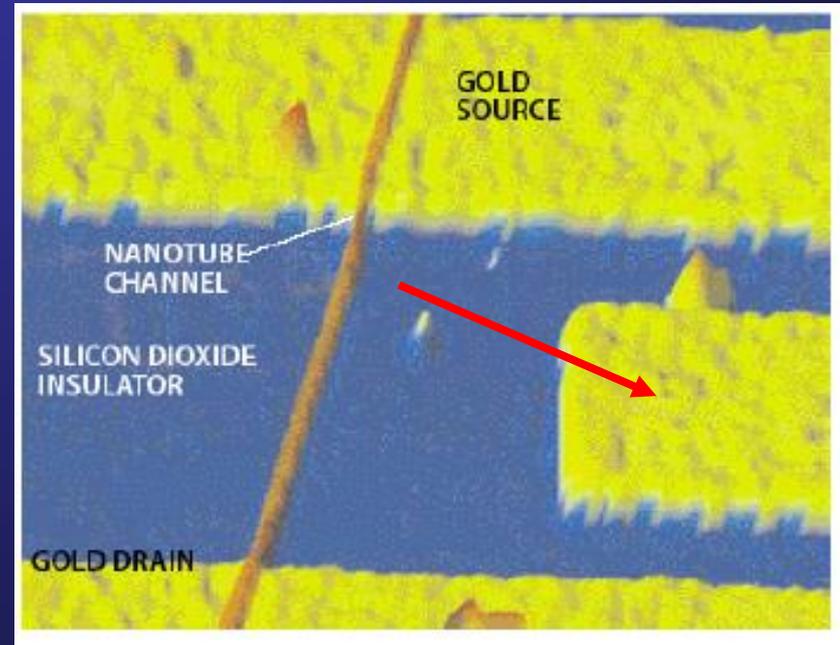
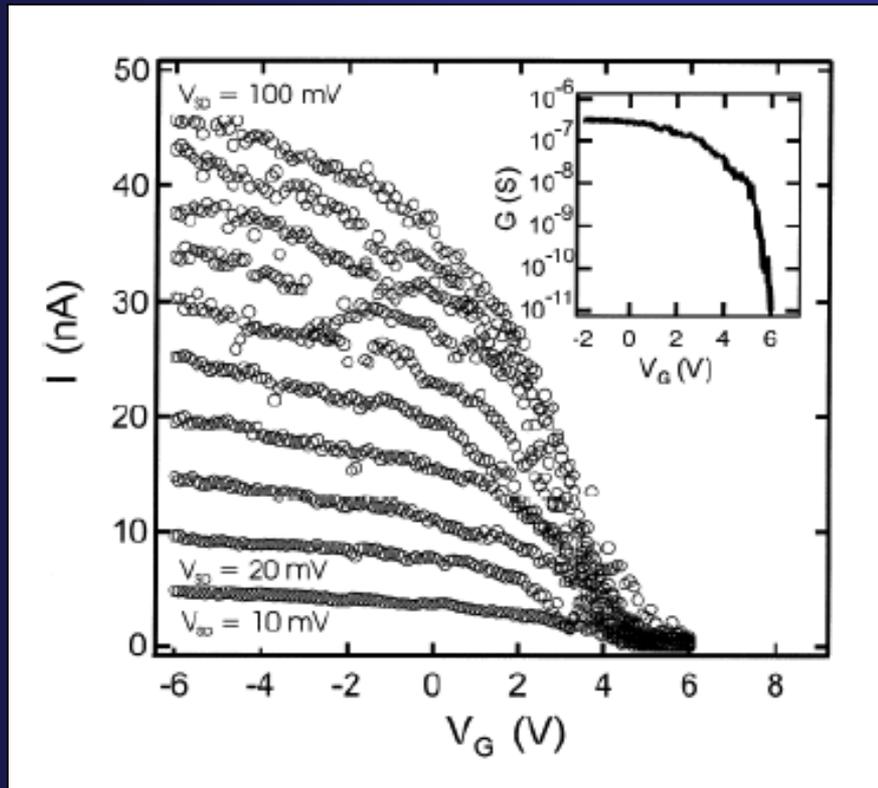
“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”,
ECE497NC Lecture 14,
2004.

Funcionamento do CNT-FET



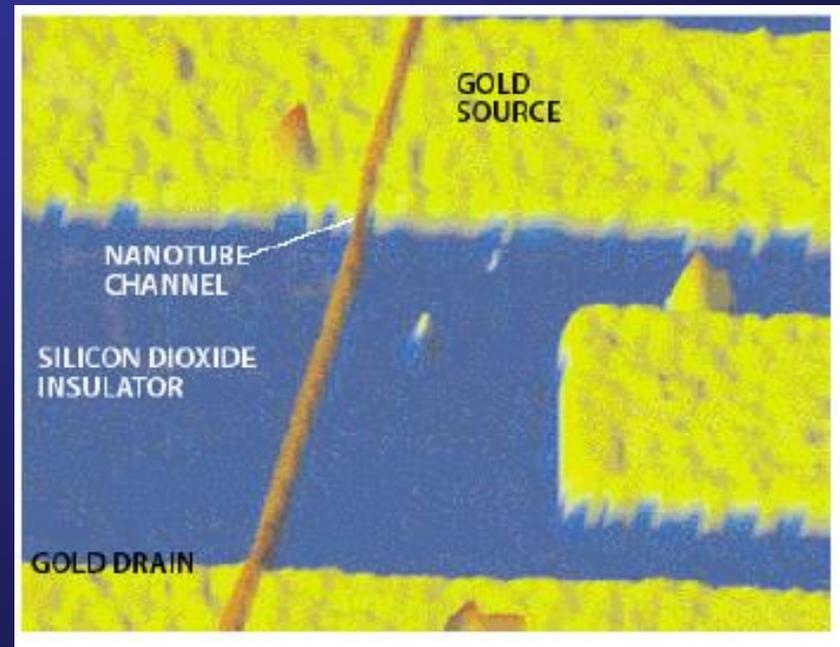
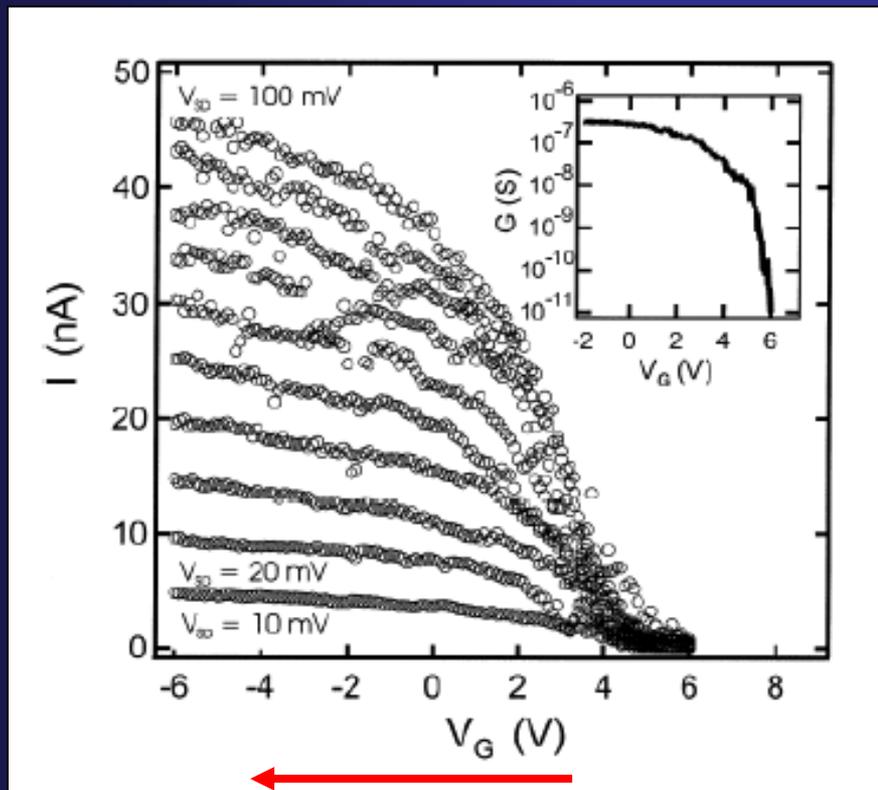
“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”, ECE497NC Lecture 14, 2004.

Funcionamento do CNT-FET



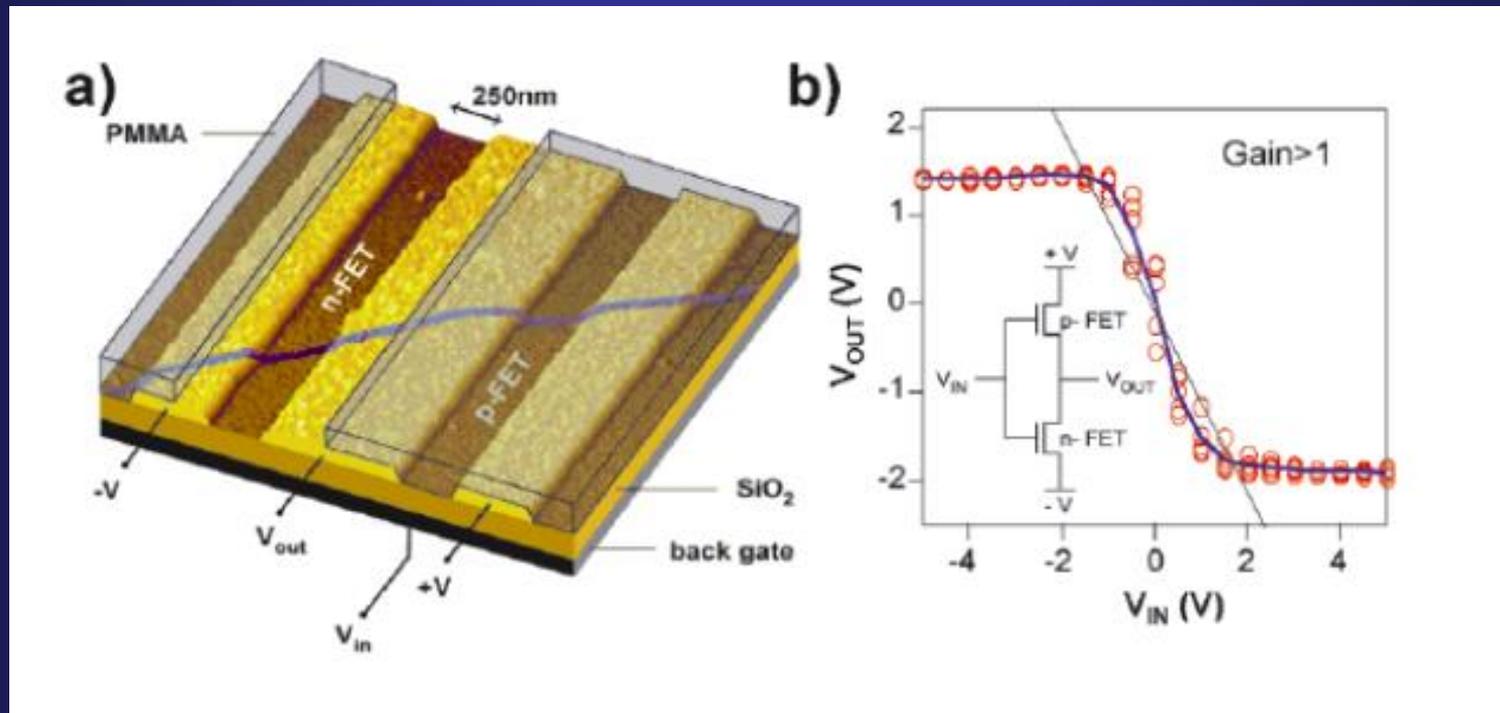
“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”, ECE497NC Lecture 14, 2004.

Funcionamento do CNT-FET



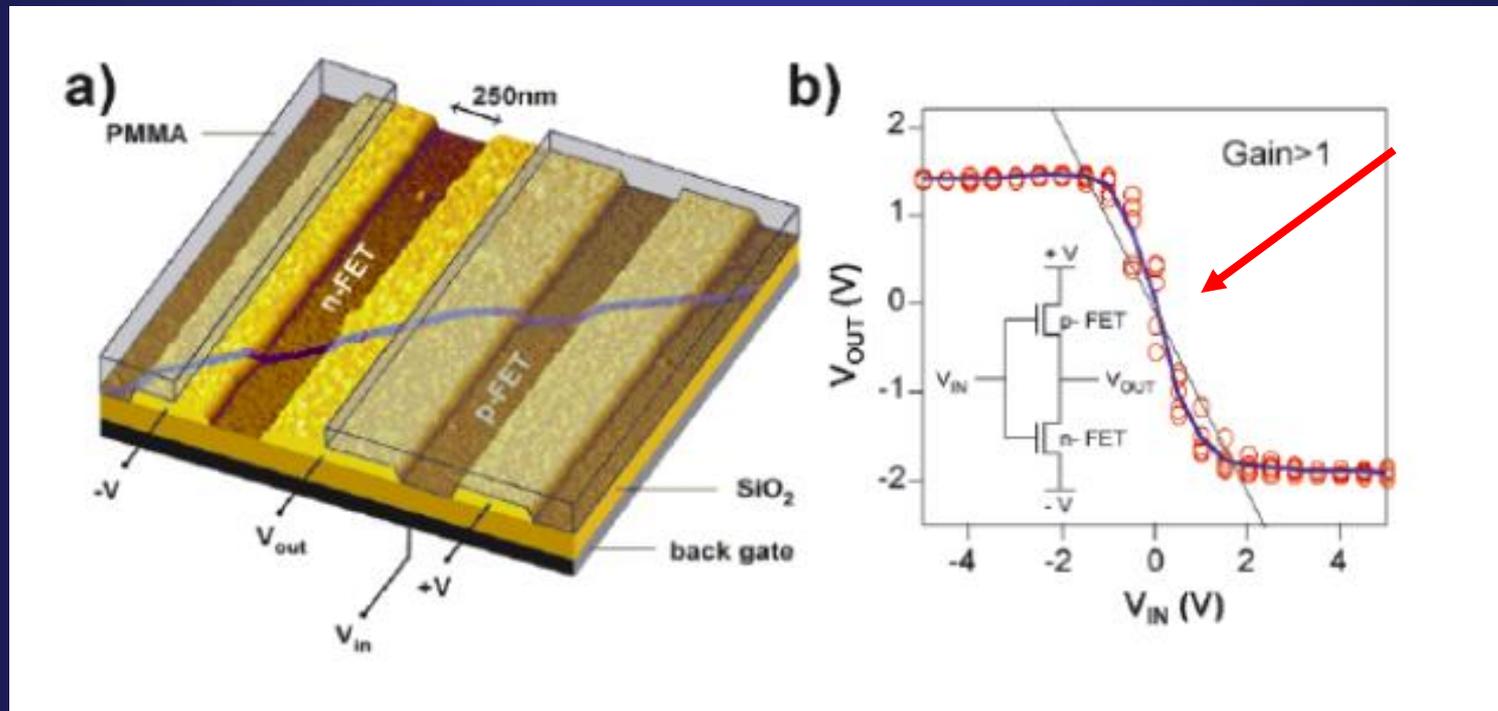
“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”, ECE497NC Lecture 14, 2004.

Inversor CNT-FET



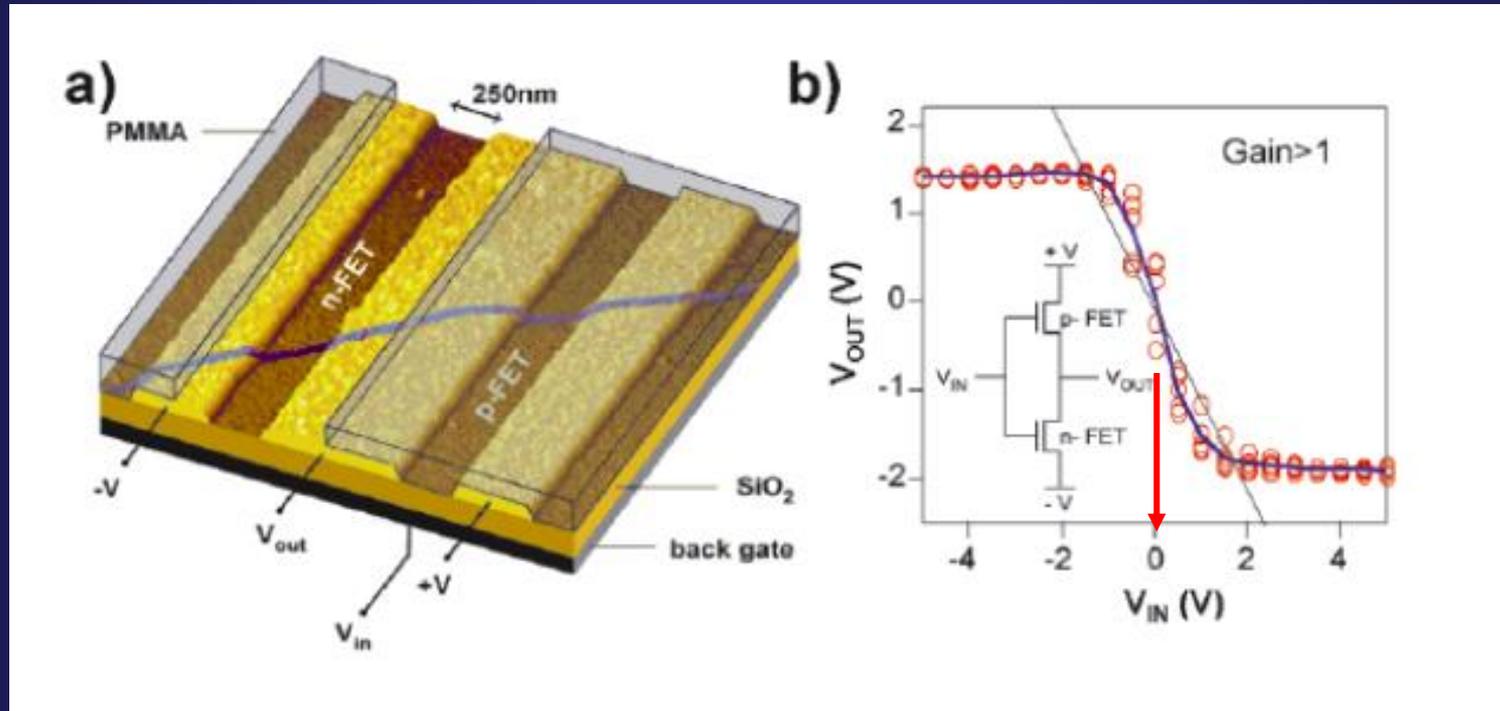
“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”, ECE497NC Lecture 14, 2004.

Inversor CNT-FET



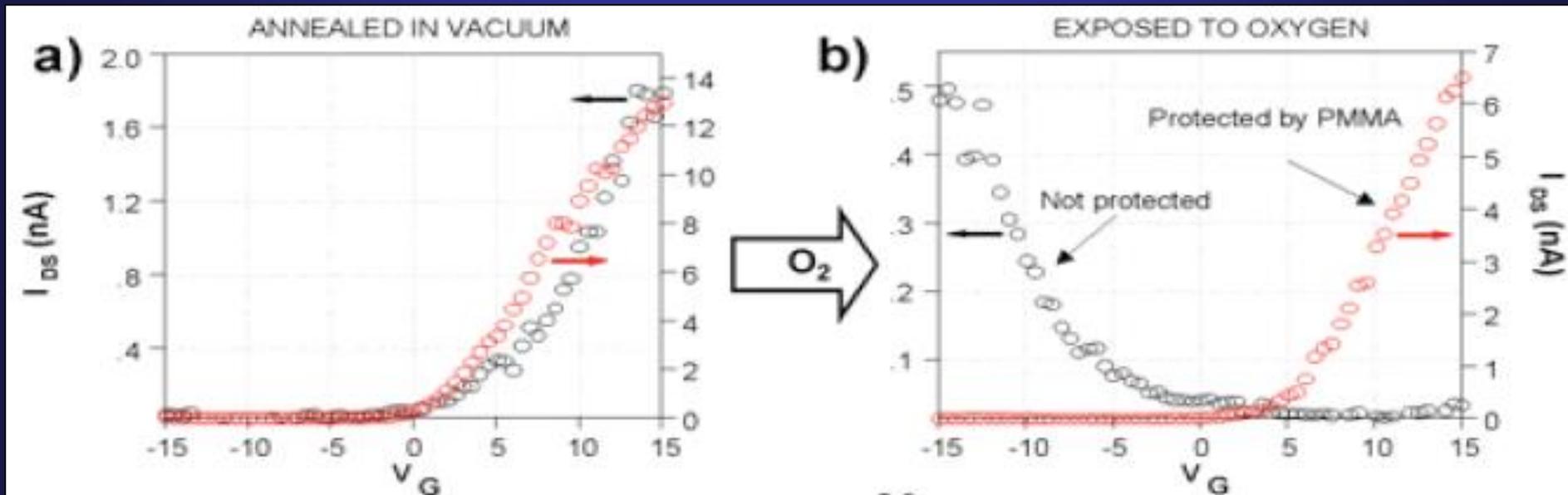
“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”, ECE497NC Lecture 14, 2004.

Inversor CNT-FET



“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”, ECE497NC Lecture 14, 2004.

Inversor CNT-FET



“Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors”, ECE497NC Lecture 14, 2004.

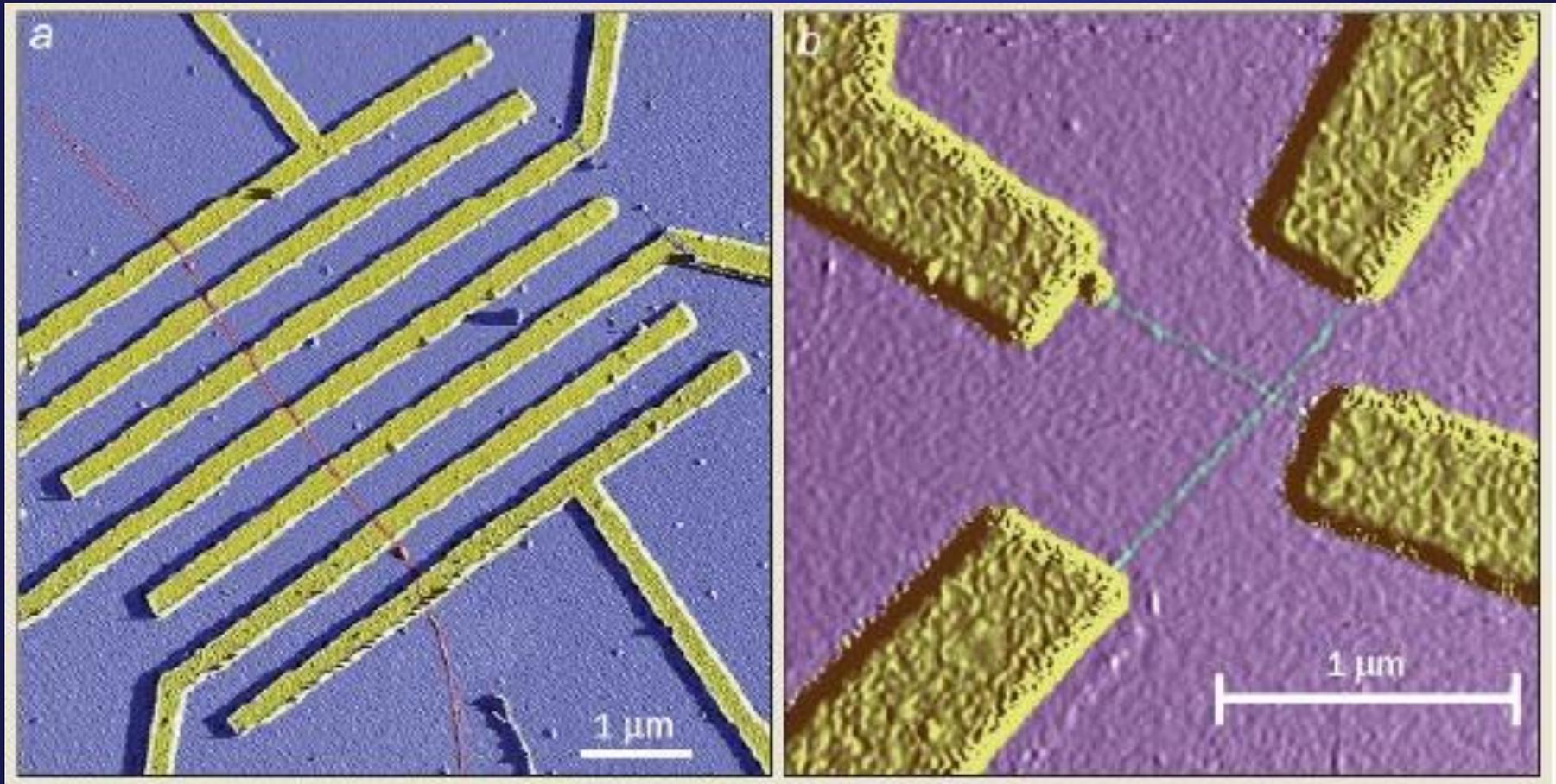
**Comparação das
principais características
dos CNT-FETs e
MOSFETs**

Característica	CNT-FET	Fin-FET	MOS-FET
Corrente I_{ds} (mA/ μm)	3,5	0,45	0,215
Transcondutância	6666	500	360
Resistência em condução ($\Omega/\mu\text{m}$)	360	1442	4186
Comprimento de canal (nm)	2000	10	14
Corrente em corte (nA/ μm)	1	10	100

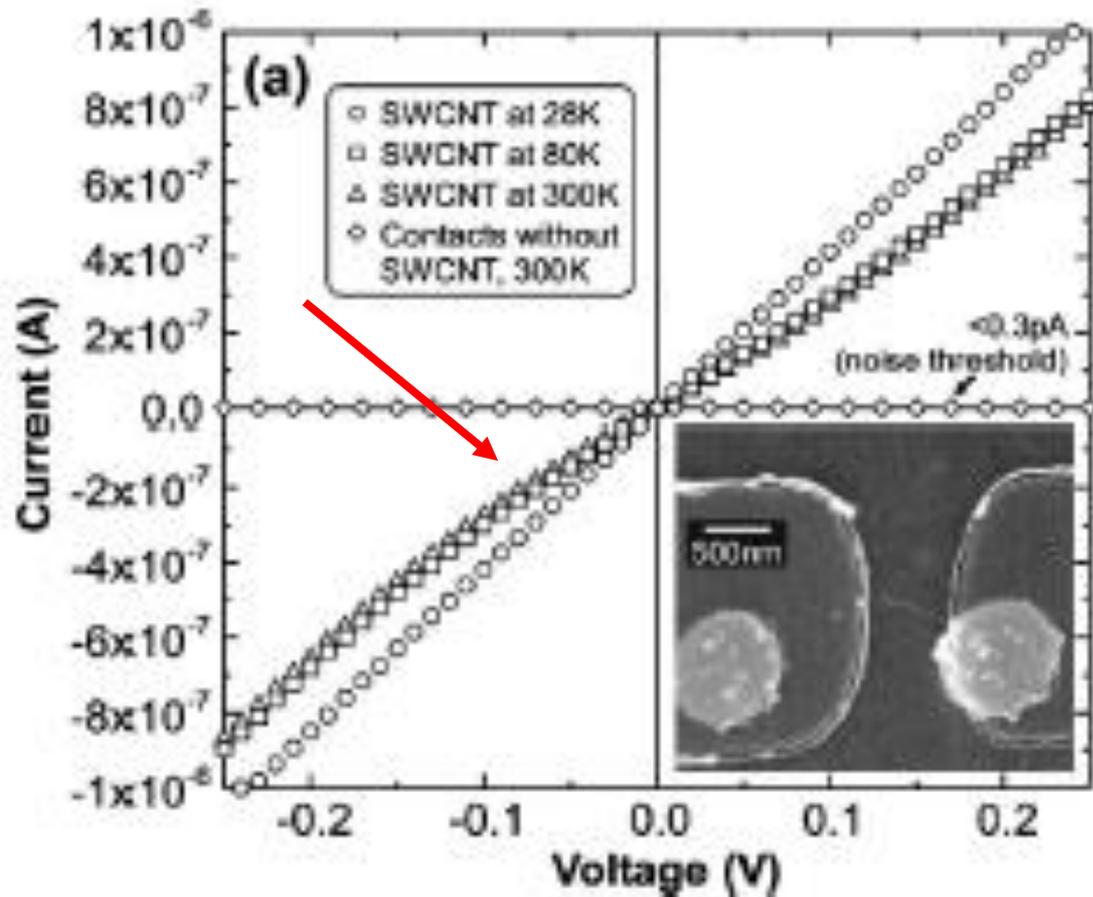
Características dos nanotubos de carbono metálicos

- Ultra alta densidade de corrente 10^{10} A/cm² (Cobre— 10^7 A/cm²);
- Não apresenta eletromigração;
- Baixa resistência ao transporte balístico (fator 15 quando comparado ao cobre);
- Não necessita de barreira de difusão.

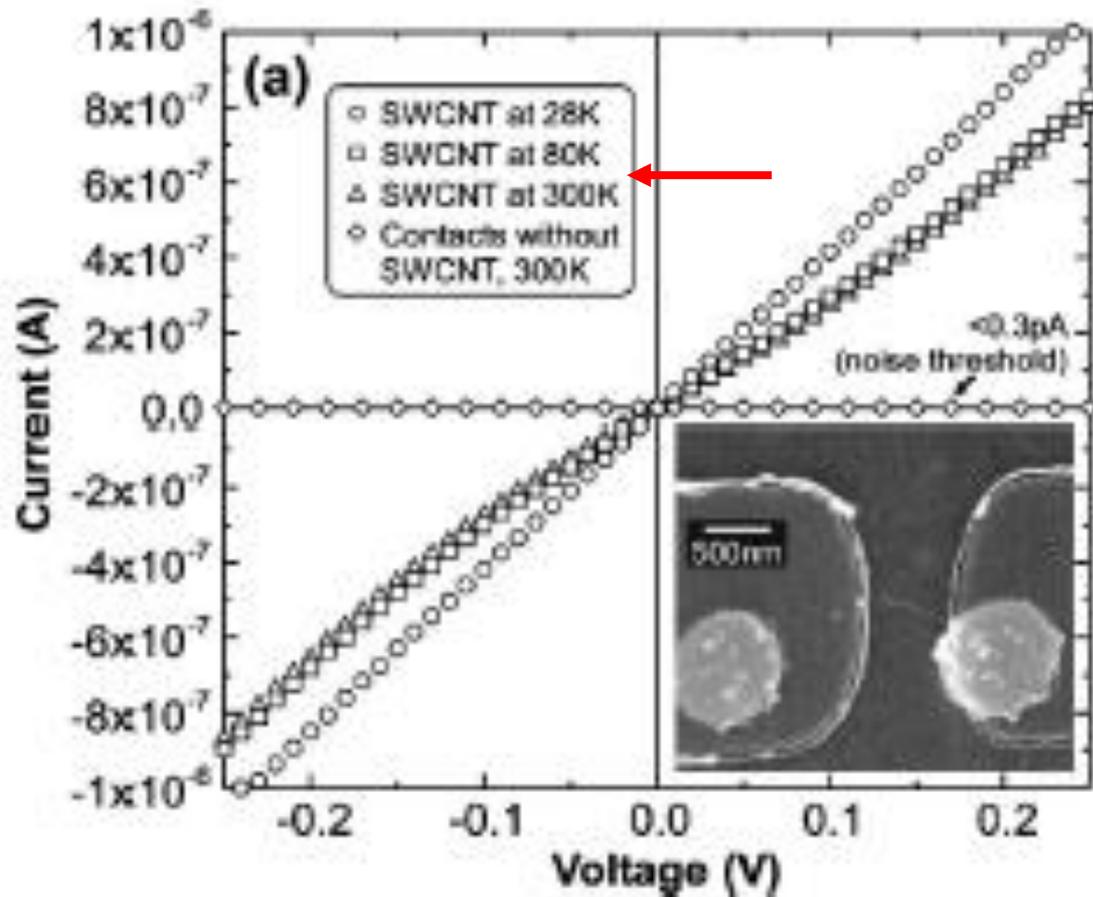
Interconexões em nanotubos de carbono



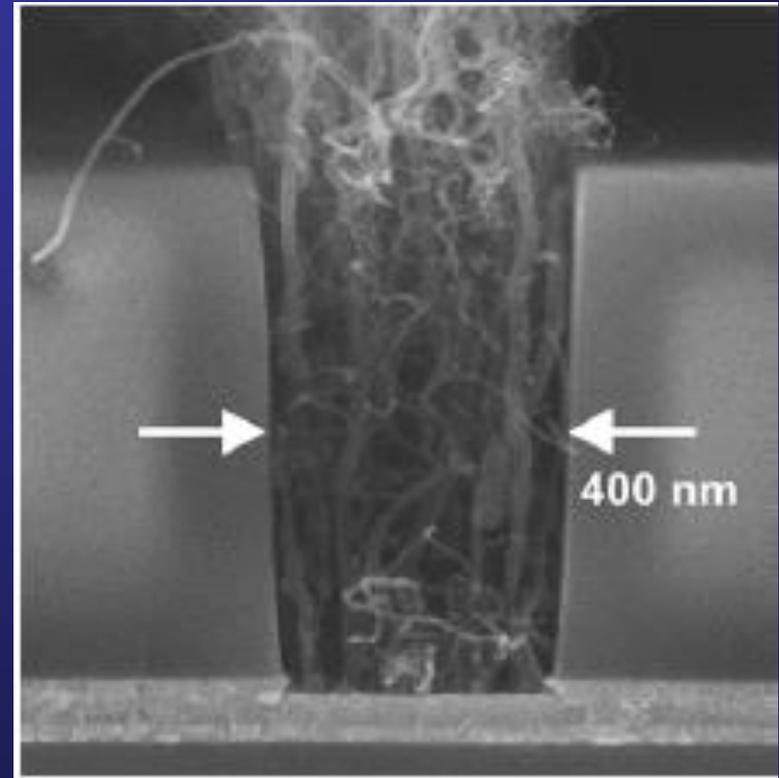
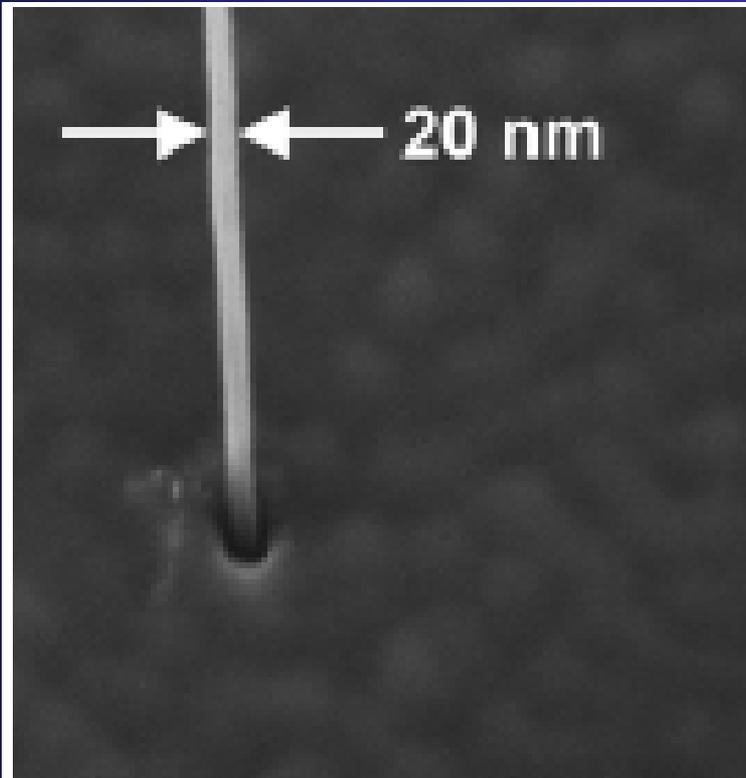
Interconexões em nanotubos de carbono



Interconexões em nanotubos de carbono

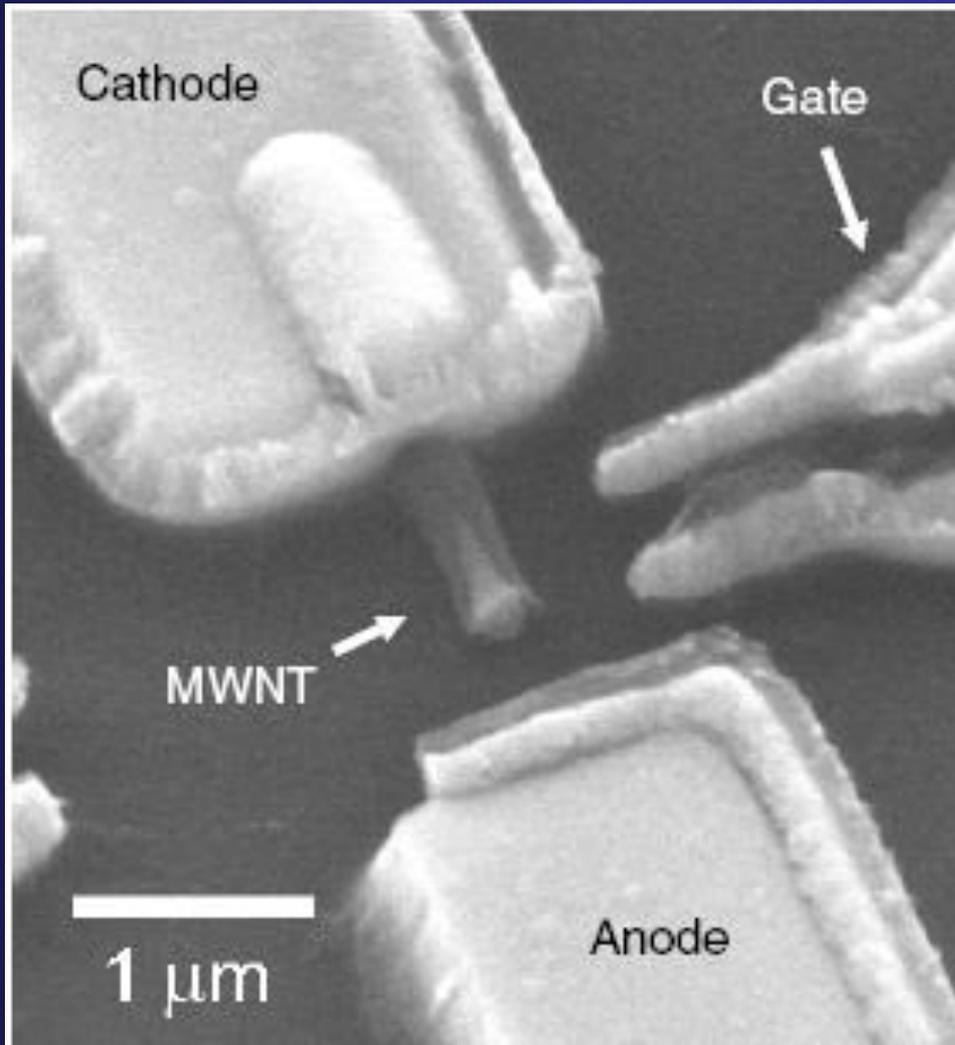


Interconexões em nanotubos de carbono



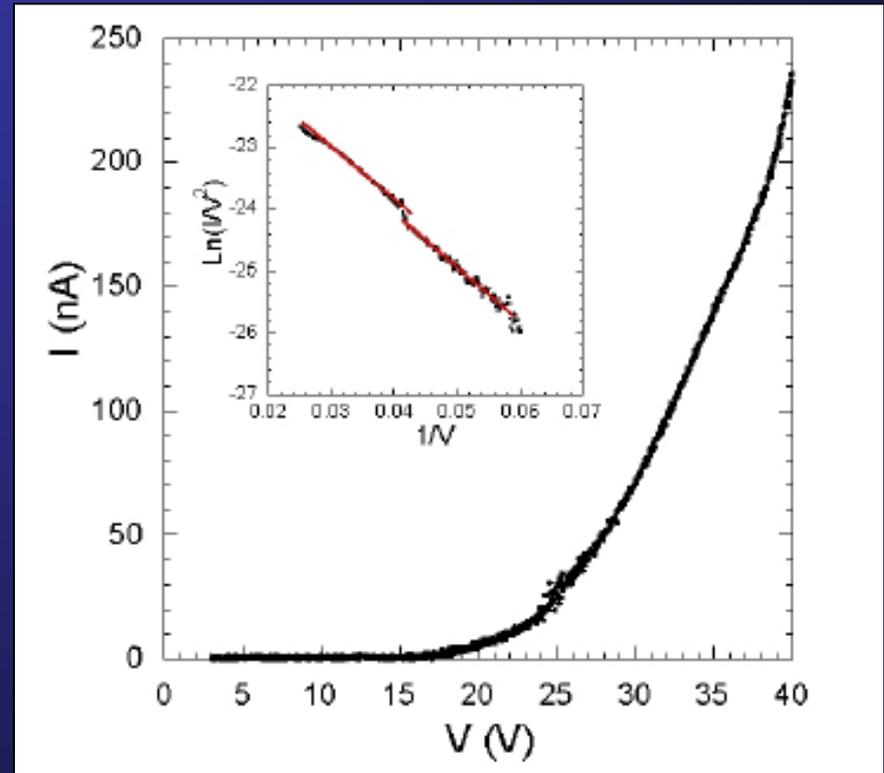
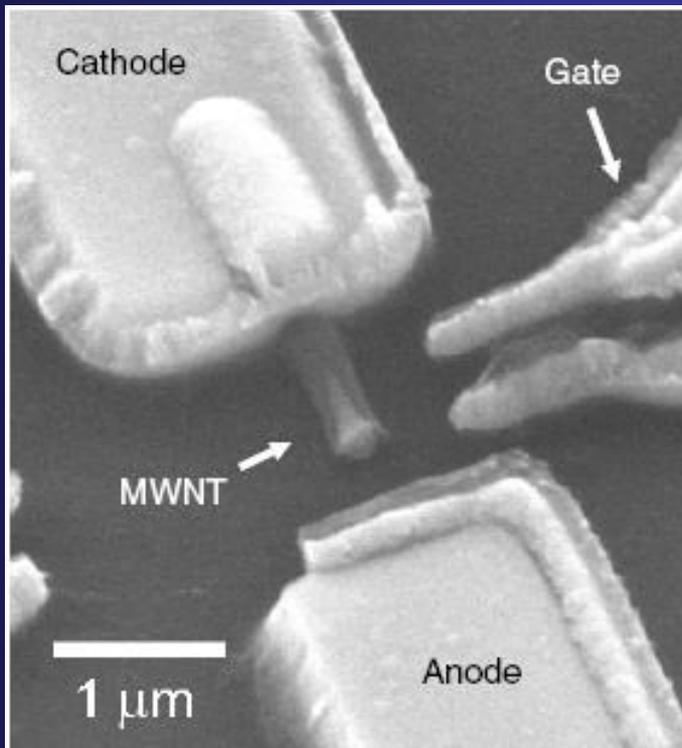
Wolfgang, H.; et al.; "Carbon nanotube application in microelectronics"; IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, v. 27, n. 4, pp. 629, 2004

Microeletrônica em vácuo



Lee, S-B.; et al.;
“Fabrication of carbon
nanotube lateral field
emitters”,
Nanotechnology, v. 14,
pp. 192-195, 2003.

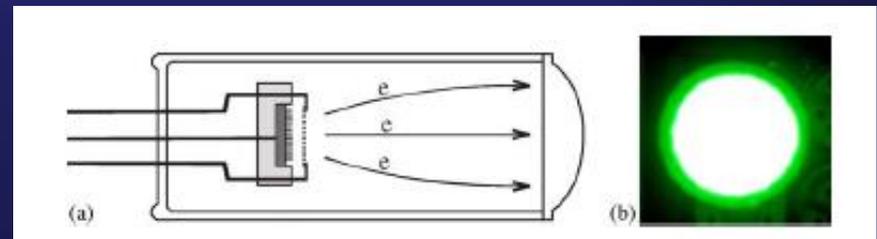
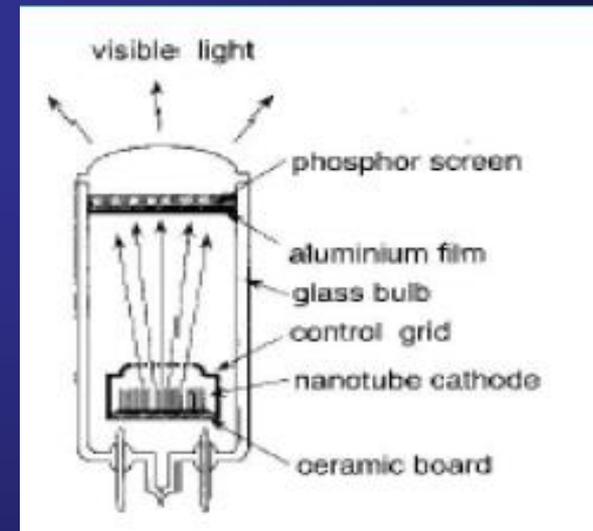
Microeletrônica em vácuo



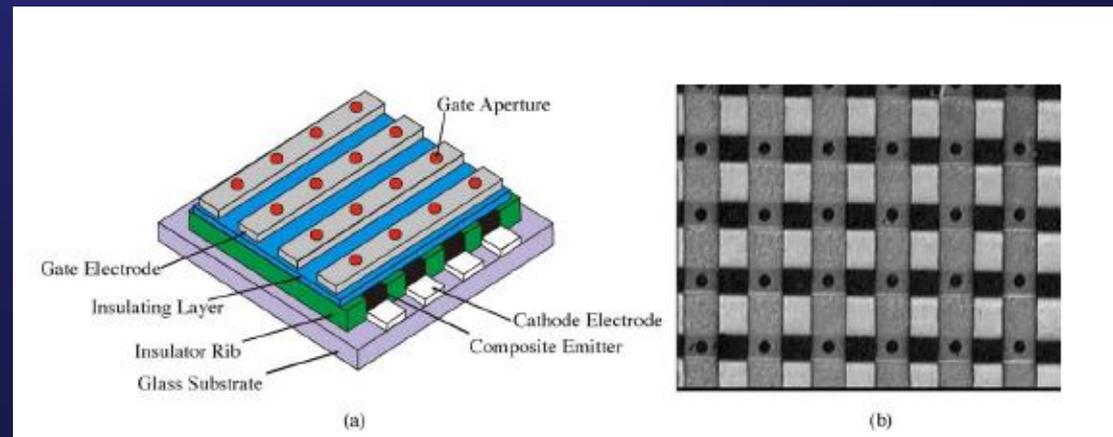
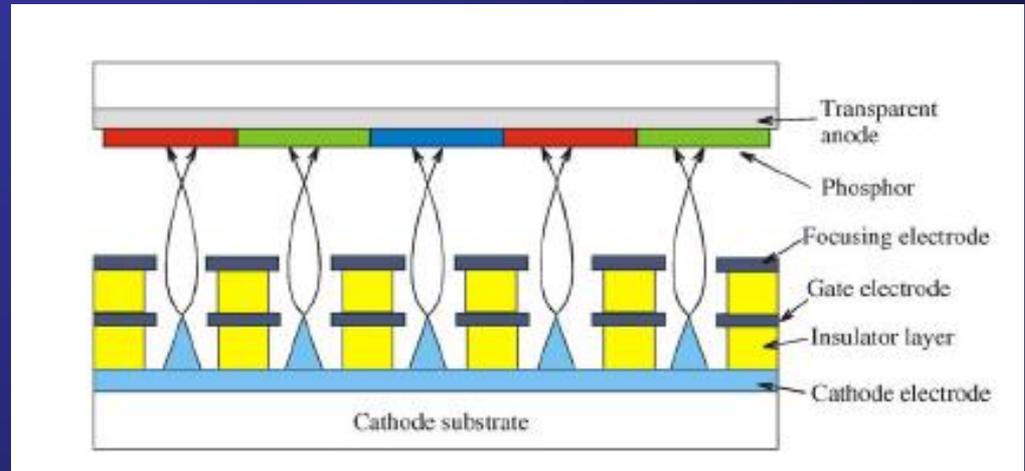
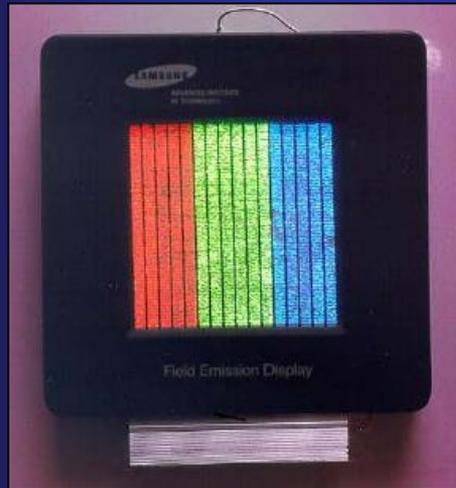
Lee, S-B.; et al.; "Fabrication of carbon nanotube lateral field emitters", Nanotechnology, v. 14, pp. 192-195, 2003.

Emissores de campo

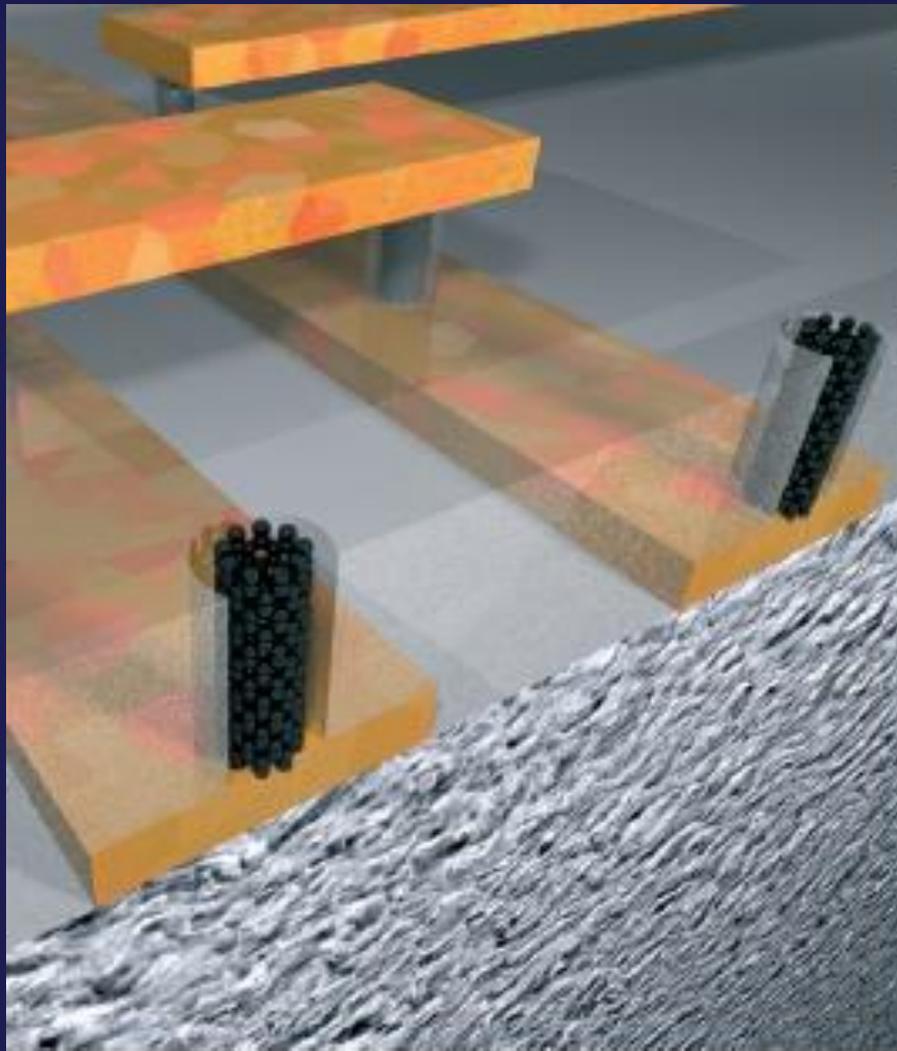
Parameters	Conventional Material	CNTs
Low Threshold	5-100 V/ μm	1-3 V/ μm
Stability at high current density	Unstable > 30mA/cm ²	Stable at 1A/cm ²
Low work function	Intrinsic property of material	
Luminance	X	2X
Large field enhancement factor	Low	High



Protótipo de LCD baseado em nanotubos (Samsung 2002)



Perspectivas Futuras



Carbon nanotubes may serve as vertical interconnects in future microelectronics.

small

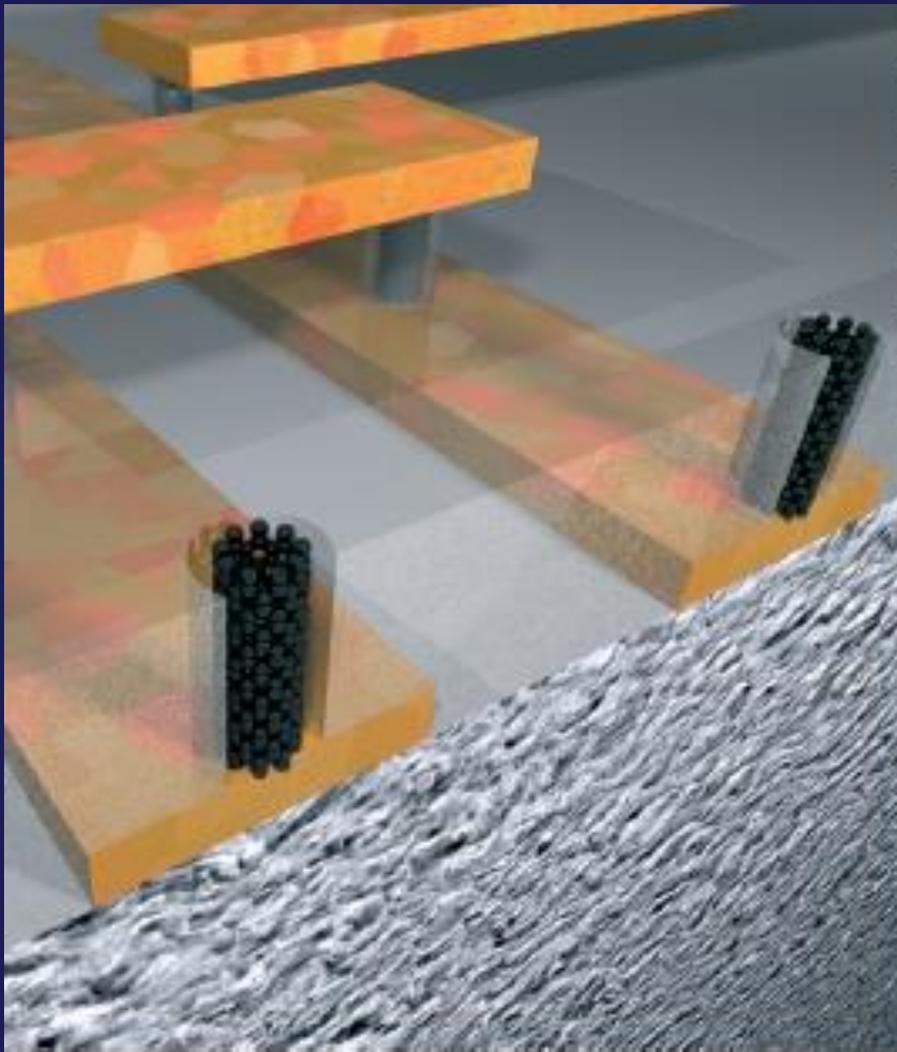
From the Contents

1. Introduction.....	389
2. Physical Properties	389
3. Nanotube Production	388
4. Placement Methods.....	388
5. Interconnects.....	388
6. Transistors.....	387
7. The Vertical CNTFET Concept.....	388
8. The Power CNTFET.....	389
9. Conclusions and Outlook.....	389

Keywords:

- carbon nanotubes
- interconnects
- microelectronics
- transistors

Small 2005, v. 1, n. 4



Carbon nanotubes may serve as vertical interconnects in future microelectronics.

small

From the Contents

1. Introduction.....	389
2. Physical Properties	389
3. Nanotube Production	388
4. Placement Methods.....	388
5. Interconnects.....	388
6. Transistors.....	387
7. The Vertical CNTFET Concept.....	388
8. The Power CNTFET.....	389
9. Conclusions and Outlook.....	389

Keywords:

- carbon nanotubes
- interconnects
- microelectronics
- transistors

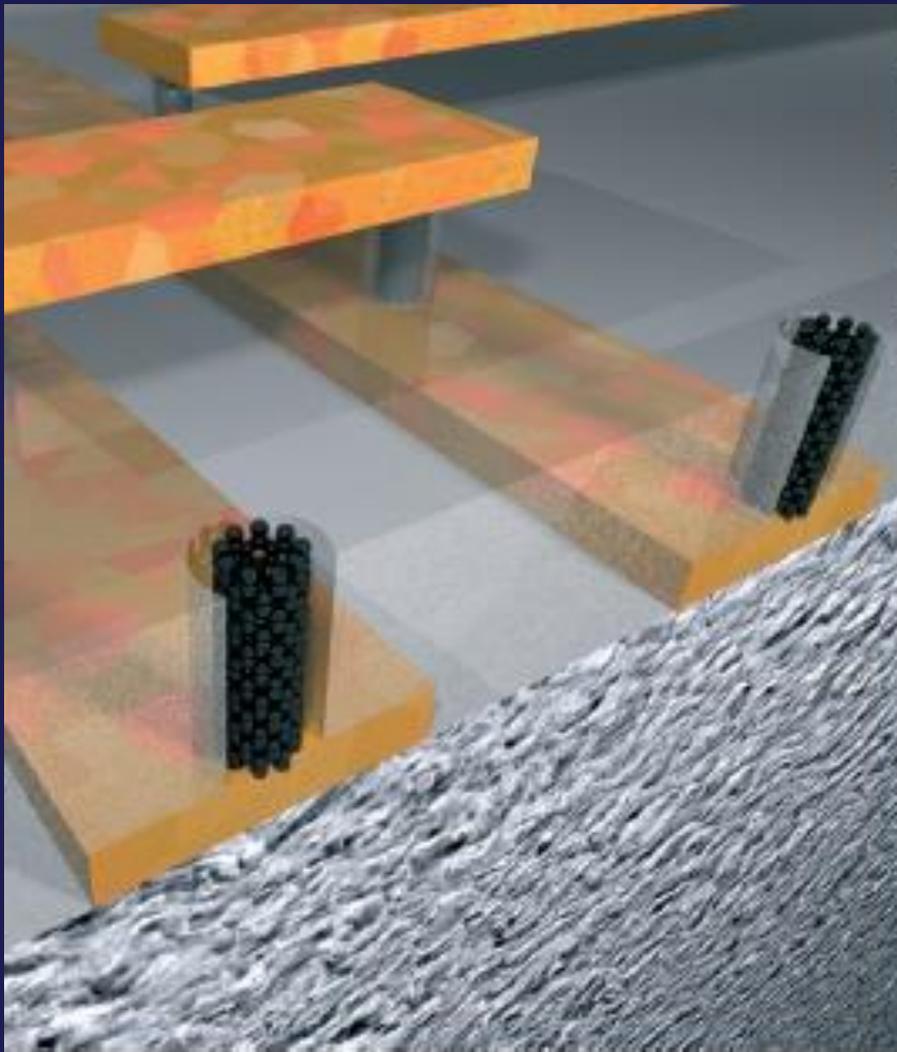
5. Interconnects

6. Transistors

7. The vertical CNTFET

8. The power CNTFET

Small 2005, v. 1, n. 4



Carbon nanotubes may serve as vertical interconnects in future microelectronics.

small

From the Contents

1. Introduction.....	389
2. Physical Properties	389
3. Nanotube Production	388
4. Placement Methods.....	388
5. Interconnects.....	388
6. Transistors.....	387
7. The Vertical CNTFET Concept.....	388
8. The Power CNTFET.....	389
9. Conclusions and Outlook.....	389

5. Interconnects

6. Transistors

7. The vertical CNTFET

8. The power CNTFET

Keywords:

- carbon nanotubes
- interconnects
- microelectronics
- transistors

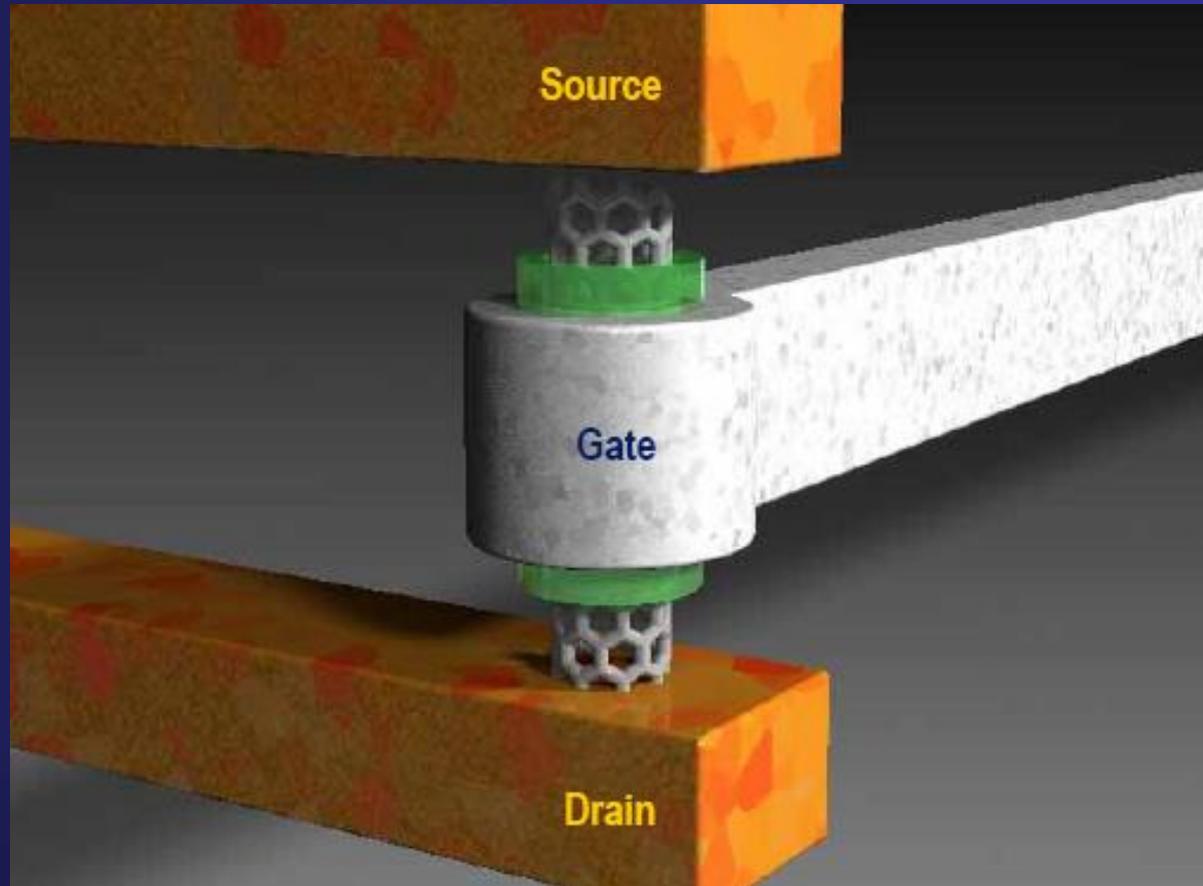
Small 2005, v. 1, n. 4

Fin-FET baseado em nanotubos

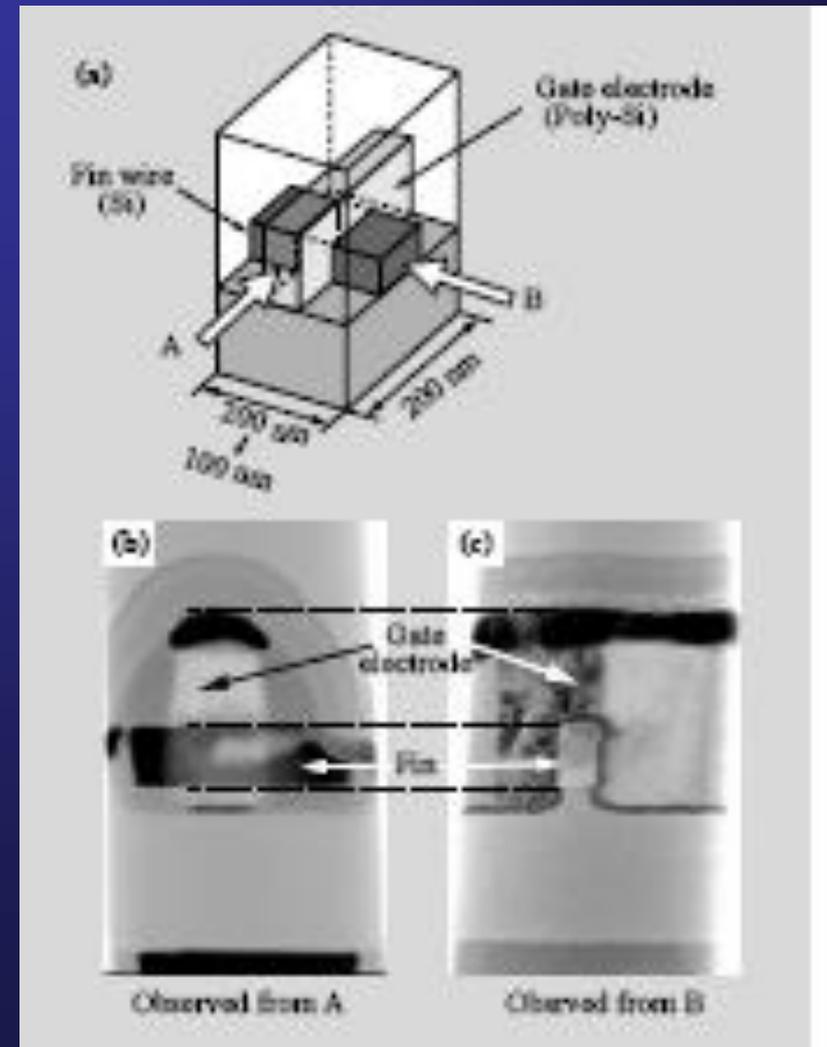
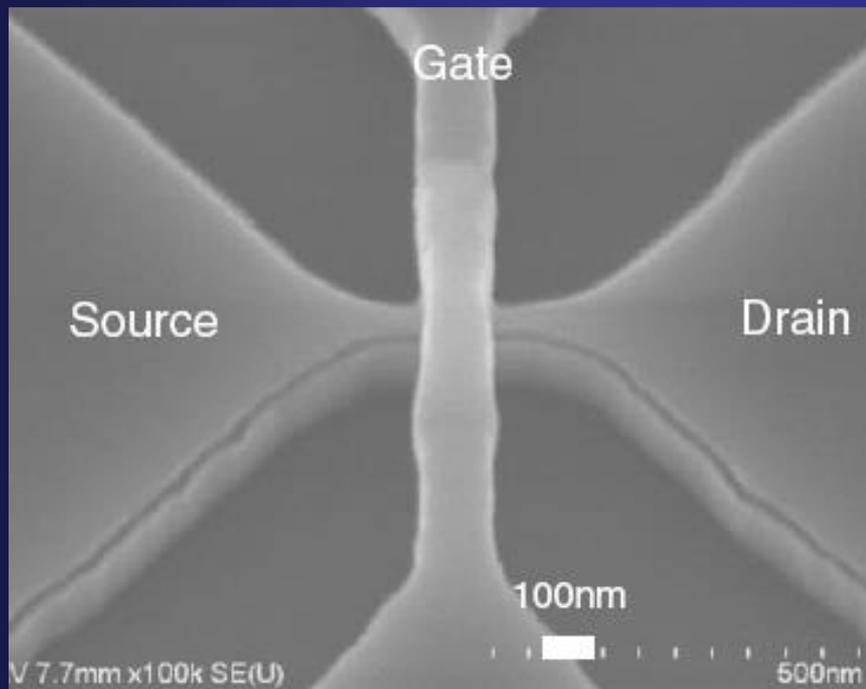


stop thinking
never

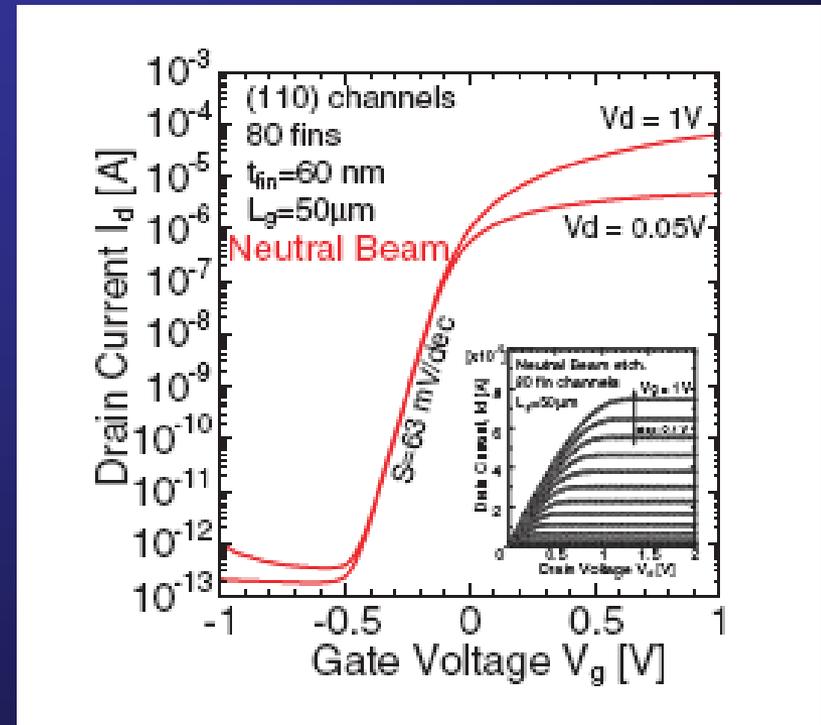
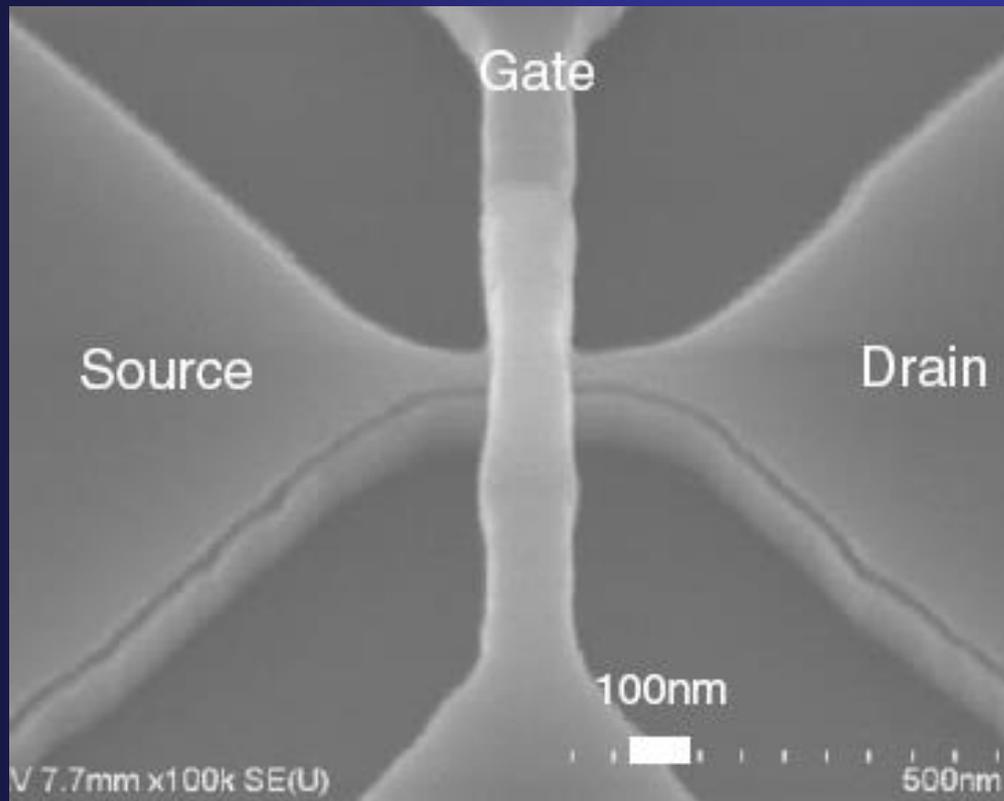
G.S. Düsberg, CPR NP
305. Heraeus Seminar
Nov. 2003



Fin-FET em silício

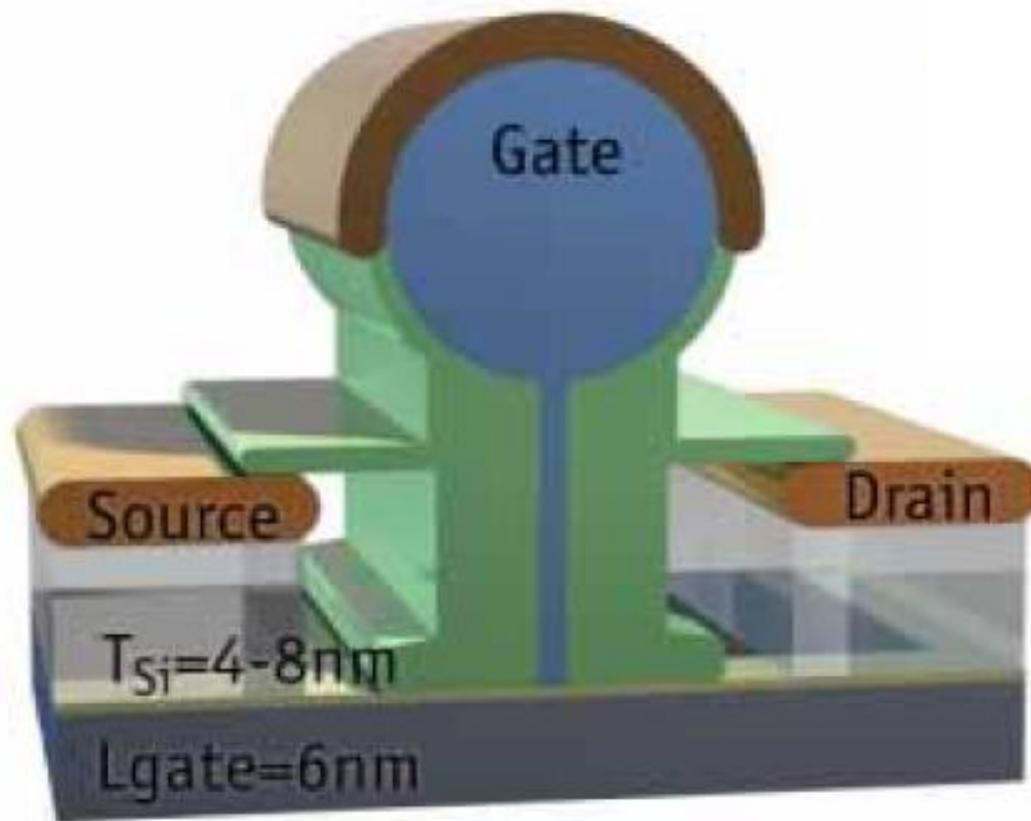


Fin-FET em silício



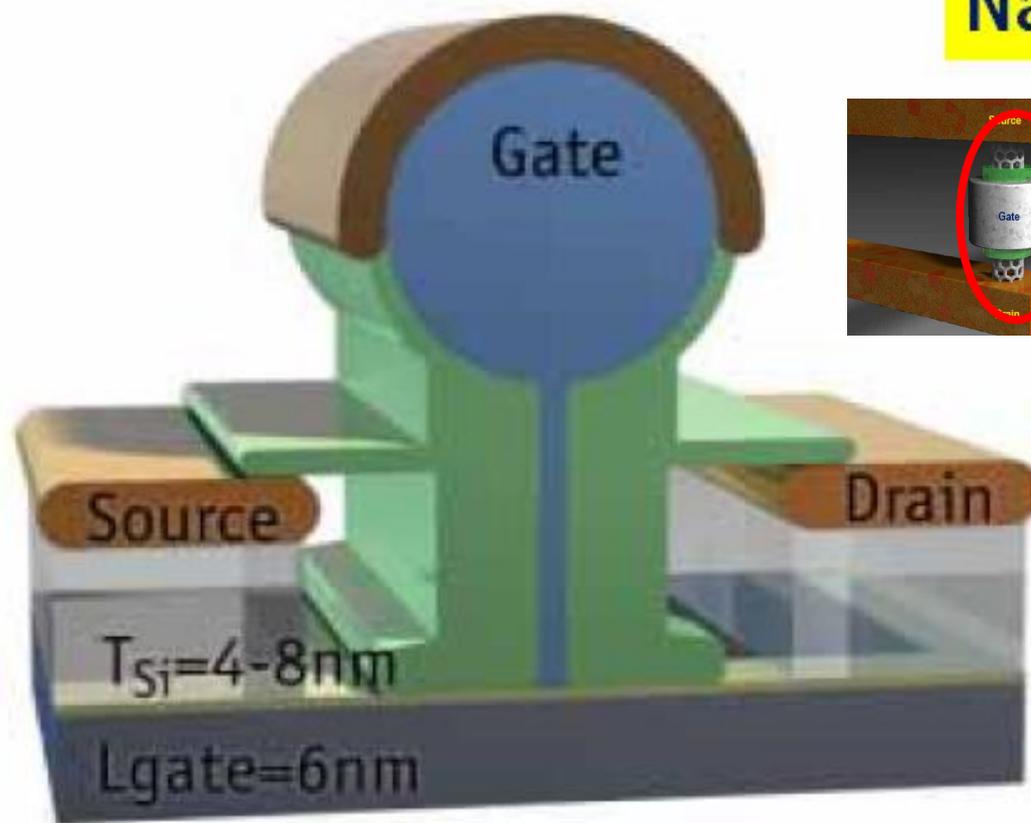
IBM unveils world's smallest transistor

09:05 Monday 9th December 2002
John G. Spooner, CNET News.com

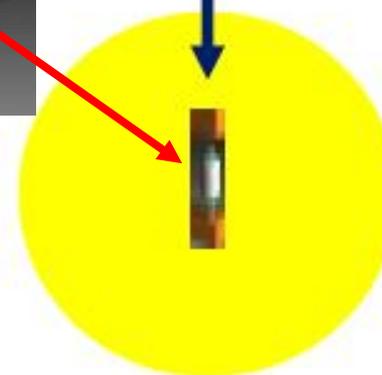
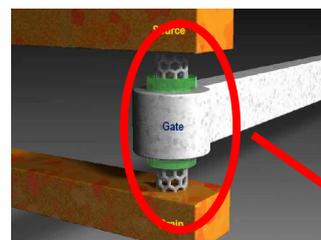


IBM unveils world's smallest transistor

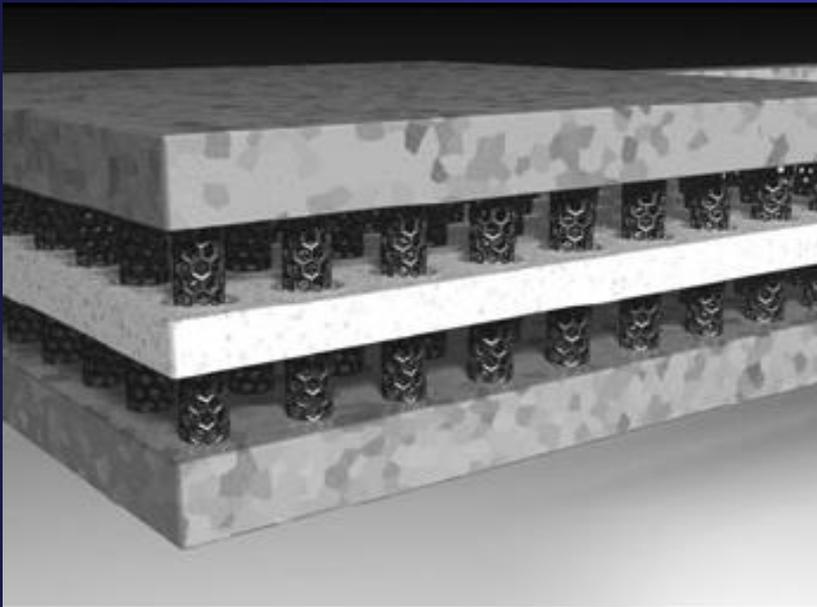
09:05 Monday 9th December 2002
John G. Spooner, CNET News.com



Nanotube-transistor

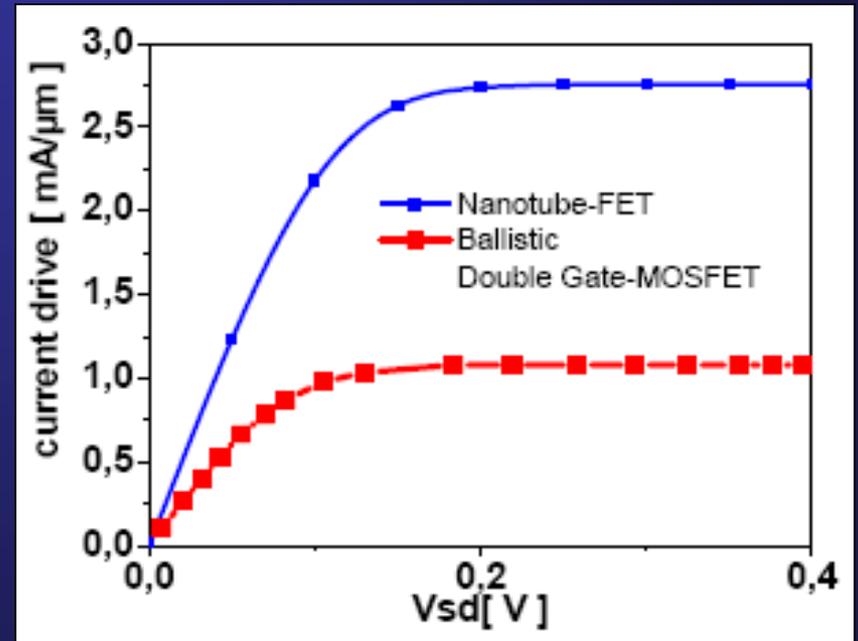
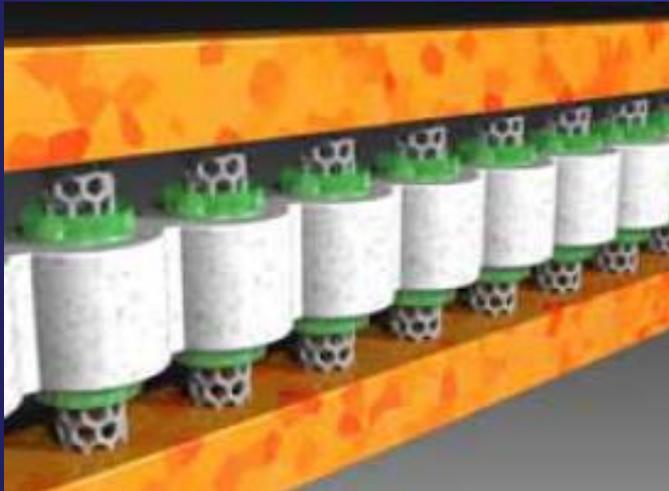


Proposta de VCNT-FETs

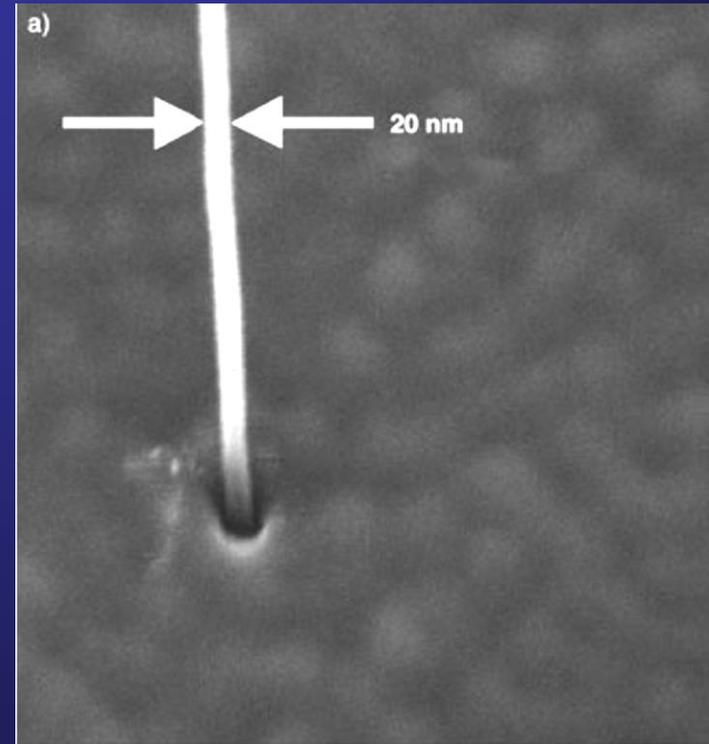
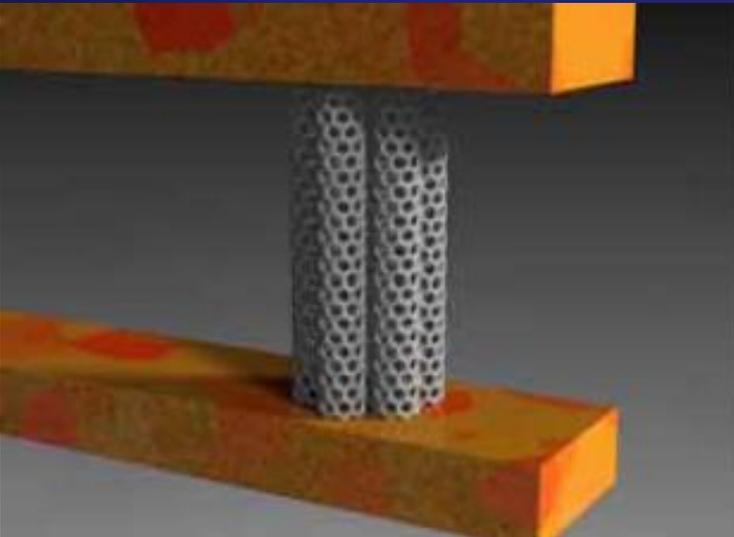
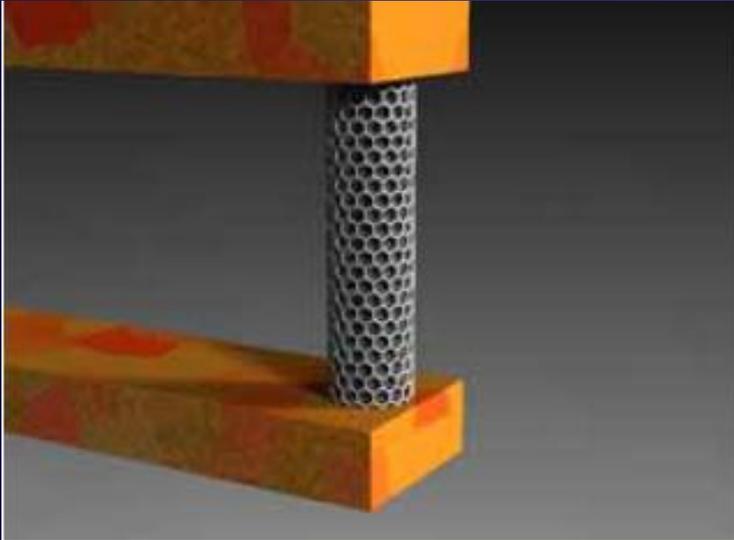


Grahan, A. P.; et al.; "Carbon nanotubes for microelectronics ?", Small 2005, v. 1, n. 4, pp. 382-390

VCNT-FETs



Interconexões em nanotubos



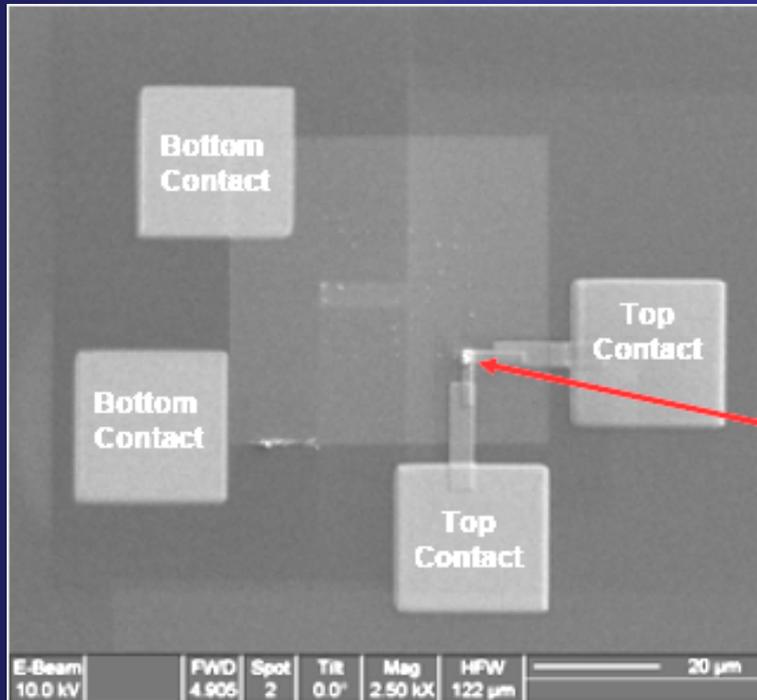
Grahan, A. P.; et al.; "Carbon nanotubes for microelectronics ?", Small 2005, v. 1, n. 4, pp. 382-390

Interconexões em nanotubos



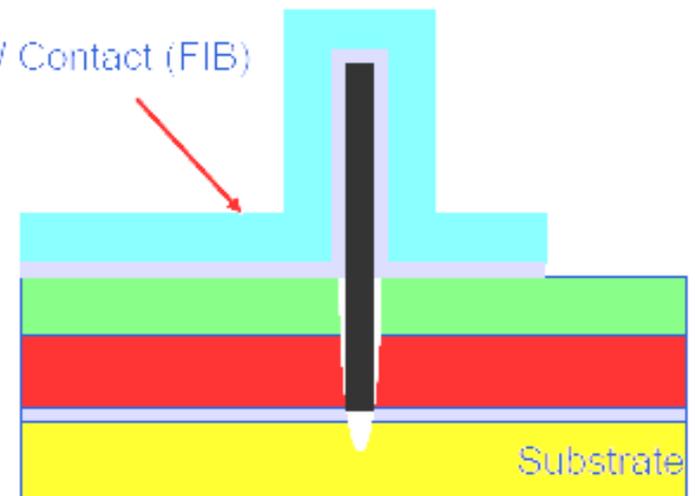
stop thinking
never

G.S. Düsberg, CPR NP
305. Heraeus Seminar
Nov. 2003

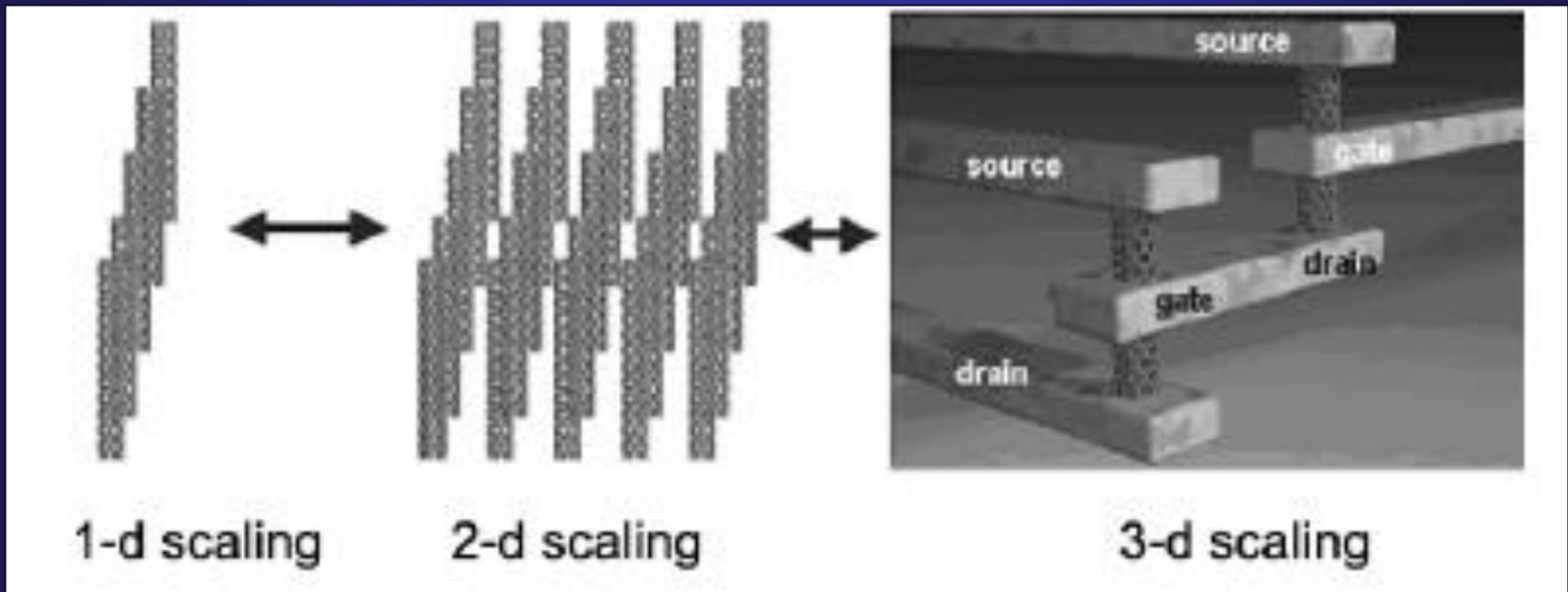


Top Contact to Individual Carbon Nanotubes made using FIB Deposition and Milling of a Ta/W Contact Layer

Ta/W Contact (FIB)

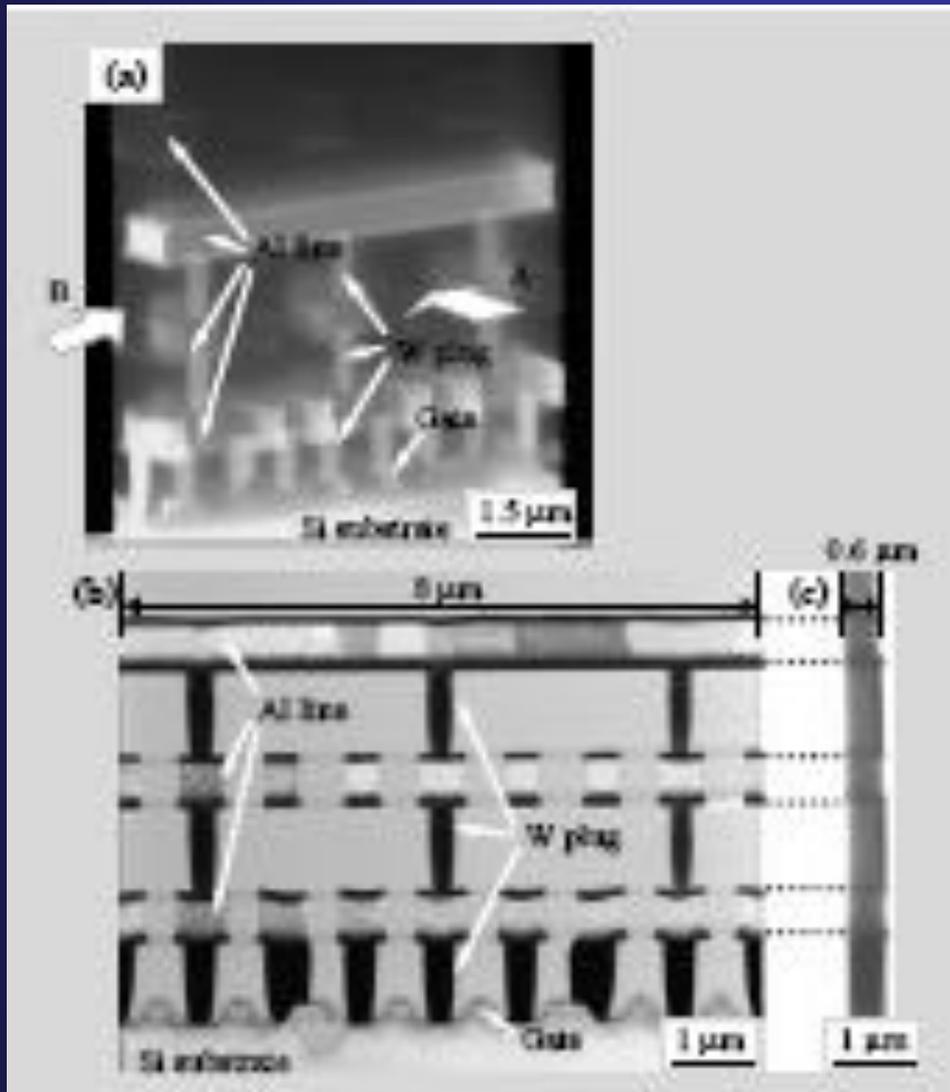


Estruturas baseadas em CNTs



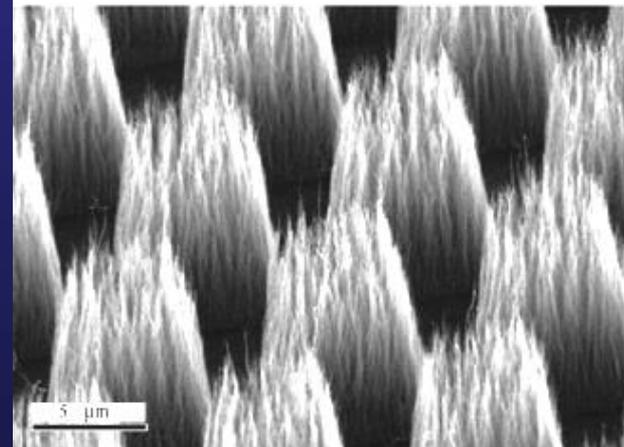
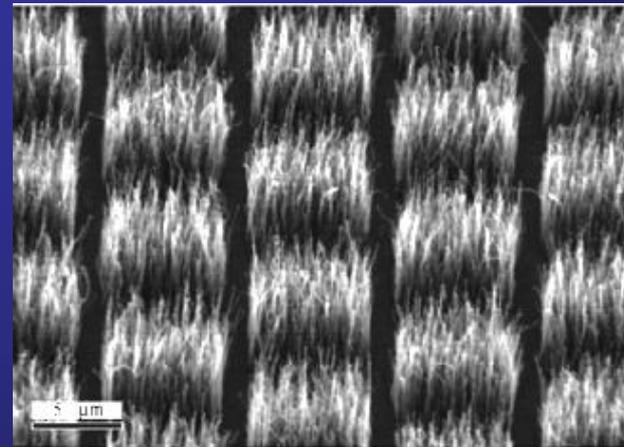
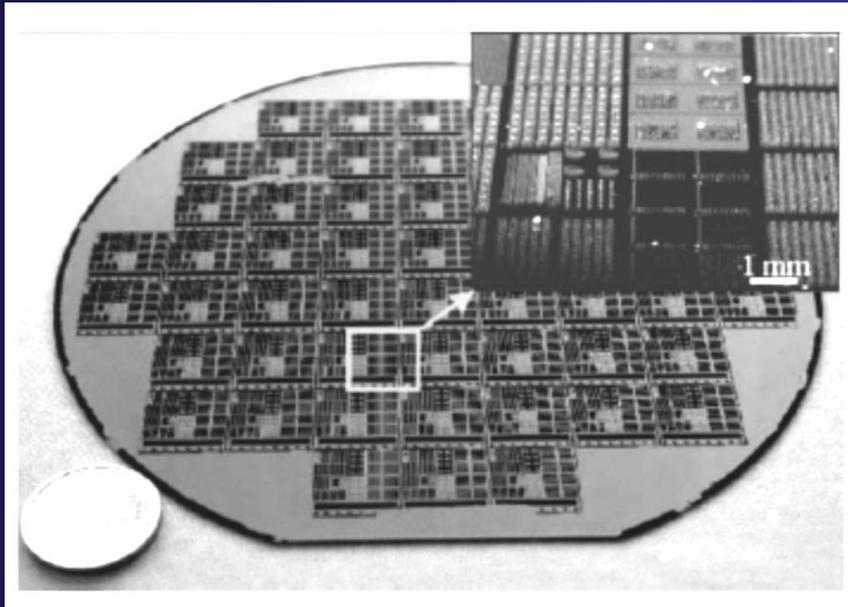
Grahan, A. P.; et al.; "Carbon nanotubes for microelectronics ?", Small 2005, v. 1, n. 4, pp. 382-390

Estruturas baseadas em CNTs



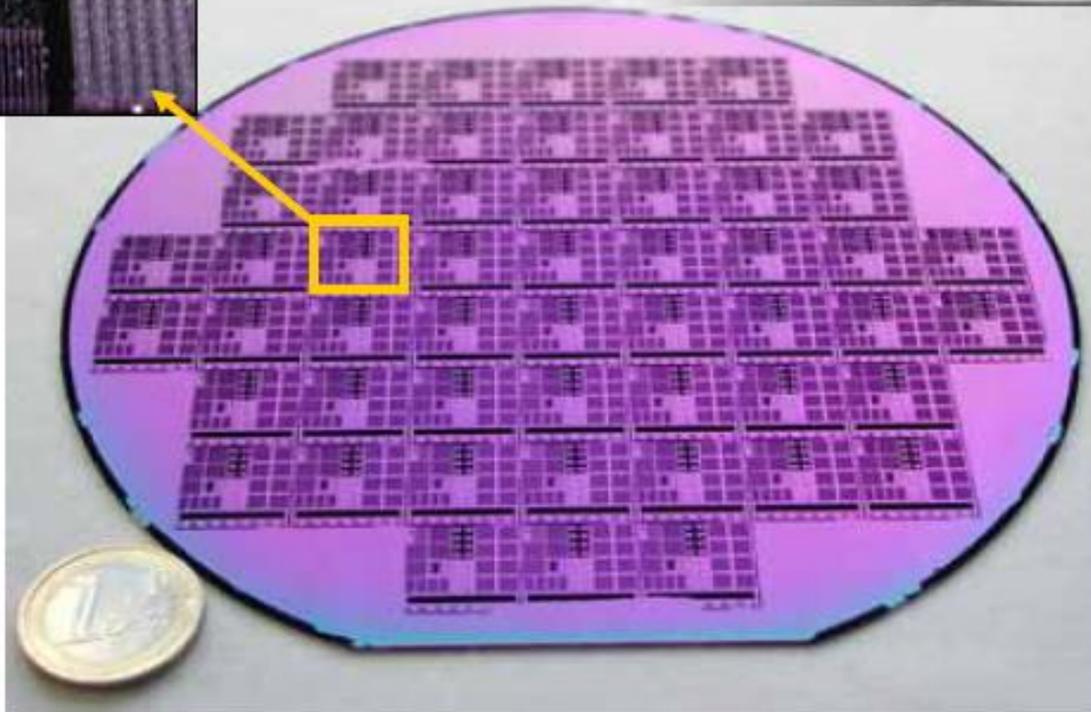
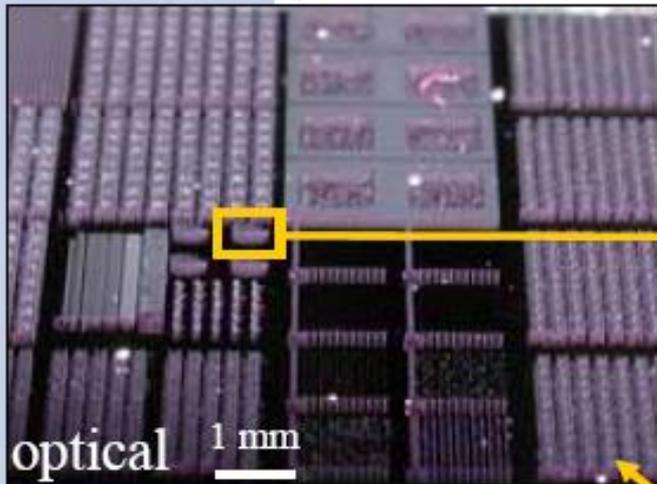
3-d scaling

Crescimento em grandes áreas



Terranova, M. L.; Sessa, V.; Rossi, M.;
“The world of carbon nanotubes: An
overview of CVD growth
methodologies”, Chemical Vapor
Deposition, v. 12, pp. 315-325, 2006.

CNT growth on a patterned 6-inch wafer



**Filmes de Carbono Amorfo
Hidrogenado
(Diamond-like Carbon)**

Características elétricas dos filmes de DLC depositados por *sputtering* reativo com H₂ e Ar

Constante dielétrica	k = 3,0 (SiO₂= 3,8)
Resistividade do a-C	$\rho = 2 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$
Resistividade do a-C:H	$\rho = 9 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$

M. Massi, H. S. Maciel, C. Otani, R. D. Mansano, P. Verdonck; “*Electrical and structural characterization of DLC films deposited by magnetron sputtering*”, **Journal of Materials Science- Materials in Electronics**, vol.12, n. (4-6), pp. 343-346, junho de 2001.

Características elétricas dos filmes de DLC depositados por *sputtering* reativo com CH₄ e Ar

- Constante dielétrica $k = 1,7$ (SiO₂ = 3,8)
- Resistividade do a-C $\rho = 2 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$
- Resistividade do a-C:H $\rho = 9 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$

R. D. Mansano, M. Massi, L. S. Zambom, P. Verdonck, P. M. Nogueira, H. S. Maciel, C. Otani; “*Effects of methane content on the characteristics of diamond like carbon films produced by sputtering*”, **Thin Solid Films**, vol. 373, pp. 243 – 246, 2000.

Características elétricas dos filmes de DLC depositados por *sputtering* reativo com CH₄ e aditivos

Constante dielétrica (C:H-N) **k = 7,0 (SiO₂= 3,8)**

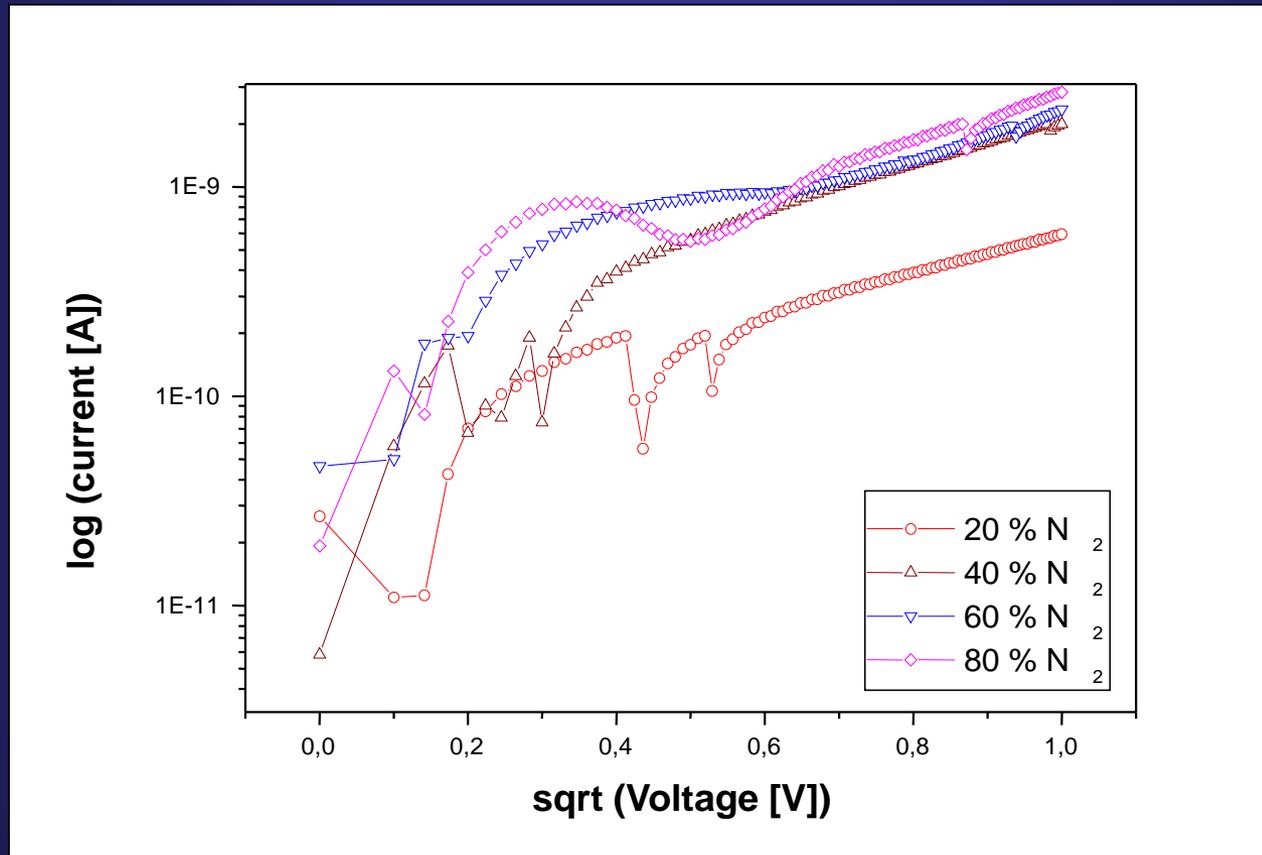
Constante dielétrica (C:H-F) **k = 5,0**

Resistividade (C:H-N) **$\rho = 2 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$**

Resistividade (C:H-F) **$\rho = 6 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$**

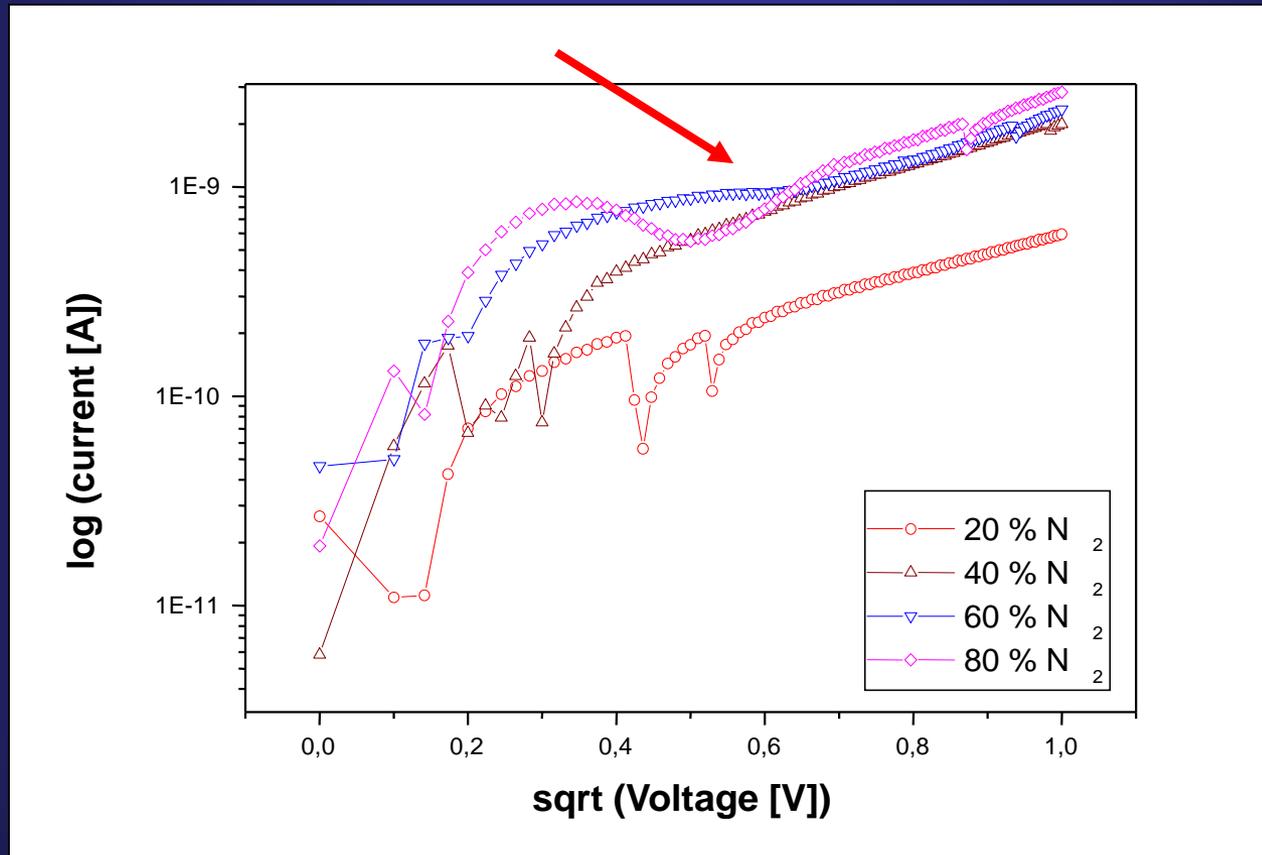
R. D. Mansano, A. P. Mousinho, L. S. Zambom, M. S. Medeiros, P. Verdonck, M. Massi; “*The influence of additives on electrical characteristics of DLC films deposited by reactive sputtering*”, 19th International Symposium of Microelectronics technology and Devices – SBMICRO 2004.

Mecanismos de condução do DLC depositado por *sputtering* reativo



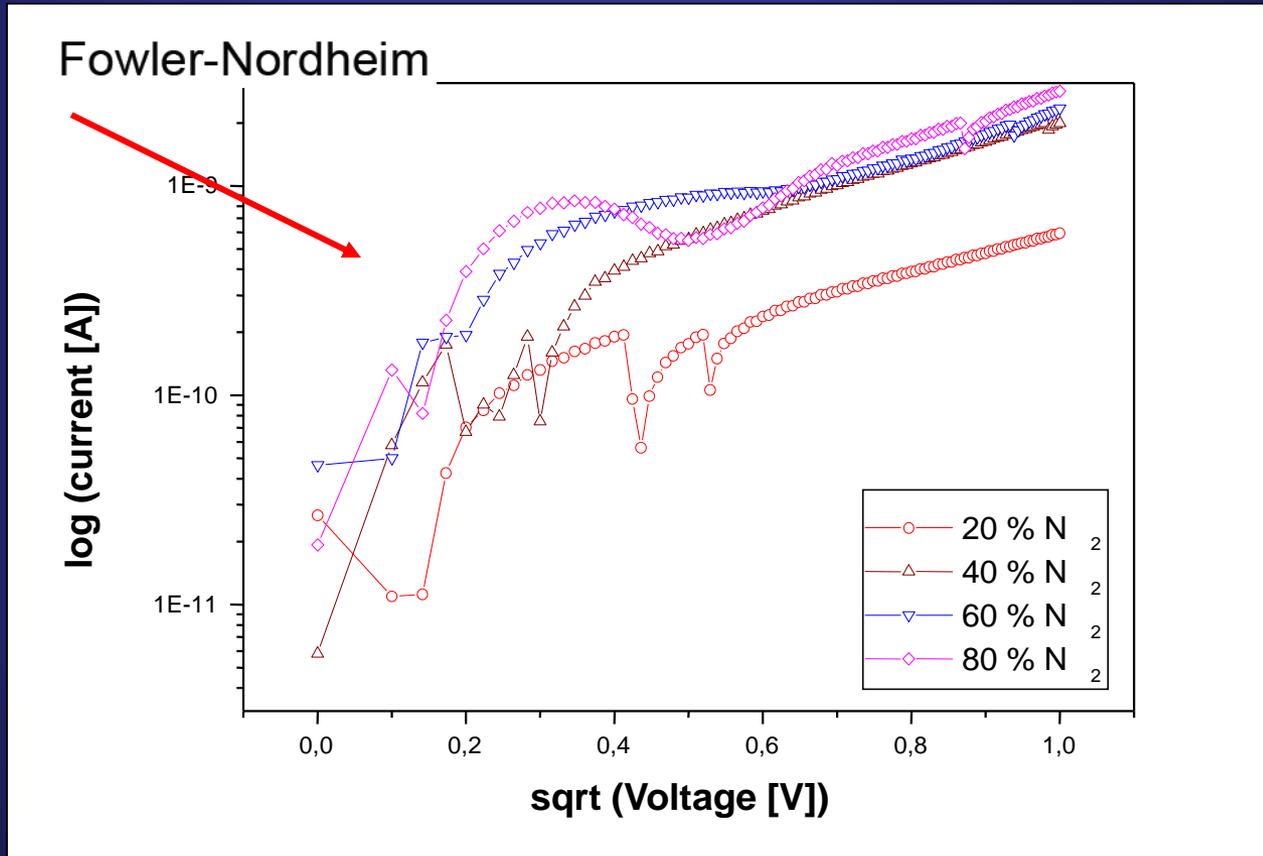
R. D. Mansano, A. P. Mousinho, L. S. Zambom, M. S. Medeiros, P. Verdonck, M. Massi; “*The influence of additives on electrical characteristics of DLC films deposited by reactive sputtering*”, 19th International Symposium of Microelectronics technology and Devices – SBMICRO 2004.

Mecanismos de condução do DLC depositado por *sputtering* reativo



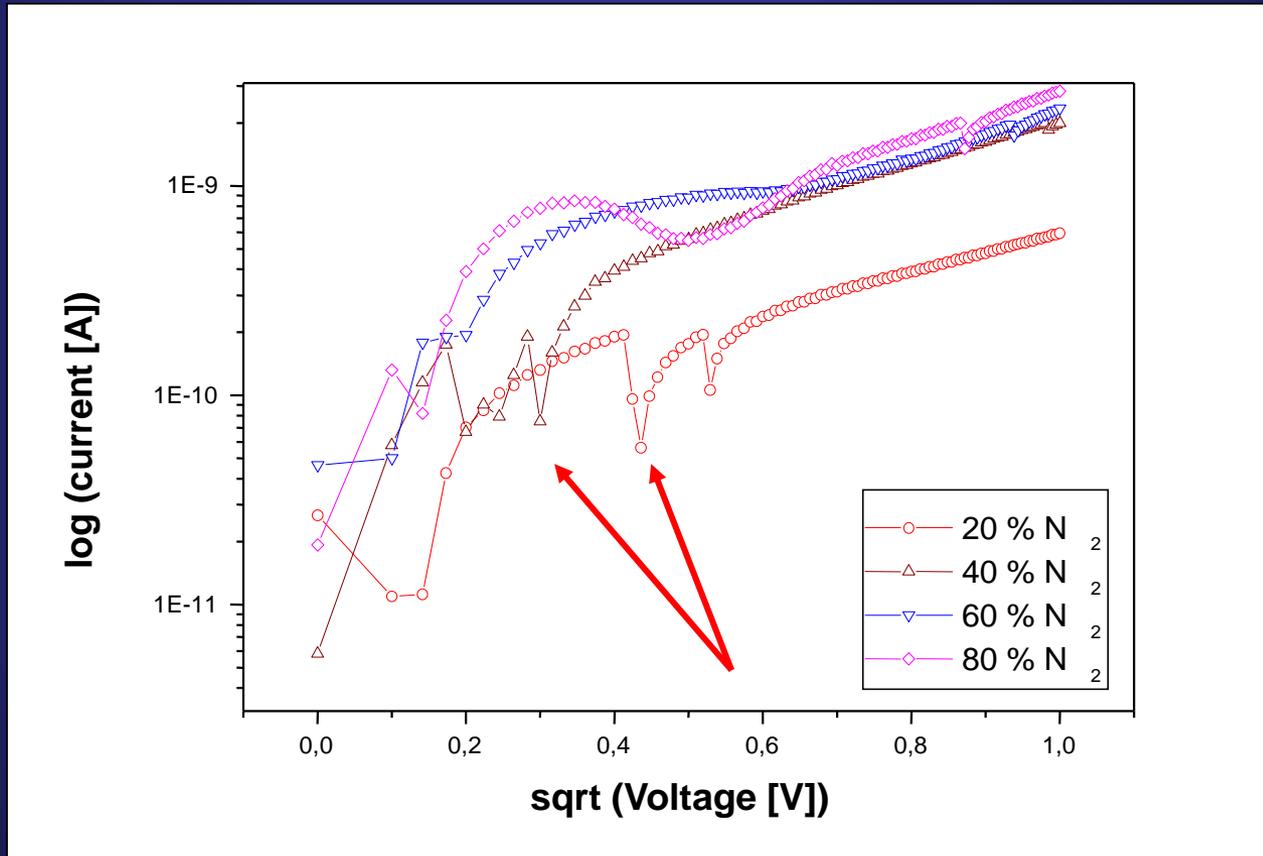
R. D. Mansano, A. P. Mousinho, L. S. Zambom, M. S. Medeiros, P. Verdonck, M. Massi; "The influence of additives on electrical characteristics of DLC films deposited by reactive sputtering", 19th International Symposium of Microelectronics technology and Devices – SBMICRO 2004.

Mecanismos de condução do DLC depositado por *sputtering* reativo



R. D. Mansano, A. P. Mousinho, L. S. Zambom, M. S. Medeiros, P. Verdonck, M. Massi; "The influence of additives on electrical characteristics of DLC films deposited by reactive sputtering", 19th International Symposium of Microelectronics technology and Devices – SBMICRO 2004.

Mecanismos de condução do DLC depositado por *sputtering* reativo



R. D. Mansano, A. P. Mousinho, L. S. Zambom, M. S. Medeiros, P. Verdonck, M. Massi; "The influence of additives on electrical characteristics of DLC films deposited by reactive sputtering", 19th International Symposium of Microelectronics technology and Devices – SBMICRO 2004.

Características elétricas dos filmes de DLC depositados por HDPCVD com CH₄ puro

Constante dielétrica (a-C:H)

$$k = 2,0 \text{ e } 6,0$$

Resistividade (a-C:H)

$$\rho = 2 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$$

. *Óxido de Silício

$$k = 3,8$$

$$\rho = 8 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$$

A. P. Mousinho; “Desenvolvimento e aplicação de processos com plasmas de alta densidade para a deposição de filmes de carbono”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, 2005.

Características elétricas dos filmes de DLC depositados por HDPCVD

Constante dielétrica (C:H-N)	$k = 1,5$
Constante dielétrica (C:H-F)	$k = 1,5$
Resistividade (C:H-N)	$\rho = 4 \times 10^{12} \Omega.cm$
Resistividade (C:H-F)	$\rho = 6 \times 10^{15} \Omega.cm$
*Óxido de Silício	$k = 3,8$ $\rho = 8 \times 10^{14} \Omega.cm$

A. P. Mousinho; “Desenvolvimento e aplicação de processos com plasmas de alta densidade para a deposição de filmes de carbono”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, 2005.

Filmes de Carbono Nanoestruturado

Propriedades fotoelétricas dos filmes de carbono nanoestruturado

Característica	CH ₄ puro	CH ₄ + Ar	CH ₄ +N ₂
I _{escuro} (A)	2×10^{-9}	2×10^{-9}	2×10^{-7}
I _{claro} (A)	2×10^{-5}	2×10^{-9}	2×10^{-4}
Picos (nm)	540 e 630	520 e 600	500, 550 e 650

M. S. Medeiros, R. D. Mansano, A. P. Mousinho; “*Photoelectric effects of nanostructured amorphous carbon films*”, **Microelectronics Journal**, n. 36, pp 981 – 984, 2005.

Propriedades fotoelétricas dos filmes de carbono após tratamento com plasma

Característica	CH ₄ puro	CH ₄ + Ar	CH ₄ +N ₂
I _{escuro} (A)	2×10^{-9}	2×10^{-9}	2×10^{-6}
I _{claro} (A)	4×10^{-5}	2×10^{-9}	8×10^{-5}
Picos (nm)	540 e 650	590	Espectro contínuo

M. S. Medeiros, R. D. Mansano, A. P. Mousinho; “*Photoelectric effects of nanostructured amorphous carbon films*”, **Microelectronics Journal**, n. 36, pp 981 – 984, 2005.

Deposição de nanotubos de carbono

Nanotubos de carbono depositados por sputtering reativo com plasma de CH_4 e N_2

