

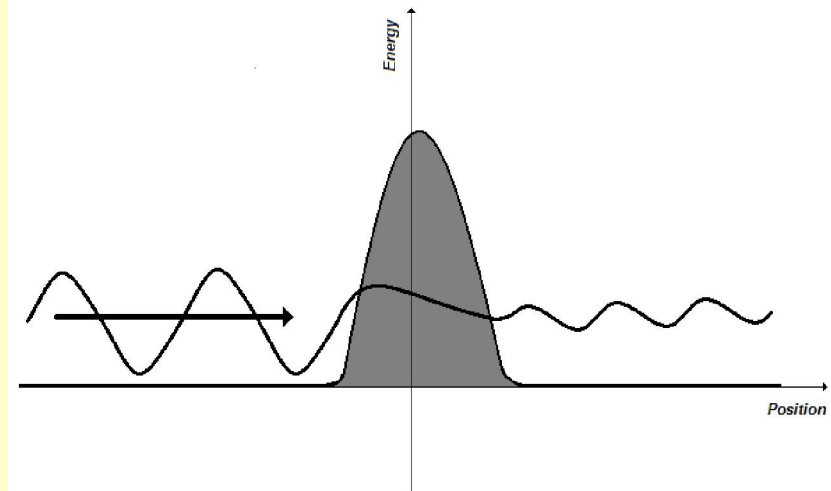
Emisia electronilor din materiale omogene si nanostructurate aflate in campuri electrice intense

Prof. Valeriu FILIP

Introdurre

Tunelarea electronilor

- Tunelarea electronilor este un mecanism de transport pur cuantic, care implica tranzitii electronice in spatiul direct, intre regiuni separate de zone “interzise” din punct de vedere clasic (**bariere de potential**).
- Zonele clasic “interzise” se caracterizeaza prin **energie cinetica negativa** (energia totala a particulei este inferioara energiei potentiale locale).



$$E_x \equiv \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m}$$

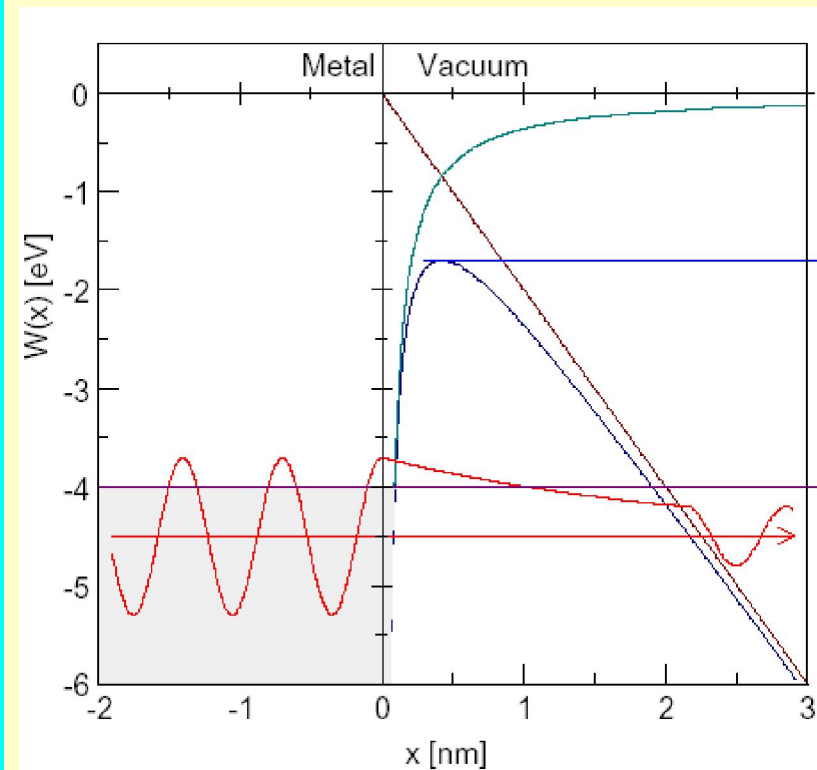
$$J = e \int N(E_x) D(E_x) dE_x$$

$$D_{WKB}(E_x) = \exp \left[- \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\frac{8m}{\hbar^2} (W(x) - E_x)} dx \right]$$

$N(E_x)$ este un factor cinematic/statistic, numit **functie de aprovizionare** (**supply function**); $N(E_x) dE_x$ reprezinta numarul de electroni cu “componenta x ” a energiei egala cu E_x , care “lovesc” bariera in unitatea de timp, pe unitatea de suprafata.

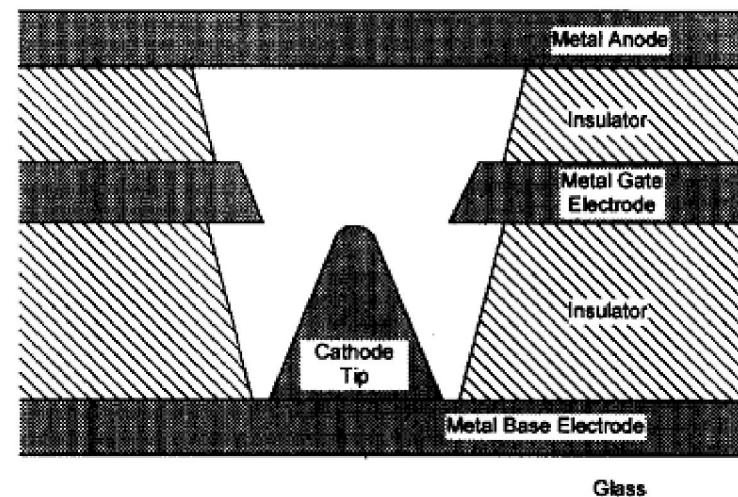
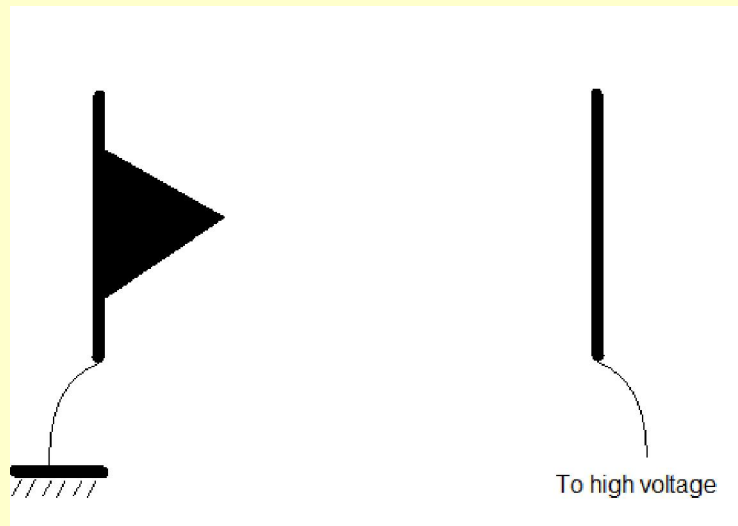
Barriere de potential la interfata cu vidul

- La interfata dintre materia condensata (solide cristaline sau amorse si lichide) si vid, barierele de potential sunt determinate de **structura de banda modificata de campuri spatial neperiodice: campuri de suprafata sau campuri aplicate din exterior.**
- In zona barierei, functia de unda electronica nu se poate reprezenta ca unda plana; ea este in mod necesar o **combinatie liniara de exponentiale reale.**
- Astfel, tunelarea electronilor din solide se poate imagina ca un **cuplaj dintre undele electronice plane din solid si cele din vid, datorita suprapunerii prelungirilor neperiodice ale acestora in bariera de potential.**



Realizarea barierelor la interfata cu vidul

Pentru obtinerea unei bariere suficient de transparente este, de obicei, necesar un camp extern de ordinul 1 V/nm . Aceste valori se pot obtine local, numai in configuratii geometrice speciale: prin intensificarea campului electric local pe varfuri sau muchii extrem de subtiri, cu raze de curbura in domeniul a cativa nanometri.



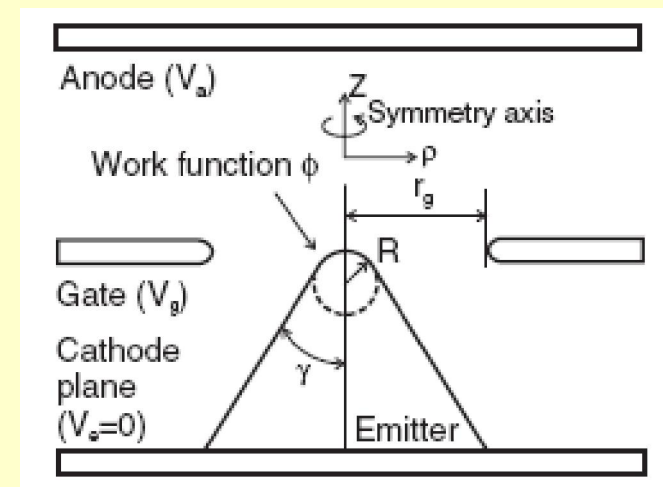
Sursa: I. Brodie and R. Schvoebel, Vacuum Microelectronic Devices, Proceedings of the IEEE, vol. 82(7), p. 1006 (1994).

Transportul electronilor prin tunelare

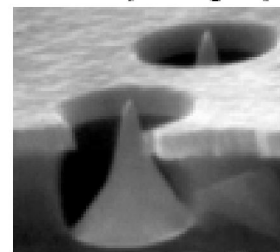
In tratarea transportului electronilor prin tunelare se distinge intre regimul de **emisie in camp** si cel **de tunelare**, desi cele doua sunt de fapt aspecte ale aceluiasi fenomen.

Regimul de emisie in camp

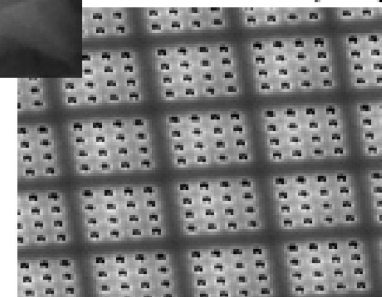
- ❖ Are loc atunci cand distanta dintre electrozi este mult mai mare (cu mai multe ordine de marime) decat distanta de tunelare (de obicei in jur de 3 nm).
- ❖ Electronii emisi vor avea deci o miscare balistica prin regiunea vidata. Acest fapt reprezinta fundamentul conceptul de **microelectronica in vid**, adica electronica in care transportul de electroni se face in cea mai mare masura in mod balistic, in zona vidata.



a. Close-up of single tip

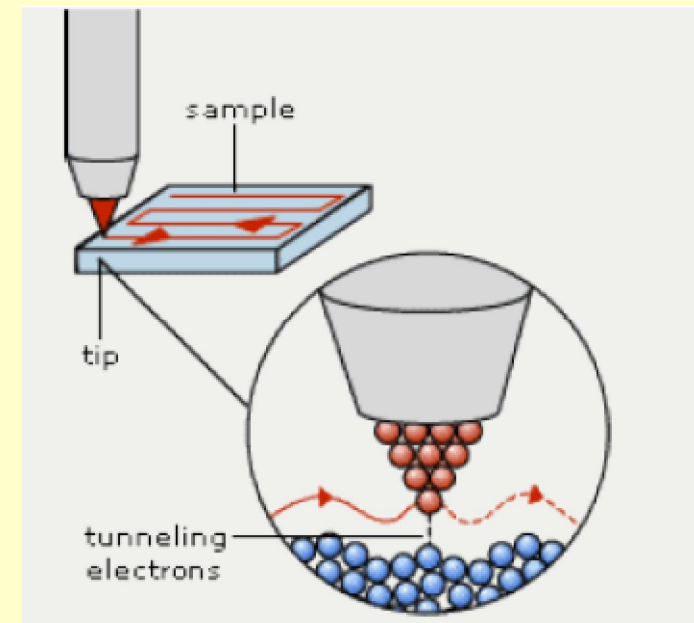


b. Portion of 10,000-tip array

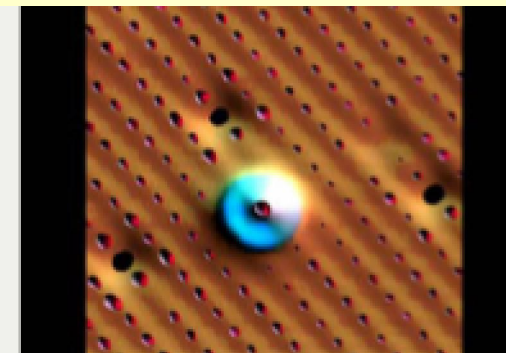


Regimul de tunelare

- ❖ Are loc atunci când **distanța dintre electrozi este de același ordin de mărime ca distanța de tunelare.**
- ❖ Acest mod de operare este folosit, de exemplu, în anumitele jonctiuni metal-vid-metal (MVM) formate la microscannerul cu tunelare (STM) sau în sandwich-uri ultra-subtiri de metal-oxid-semiconductor (MOS).



Xenon on Nickel
This image shows xenon on a nickel surface. The image is actually a combination of two images. Defects in the nickel surface were used to position the two images correctly above each other.



Aspecte fundamentale

Emisia in camp intens a electronilor din metale(1)

Pentru emisia electronica in camp intens din suprafete metalice plane a fost formulata prima teorie (*R. H. Fowler and L. W. Nordheim, Proc. Roy. Soc. (London) A19, p. 173 (1928)*).

Modelul este unul cinetic, bazat pe structura de banda generala a metalelor.

Densitatea de curent de emisie rezulta, pentru o **bariera triunghiulara**, intr-o forma foarte simpla, numita ecuatia Fowler-Nordheim.

$$N(E_x) = \frac{4\pi m}{\hbar^3} k_B T \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_F - E_x}{k_B T} \right) \right]$$

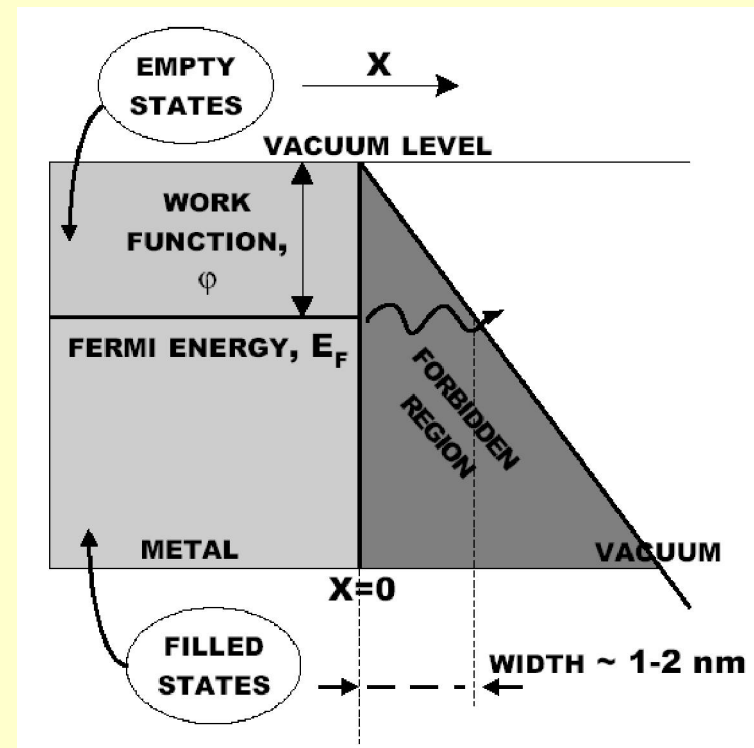
$$J = e \int N(E_x) D(E_x) dE_x$$

$$W(x) = -eFx$$

$\Rightarrow$

$$J = \frac{AF^2}{\Phi} \exp \left(-\frac{B\Phi^{3/2}}{F} \right)$$

$$A = \frac{e^3}{16\pi^2 \hbar} \quad B = \frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m}}{e\hbar}$$



Emisia in camp intens a electronilor din metale(2)

Corectia barierei cu potentialul de sarcina imagine (*R. H. Good jr. and E. W. Müller, in Handbuch der Physik vol. XXI, S. Flügge (editor), 1956, p. 176*):

$$W(x) = -eFx - \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x}$$

Rezulta:

$$J = \frac{AF^2}{\phi t^2(y)} \exp\left(-\frac{B\phi^{3/2}}{F} v(y)\right)$$

$$y = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{e^3 F}{4\pi\epsilon_0}}$$

Forma explicita a functiei $v(y)$ este urmatoarea:

$$v(y) = \frac{1}{\sqrt[3]{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 - y^2}} \left[E\left(\sqrt{\frac{2\sqrt{1 - y^2}}{1 + \sqrt{1 - y^2}}}\right) - (1 - \sqrt{1 - y^2}) K\left(\sqrt{\frac{2\sqrt{1 - y^2}}{1 + \sqrt{1 - y^2}}}\right) \right]$$

unde $E(u)$ si $K(u)$ sunt integralele eliptice complete de prima si a doua speta:

$$K(u) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - u^2 \sin^2 \phi}} \quad E(u) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - u^2 \sin^2 \phi} d\phi$$

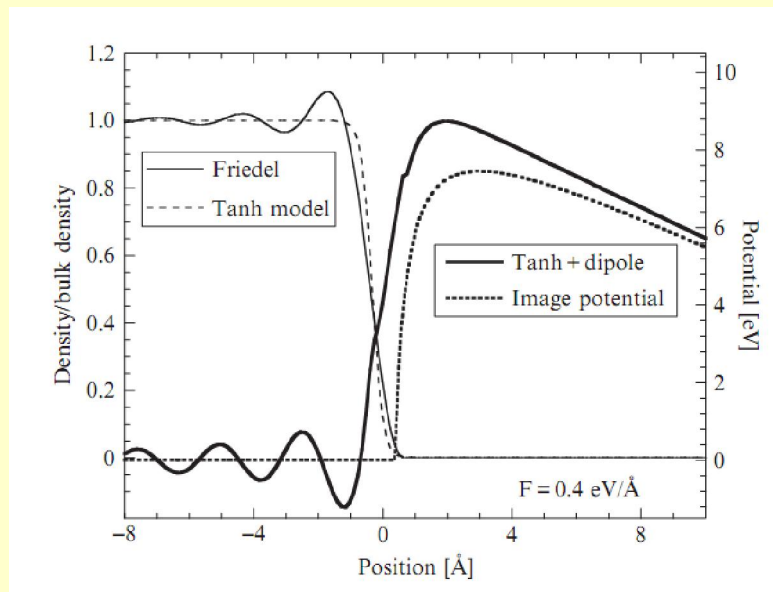
$$t(y) = v(y) - \frac{2}{3} y \frac{dv(y)}{dy}$$

Efecte colective la emisia din metale

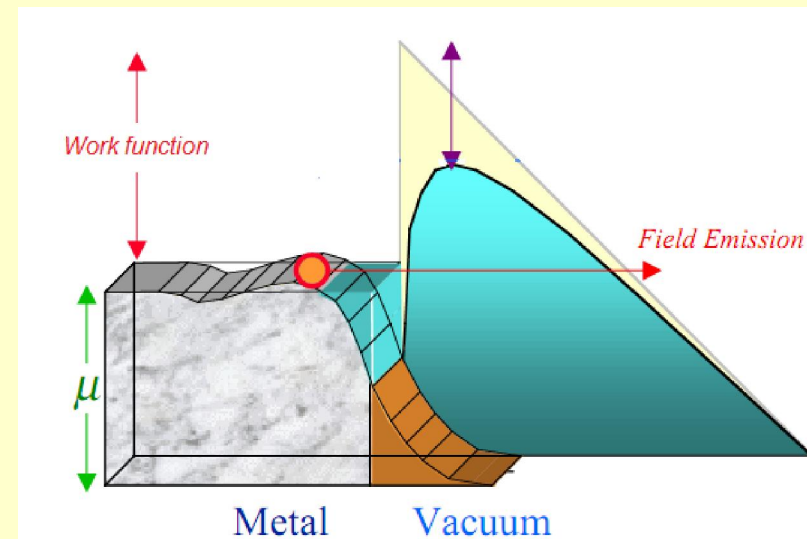
Densitatea mare de electroni in metale, produce efecte colective, care se manifesta la emisia in camp.

Astfel, in apropierea suprafetei, densitatea de electroni prezinta oscilatii spatiale numite **oscilatii Friedel**.

Acestea influenteaza direct bariera de potential la suprafata libera a metalului si pot fi puse in evidenta in curentul de emisie (care are sensibilitate exponentiala fata de lucrul de extractie).



Sursa: K. L. Jensen, Electron Emission Physics, Elsevier, Amsterdam, 2007.

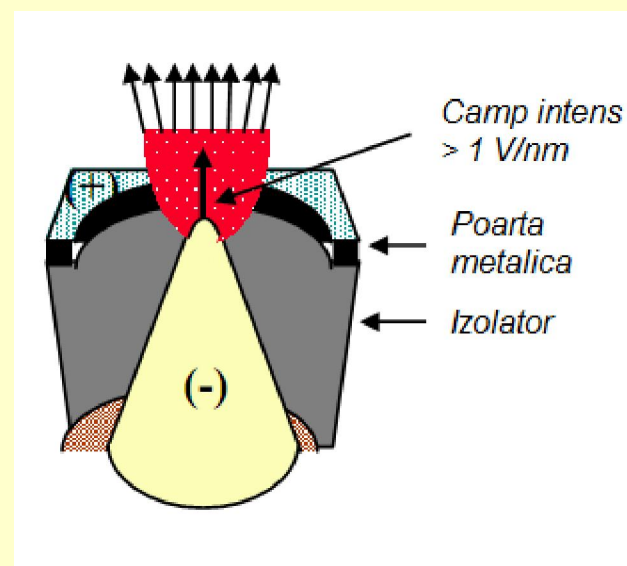
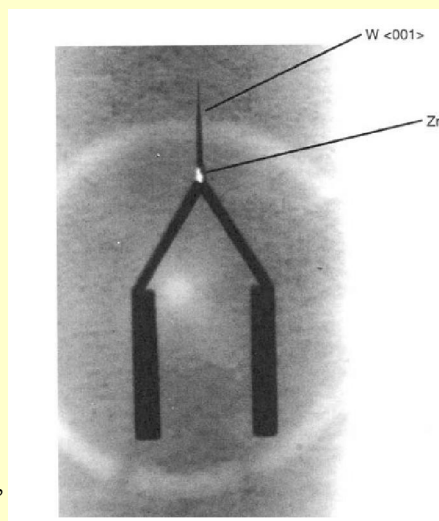
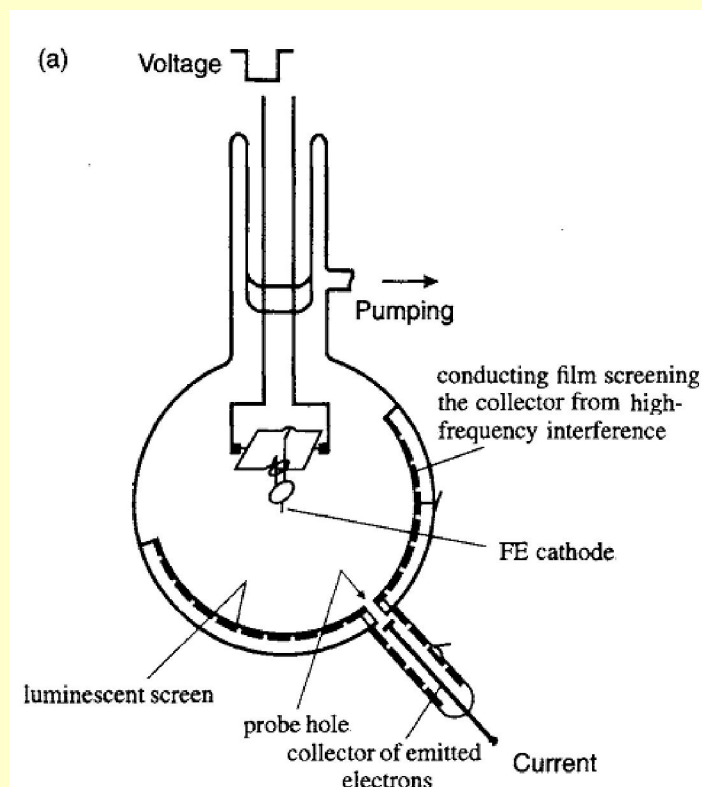


Sursa: K. L. Jensen, Theory and Simulation of Field Emission from Microstructures, Naval Research Laboratory presentation, May 10, 2001

Catozi metalici

Primele montaje de emisie in camp

Catozi metalici moderni: catozi
Spindt



Sursa: G. Fursey, Field Emission in Vacuum Microelectronics, Kluwer Academics/Plenum Publishers, New York, 2005.

Catozii Spindt

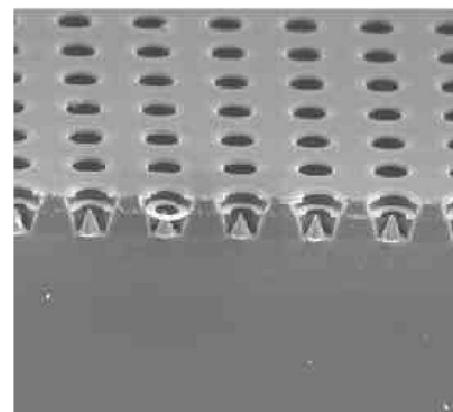
Catodul Spindt, inventat in 1968 de **Charles A. (Capp) Spindt** de la “SRI International” (**SRI Project 2743, Quaterly Technical Report 1, Feb. 1992**), se obtine prin evaporarea metalului printr-o apertura ingustata. Este in mod esential un con metalic de dimensiuni micrometrice, cu **un varf foarte ascutit, de raza de curbura in domeniul 10 nm**.

Procesul de fabricatie folosea tehnici deja existente in industria circuitelor integrate. Se pot astfel construi retele intregi de emitori.

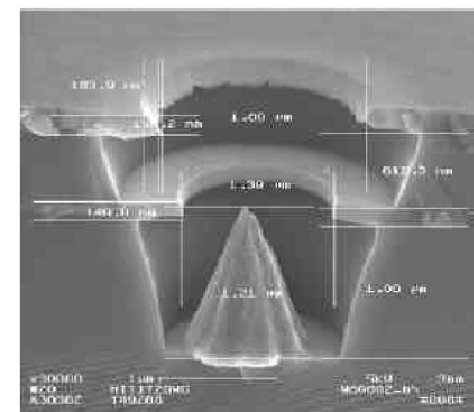
Acest dispozitiv a deschis calea pentru obtinerea unei intregi clase de **componente microelectronice fara dopaj, rezistente la temperatura si la radiatii**.

Retele de emitori Spindt

- ❖ Materialul tipic (resistent la bombardament cu ioni residuali si la incalzire Joule): **molibden**.
- ❖ Dezavantaj tipic: suprafata emitorului in zona varfului nu este neteda (datorita procedurilor de ascutire disponibile pentru metale) => emisia poate avea loc din diferite puncte ale “conului”, nu neaparat din varf. Pentru a obtine o emisie uniforma, este necesar sa se foloseasca tensiuni de extractie mari.



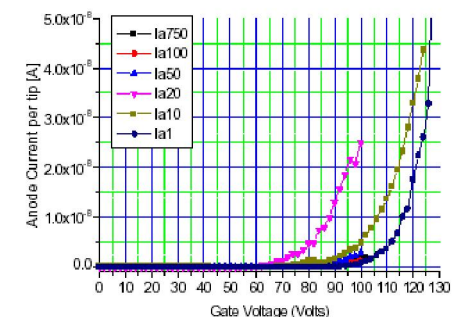
(A). Metal IFE-FA.



(B). Metal IFE-FA cone with dimensions.



(A) Zoom-in on a sharp metal tip.



(B) IV data per tip for metal IFE FEAs of different sizes.

(A) Retele de emitori Spindt cu electrozi de focalizare integrati si un detaliu al unui emitor metalic singular de tip Spindt.

(B) Detaliu al unei unitati si graficul caracteristicii curent-tensiune de poarta a unei singure unitati.

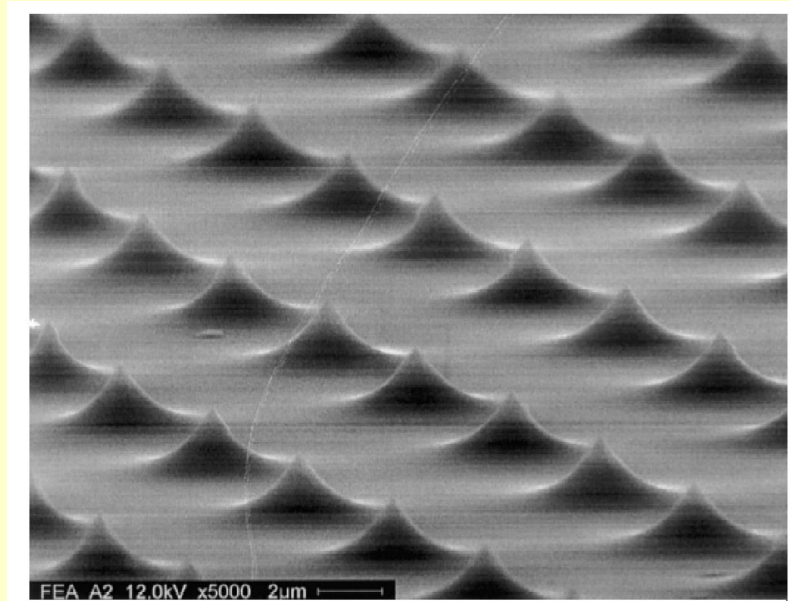
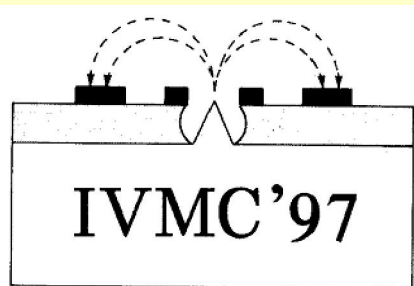
Sursa: Ch. A. Spindt, SRI International, Ca., USA.

Emisia in camp intens a electronilor din semiconductori

A fost demonstrata pentru prima data in 1972, pe siliciu

Avantaje practice:

- Tensiuni de extractie mai coborate decat la metale
- Proceduri de ascutire mai eficiente (prin oxidare) permit obtinerea de suprafete emiseive mai netede.
- Posibilitatea integrarii emitorilor in camp in structuri microelectronice compacte pentru realizarea de componente complexe (ex. tranzistorul cu vid, microfabricat, bazat pe retele de emitori din siliciu - H. Gray, 1980).



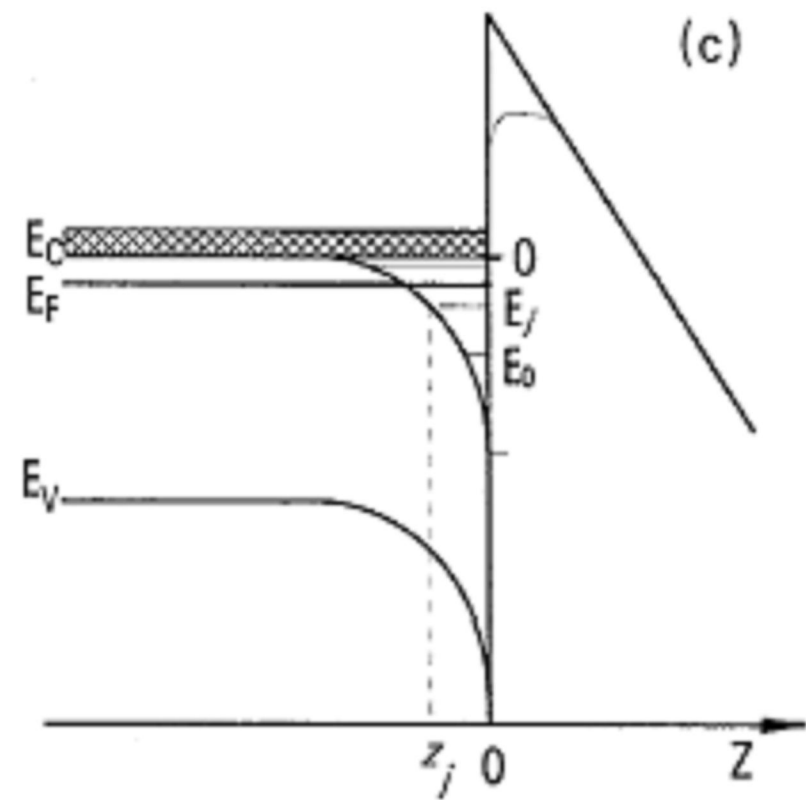
Imagine SEM a unui catod de emisie in camp format din siliciu de tip p.

Patrunderea campului in semiconductori

❖ Concentratia redusa de purtatori de sarcina in semiconductori dopati moderat determina o ecranare mai slaba a campului => campul patrunde pe distante relativ mari in material.

❖ In zona de patrundere a campului structura de banda se distorsioneaza (**strat de acumulare**) si apar stari cuantice legate ale unui gaz bidimensional. Tunelarea in vid se produce practic din astfel de stari.

❖ Notiunea de lucru de extractie de la metale este inlocuita cu cea de **afinitate electronica** (diferenta dintre energia vidului si cea a minimului benzii de conductie)

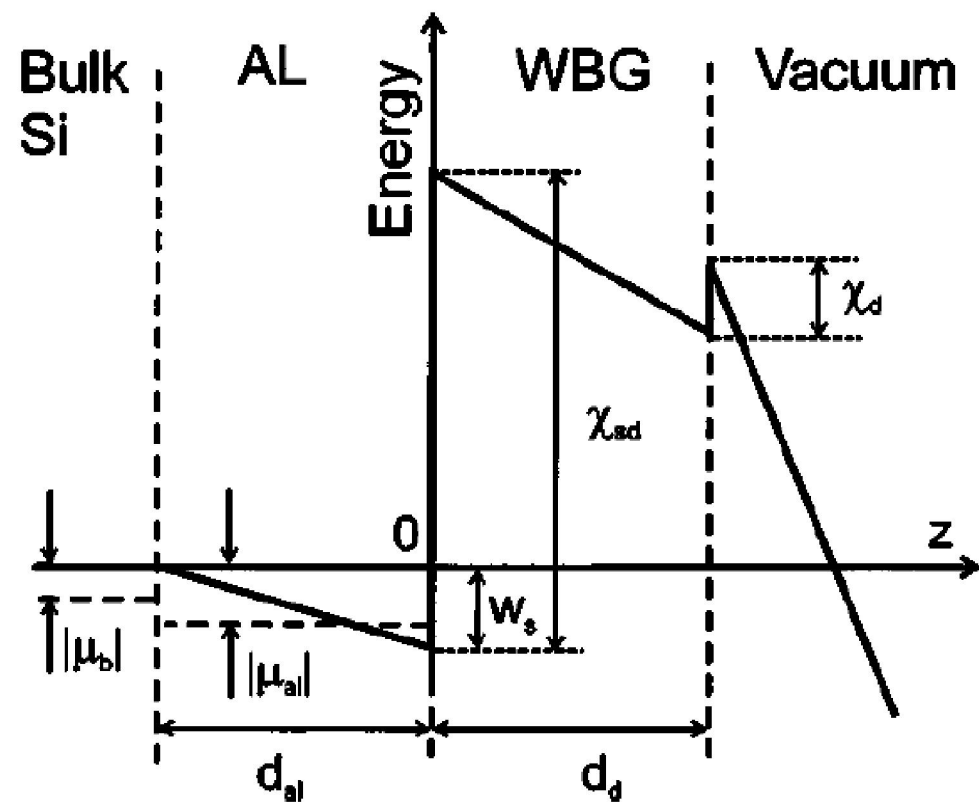


Emisie din suprafete semiconductoare compozite

Efecte interesante apar cand suprafetele semiconductoare sunt acoperite cu filme nanometrice din diverse materiale, formand suprafete emisiv nanostructurate.

Exemplu simplu: suprafata Si acoperita cu un strat ultra-subtire de material cu banda interzisa larga (WBG).

Se poate folosi aproximatia de camp uniform in zonele de penetratie pentru a descrie transportul de tunelare prin heterostructura formata.

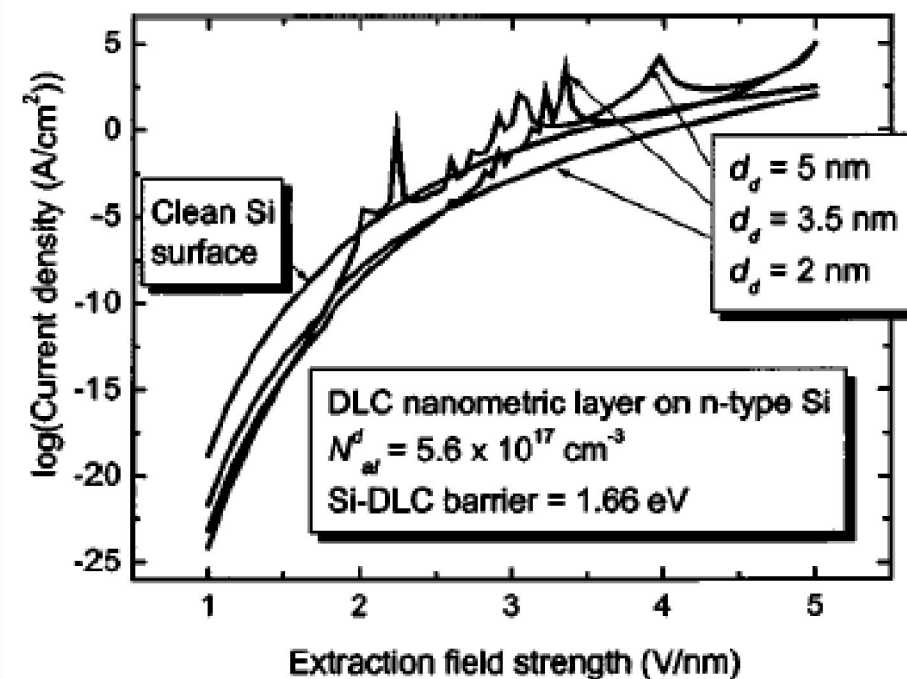


V. Filip et al.: *Field electron emission from two-dimensional electron gas*, J. Vac. Sci. Technol. B 23(2), 657 (2005).

Emisie electronica rezonanta din suprafete heterostructurate

Daca grosimea stratului de acumulare format la interfata cu vidul sau cu materialul WBG nu depaseste drumul liber mediu al electronilor in materialul respectiv, faza functiei de unda nu se modifica in acest strat, astfel ca pot apare fenomene rezonante la emisia in camp.

Aceasta se manifesta prin maxime ascutite si inalte ale curentului de emisie, cu valori care sunt considerabil mai mari decat cele corespunzatoare emisiei din suprafete curate.

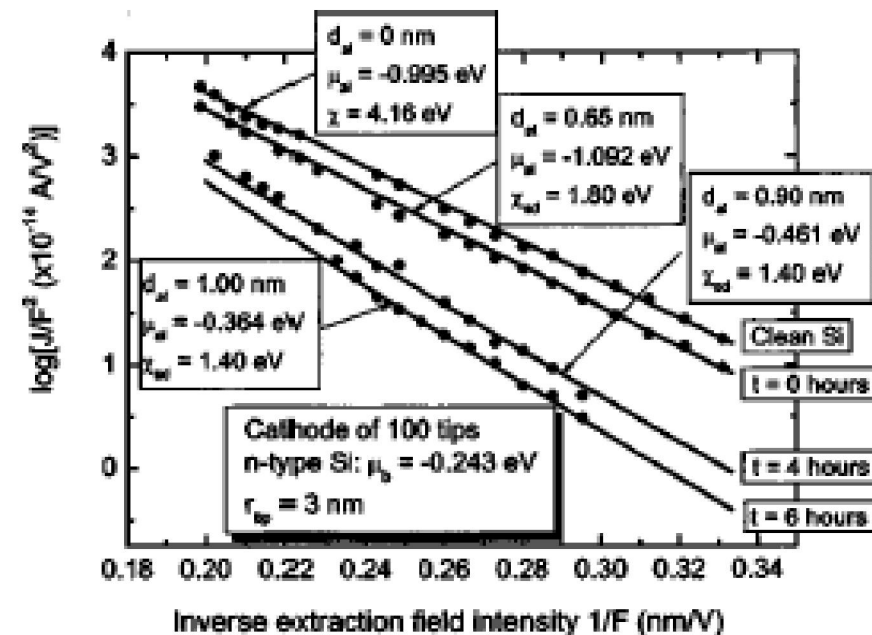


V. Filip et al.: *Field electron emission from two-dimensional electron gas*, J. Vac. Sci. Technol. B 23(2), 657 (2005).

Emisie prin tunelare secventiala din suprafete heterostructurate

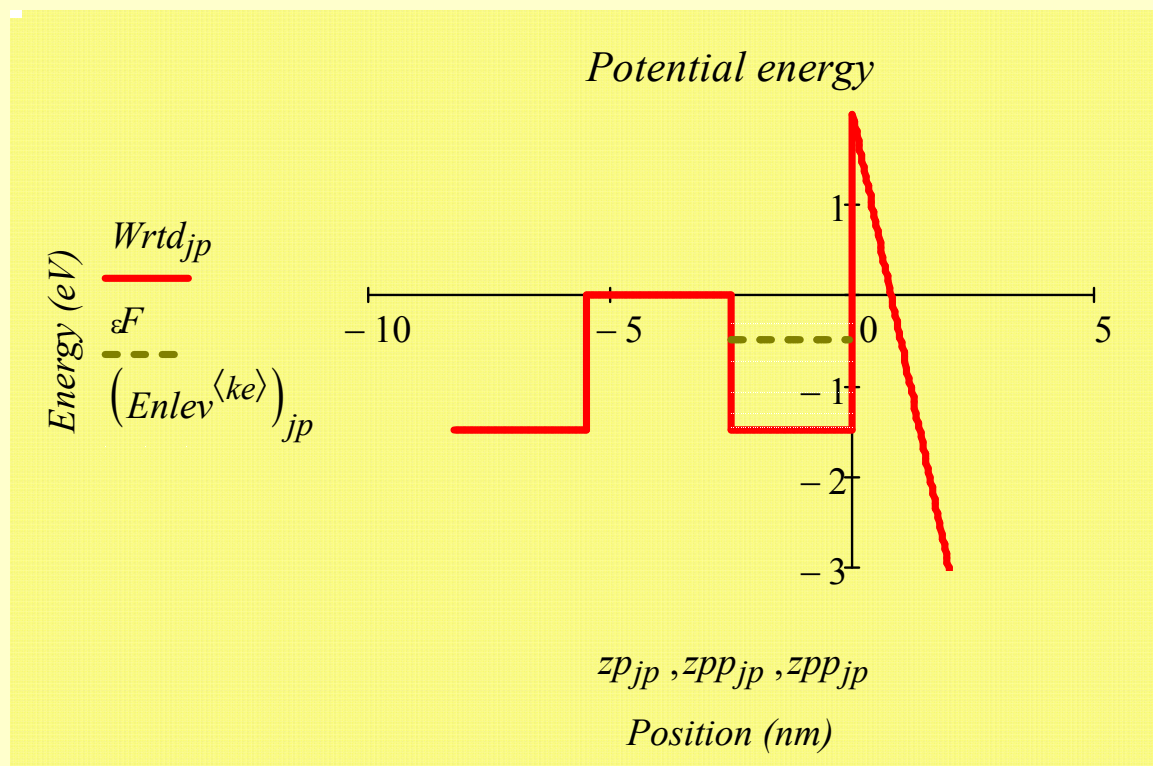
Tipul de transport prin stratul de acumulare depinde esential de structura acestuia si de mecanismele de reumplere a starilor vacante in urma emisie.

Astfel, putem avea emisie prin straturi ultra-subtiri de WBG in care sa nu apara “rezonante”.



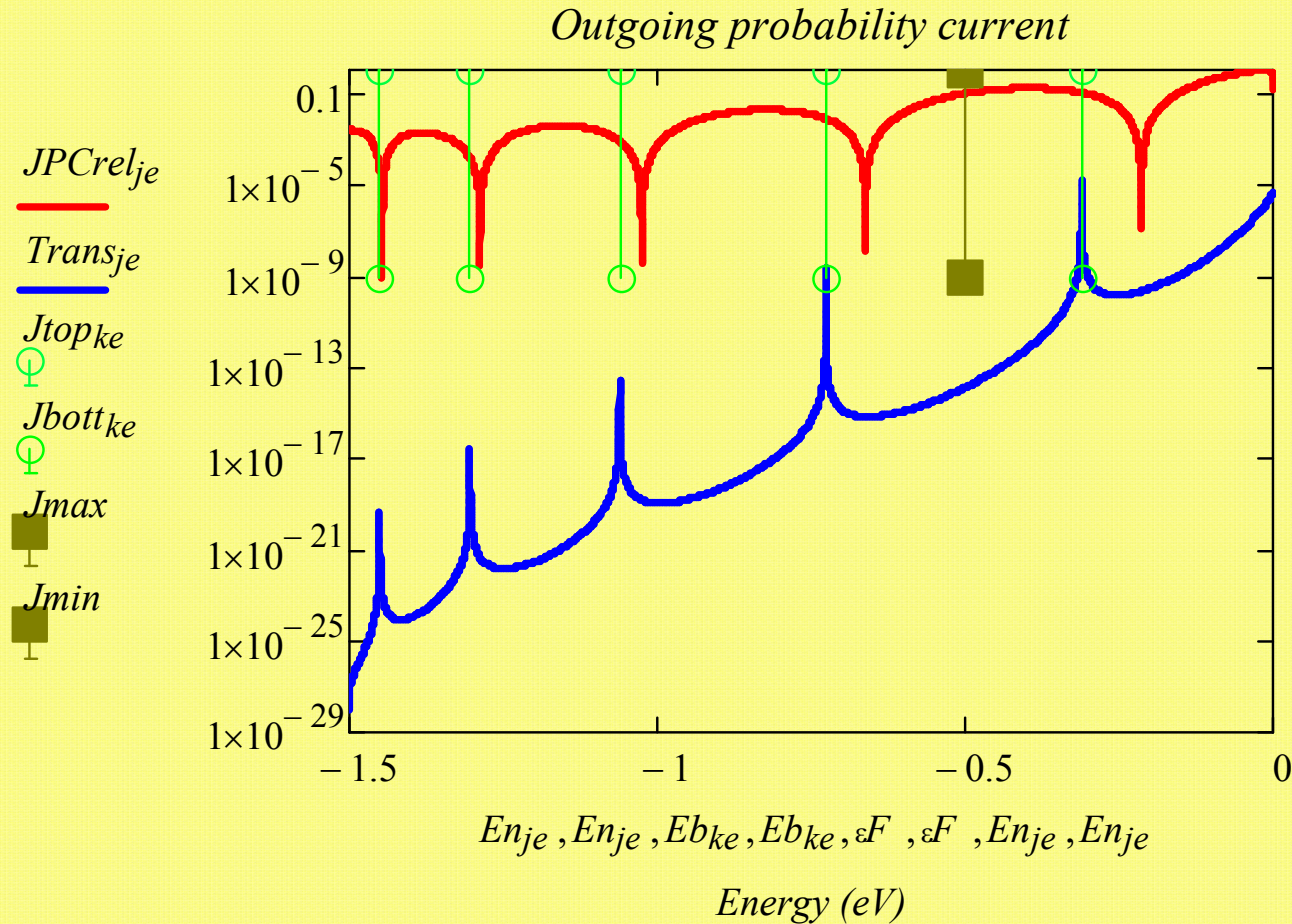
V. Filip et al.: *Field electron emission from two-dimensional electron gas*, J. Vac. Sci. Technol. B 23(2), 657 (2005).

Emisie electronica rezonanta vs. emisie secventiala



Emisia rezonanta implica alinierea (egalitatea) energiei electronului incident cu cea a unei stari locale din heterostructura. Este un mecanism de emisie in mod esential elastic (cu conservarea energiei initiale a electronului).

Emisia secventiala stocheaza temporar electroni pe starile locale, conform unei distributii statistice. Iesirea electronilor in vid are loc de pe aceste stari locale. Consecinta: structura se incarca electric si aceasta duce la modificarea energiei potentiale locale si deci la modificarea spectrului energetic local.

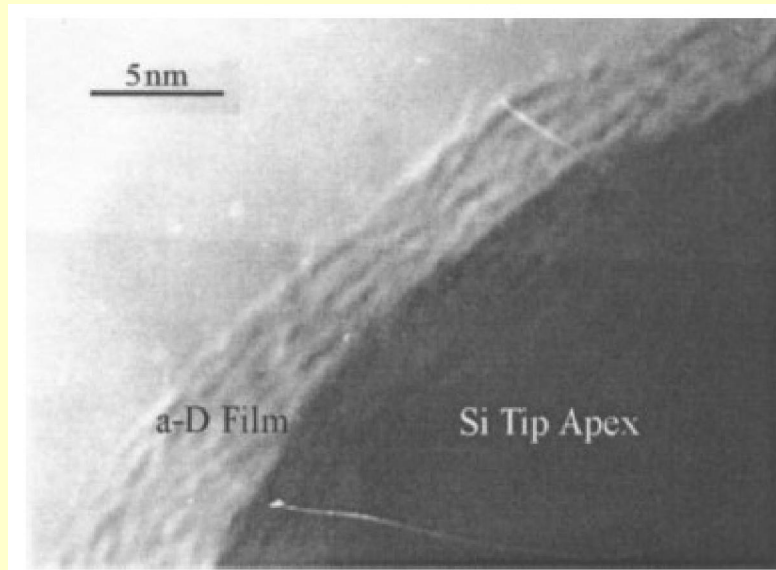


La emisia rezonanta, coeficientul de transmisie al structurii (si, implicit, curentul de emisie) are rezonante la energii incidente care corespund nivelelor locale din heterostrutura. Altfel spus, structura este extrem de transparenta pentru electronii din bulk care vin la interfata cu astfel de valori ale energiei.

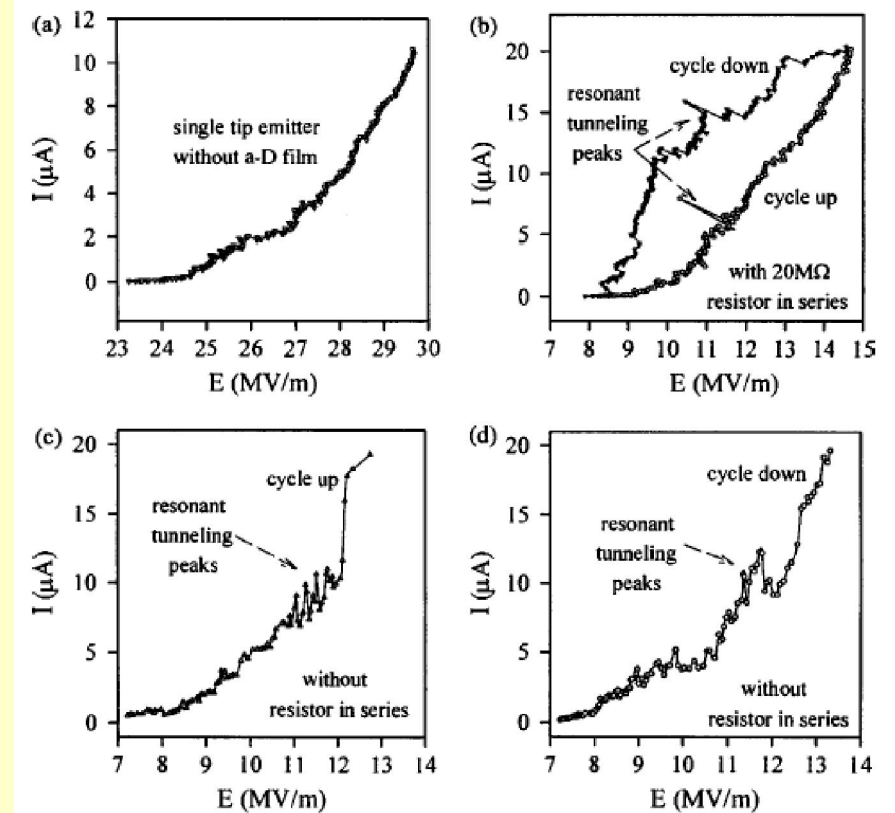
La emisia secventiala, curentul de probabilitate emergent are minime pronuntate in apropierea nivelelor locale, datorita tendintei structurii de a "lega" electronii care au astfel de energii.

Experimente

J. C. She et al.: *Experimental evidence of resonant field emission from ultrathin amorphous diamond thin film*, Surface and Interface Analysis 36, 461 (2004)



Imagine obtinuta prin microscopie electronica prin transmisie de inalta rezolutie: un varf de Si acoperit de un film nanometric de diamant amorf in forma de arc.



Diagrame I-E tipice pentru varfuri de Si curate si cu depunere de diamant amorf. Sunt vizibile picuri “rezonante” ale curentului.

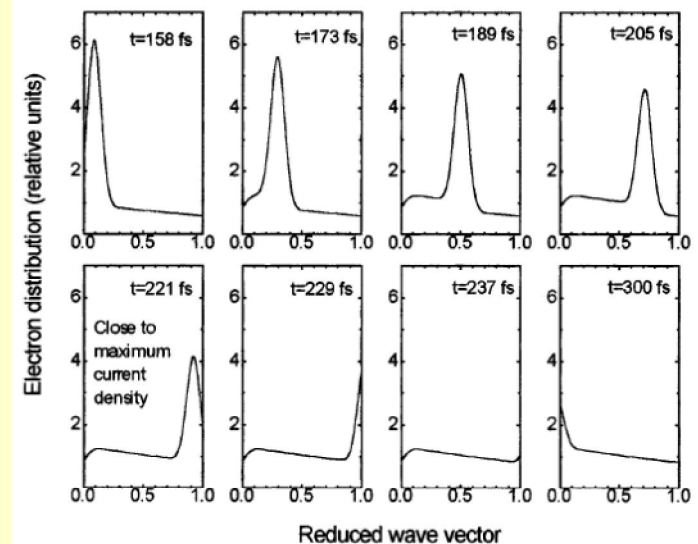
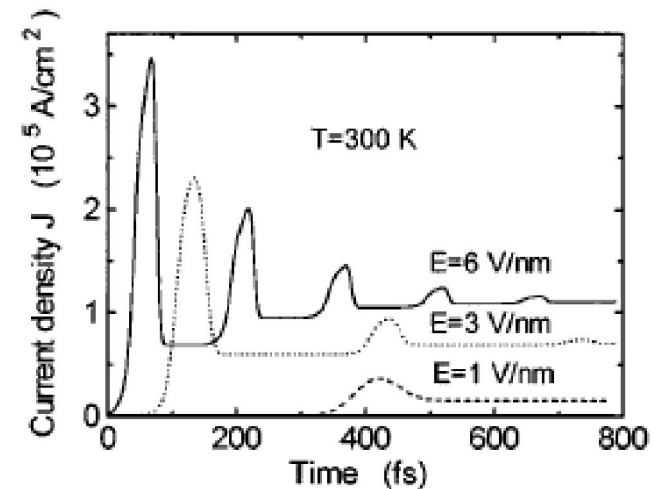
Fenomene tranzitorii la emisia electronica din semiconductori

V. Filip et. al., *Transient and stationary field emission currents from semiconductors computed by a simple semi-classical method*, J. Vac. Sci. Technol. B 16(2), 888 (1998).

Cand stratul de acumulare format la aplicarea campului extern este mai larg decat drumul liber mediu al electronilor apar fenomene de transport care se pot considera inclusiv in regim tranzitoriu.

Combinand emisia prin tunelare a electronilor cu o ecuatie Boltzmann in stratul de acumulare se poate formula o tratare statistica a acestei probleme de neechilibru. Ca functie de aprovizionare se poate considera functia de distributie electronica calculata la interfata cu vidul.

Curentul de emisie oscilant in timp este o consecinta "deplasarii" in timp a distributiei electronice de ne-echilibru si a reflexiei acesteia pe frontiera zonei Brillouin a retelei cristaline a semiconductorului.



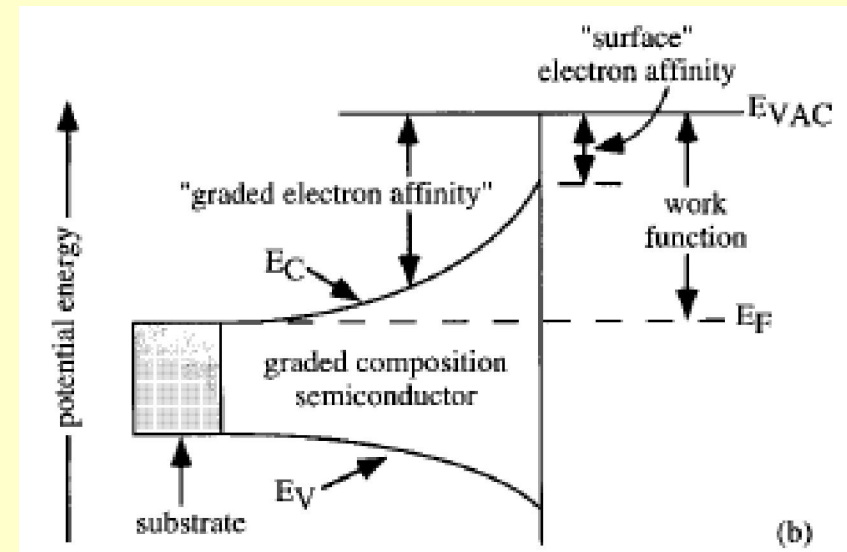
Emisie electronica din structuri cu afinitate electronica graduala (GEA)

V. Filip et. al., *Transient and stationary field emission currents from semiconductors computed by a simple semi-classical method*, J. Vac. Sci. Technol. B 16(2), 888 (1998).

Structuri de tip GEA au fost propuse pentru utilizare in dispozitive cu emisie in camp.

Aceste structuri semiconductoare au variatie spatiala lenta a compozitiei (straturi suprapuse de aliaje de nitruri ale elementelor grupei aIII-a). In acest fel, minimul benzii de conductie variaza lent de la valoarea din bulk catre o valoare apropiata de nivelul vidului, la suprafata.

Un gradient optimizat al afinitatii permite injectia unor concentratii mari de electroni in banda de conductie si conduce la curenti de emisie mari.



Avantaje in folosirea GEA:

- suporta valori mari ale densitatii de curent;
- are potential pentru emisie electronica directionata;
- stabilitate mare a emisiei in camp.

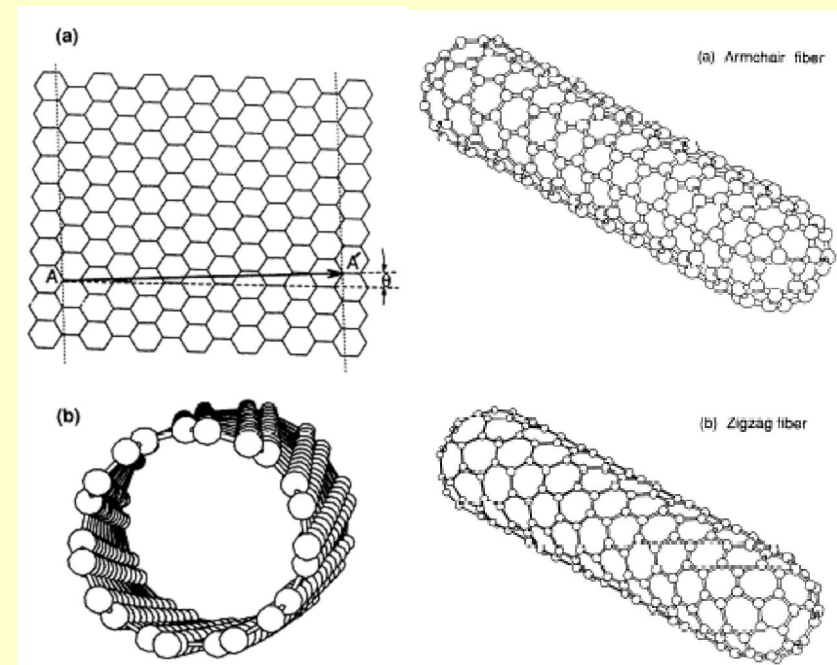
Nanotuburi de carbon

❖ **Grafitul** este cea mai stabila faza a carbonului la temperatura camerei. Cristalizeaza in straturi mono-atomice formate din hexagoane de carbon, numite **grafene**. Aceste foi de grosime atomica se pot ordona in “teancuri” formand structura grafetica.

❖ Datorita legaturilor incomplete ale atomilor marginali ai unei foi finite de grafena, o astfel de structura nu este, de fapt, atat de stabila cat este de asteptat din valoarea mica a energiei totale de legatura.

❖ Totusi, o foaie de grafena infasurata sub forma de tub, permite compensarea legaturilor incomplete de la periferie obtinandu-se una din cele mai stabile aranjamente atomice cunoscute: nanotubul de carbon (CNT).

❖ Infasurarea foi de grafena poate avea loc in mai multe moduri diferite, oferind astfel tot atatea grade de “rasucire” structurii de CNT. Gradul de rasucire se cuantifica prin proprietatea geometrica numita **chiralitate**. Ea influenteaza simetria spirala a structurii si, prin aceasta, comportarea electronica a acesteia.



Cateva proprietati ale structurilor de CNT

Nanotuburile de carbon au:

Rezistentă la întindere superioară oricărui alt material (de 30-100 ori mai mare decât a oțelului la densități de 6 ori mai mici).

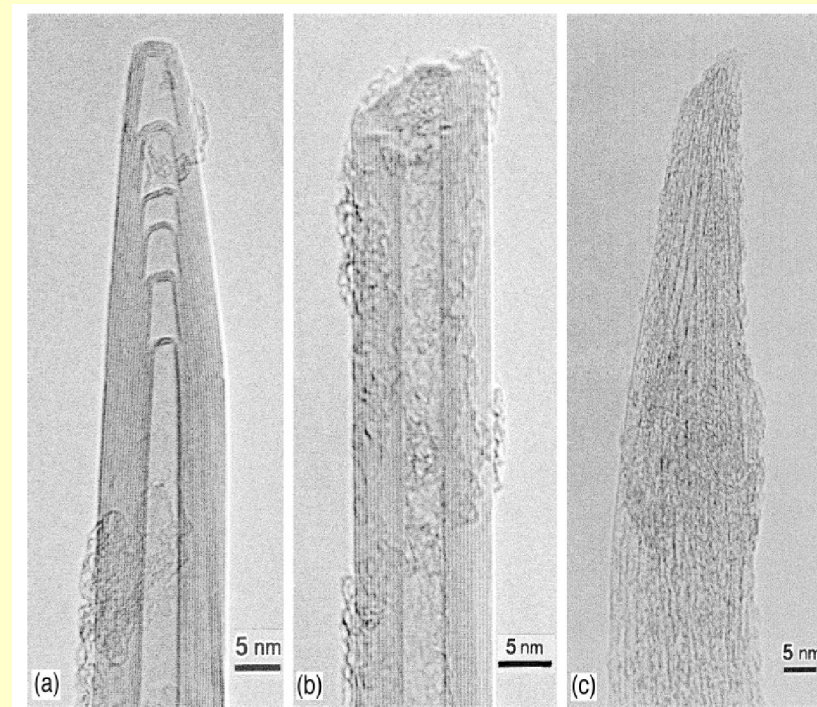
Rigiditate extremă, combinată cu abilitatea de a suporta îndoiri, flambări, răsuciri și compresii repetate, la frecvențe mari și cu păstrarea completă a elasticității.

Stabilitate chimică pe părțile laterale ale tubului și posibilitatea cuplării covalente la capete, ceea ce permite modificarea nelimitată a tubului la terminările sale, fie ca acestea sunt deschise sau închise.

Conductivitate electrică echivalentă cu metale ca aurul și cuprul; anumite experimente au evidențiat chiar **conductie balistică** în CNT.

Conductivitate termică de-a lungul tubului egală sau superioară oricărui alt material.

CNT-urile se pot obține atât în format simplu (numit **singled walled CNT (SWCNT)**), cât și ca tuburi multistratificate, numite **multiple walled CNTs (MWCNT)**.



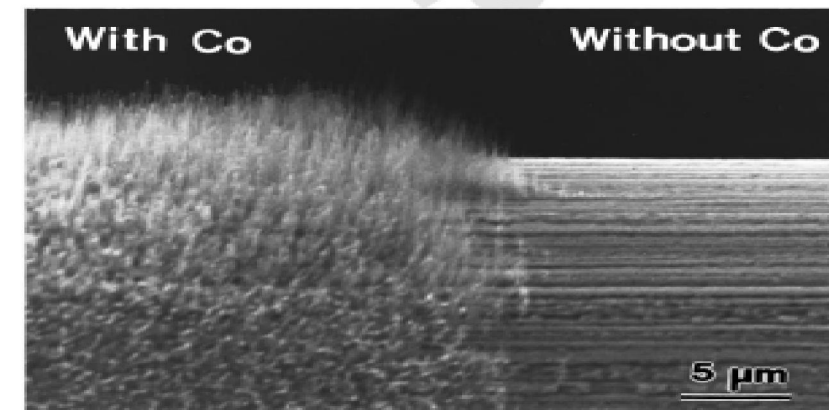
Imagini de microscopie electronică de transmisie (TEM) ale unor varfuri de CNT:
a) MWNT închis, b) MWNT cu un capăt deschis și c) manunchi de SWNTs.

Nanotuburi aliniate pentru emisie in camp (1)

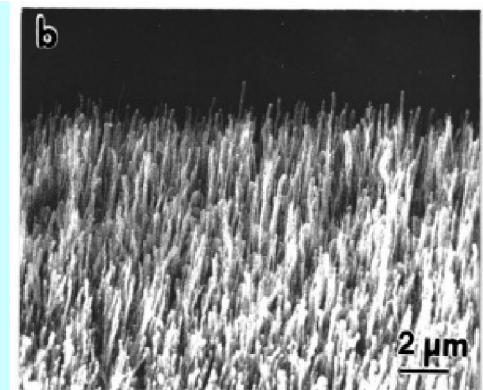
Datorita excelentei conductivitati si raportului de aspect foarte mare, CNT-urile se pot folosi drept catozi de emisie electronica in camp.

Pot fi operate atat ca entitati izolate cat si in filme aliniate.

Filme aliniate de CNT-uri s-au obtinut initial prin depunere chimica din stare de vapori, in mediu de plasma (PECVD).



Imagine SEM a unui film de CNT-uri crescut prin PECVD la 750 K, pe suprafata unui fir de W de 30 μm acoperit cu particule de Co.



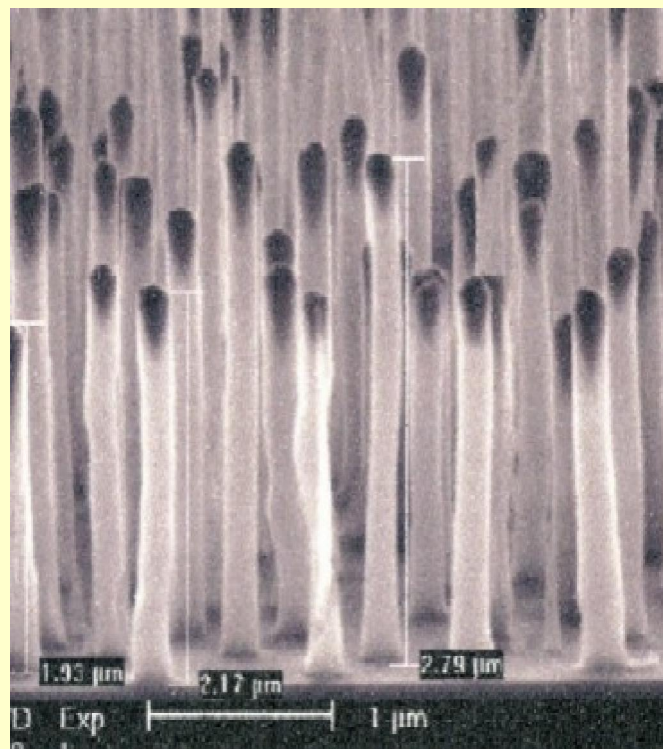
Sursa:

M. Tanemura, K. Iwata, K. Takahashi, Y. Fujimoto, F. Okuyama, H. Sugie, and V. Filip, *Growth of aligned carbon nanotubes by plasma-enhanced chemical vapor deposition: Optimization of growth parameters*, Journal of Applied Physics 90(3), 1529 (2001).

M. Tanemura, V. Filip, K. Iwata, Y. Fujimoto, F. Okuyama, D. Nicolaescu and H. Sugie, *Field electron emission from carbon nanotubes grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition*, Journal of Vacuum Science and Technology (B), 20(1), 122 (2002).

Nanotuburi aliniate pentru emisie in camp (2)

Metodele de obtinere a filmelor de CNT-uri aliniate au fost ulterior mult perfectionate. De exemplu, prin procesarea detaliata a suprafetei unui semiconductor (folosit ca substrat – ex. siliciu) se pot realiza filme de CNT-uri aliniate si structurate in retele perfect periodice.



Sursa: M. Höring, M. Maschke,
US Patent application, No 20110087062

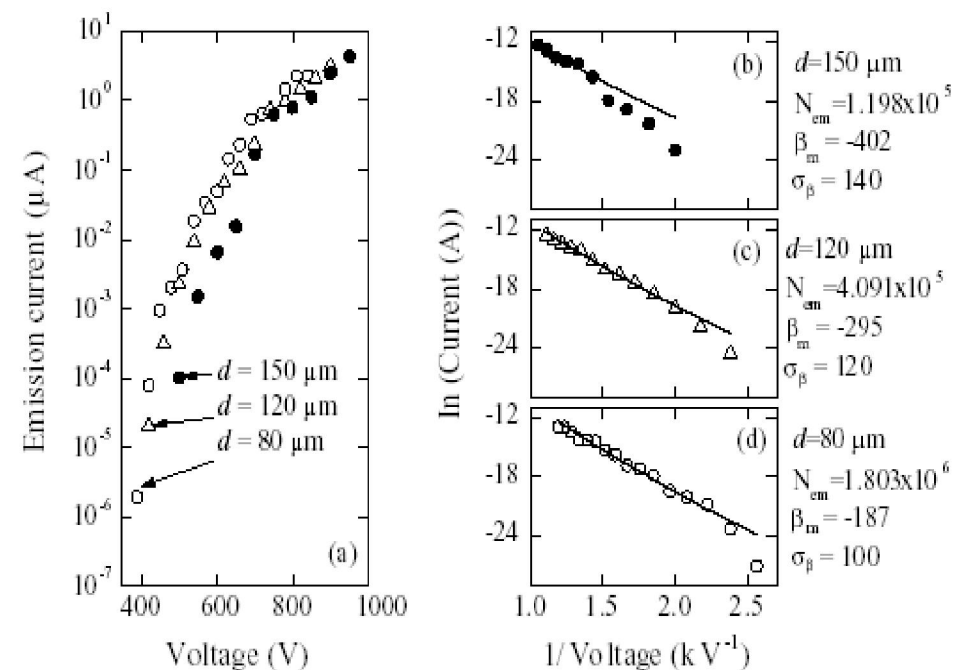
Modelarea emisiei in camp din CNT-uri

Aspectele cele mai importante care trebuie luate in considerare:

Comportarea bi-dimensională a gazului de electroni într-o foaie de grafenă.

Cuantificarea datorită confinării transversale induse de înfășurarea extrem de strânsă a grafenei.

Ecranarea reciprocă ce apare între tuburi vecine atunci când catodul este un film de CNT-uri aliniat.



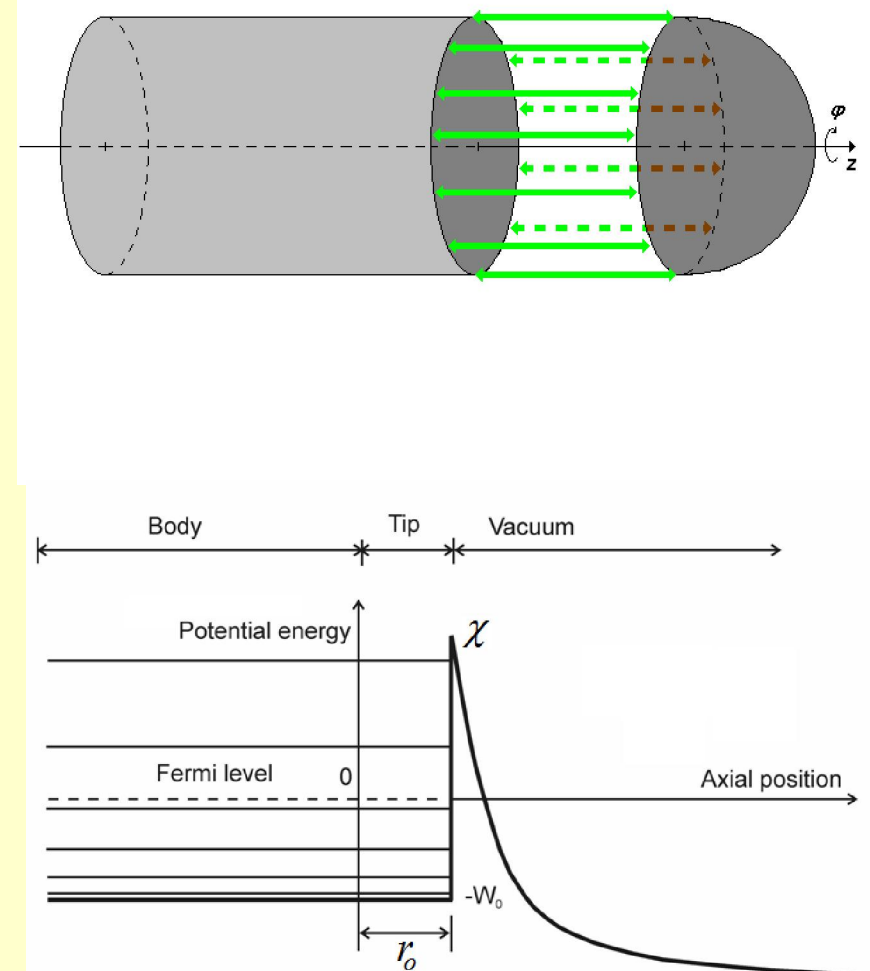
V. Filip, D. Nicolaescu, and F. Okuyama, *Modeling of the Electron Field Emission from Carbon Nanotubes*, J. Vac. Sci. Technol. B 19(3), 1016 (2001).

V. Filip, D. Nicolaescu, M. Tanemura, and F. Okuyama, *Modeling the electron field emission from carbon nanotube films*, Ultramicroscopy, 89(1-3), 39 (2001).

V. Filip, D. Nicolaescu, M. Tanemura, and F. Okuyama, *The influence of the electronic structure on the field electron emission from carbon nanotubes*, J. Vac. Sci. Technol. B 21(1), 382 (2003).

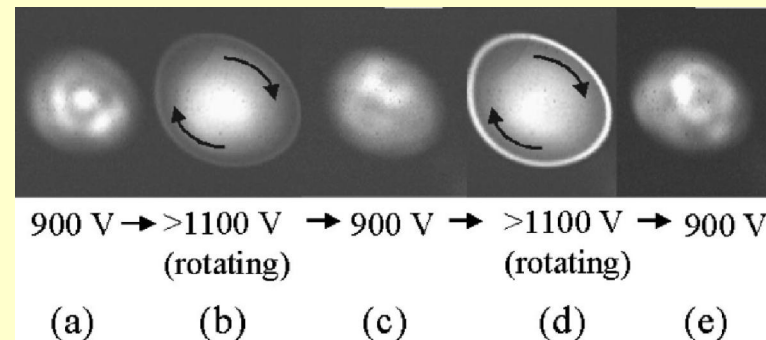
Modelul electronilor 2D cvasi-liberi

Avand in vedere aceste aspecte, un model simplu si eficient este cel al electronilor bidimensionali (2D) cvasi-liberi: electronul este considerat ca evolueaza pe o varietate 2D obtinuta din reuniunea unui cilindru cu una (sau doua) emisfere, avand energia potentiala uniforma.



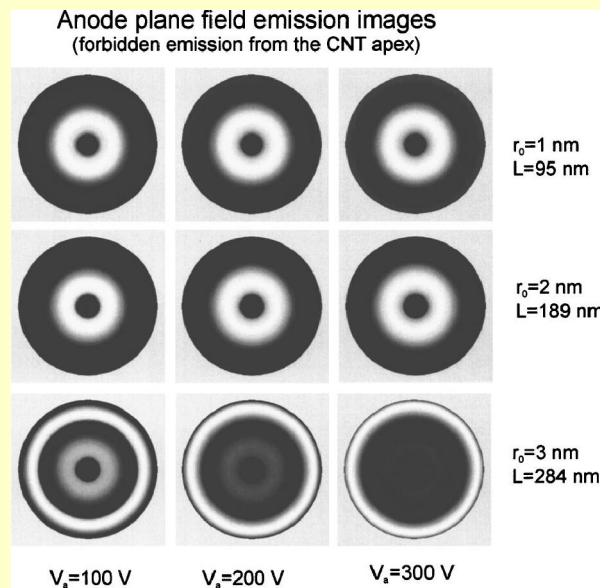
L. D. Filip et al., *Electron transfer from a carbon nanotube into vacuum under high electric fields*, J. Phys.: Condens. Matter 21, 195302 (2009).

Imagini de forma inelara la emisia din CNT

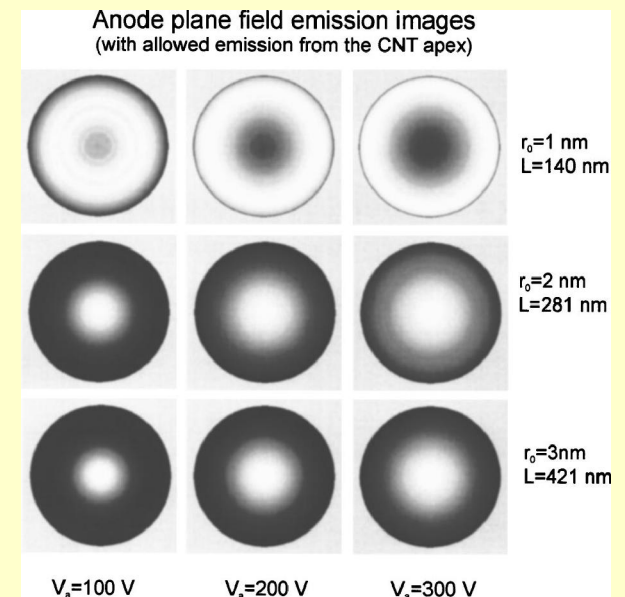


K. A. Dean et al. J. Vac. Sci. Technol. B 21(2), 868 (2003).

Folosind modelul electronilor 2D cvasi-liberi, aparitia unor astfel de imagini poate fi explicata.

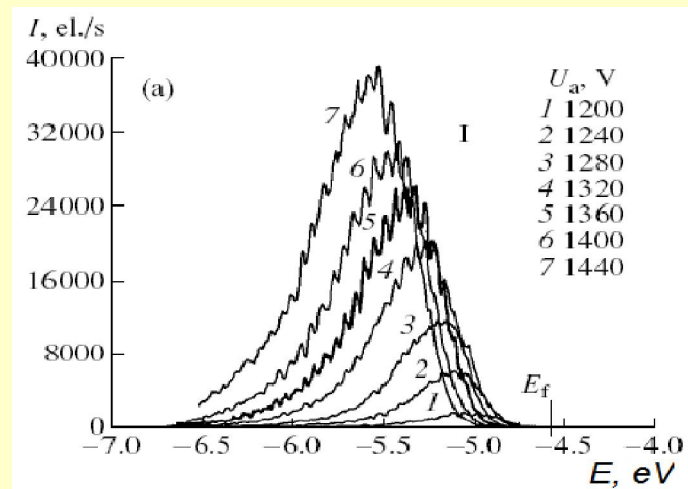


L. D. Filip et al. J. Vac. Sci. Technol. B 23(2), 649 (2005).

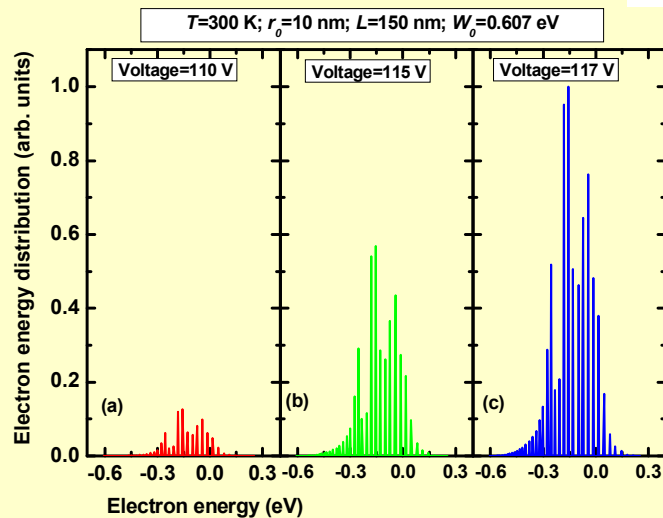


Structura fina a spectrelor de energie a electronilor emisi din CNT

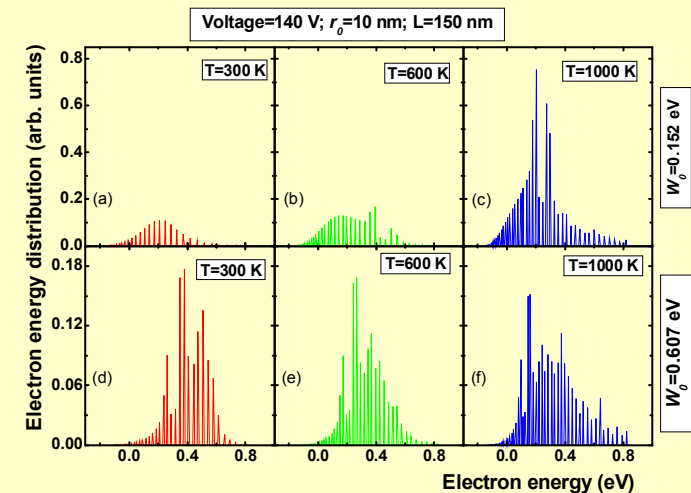
Spectrul experimental pentru CNT-uri are o structura fina care nu se poate explica prin modelele emisiei din bulk, dar apare in calculele facute cu ipoteza electronilor 2D cvasi-liberi.



*V. M. Lobanov et al.
Tech. Phys. Lett.
32(12), 1074 (2006).*



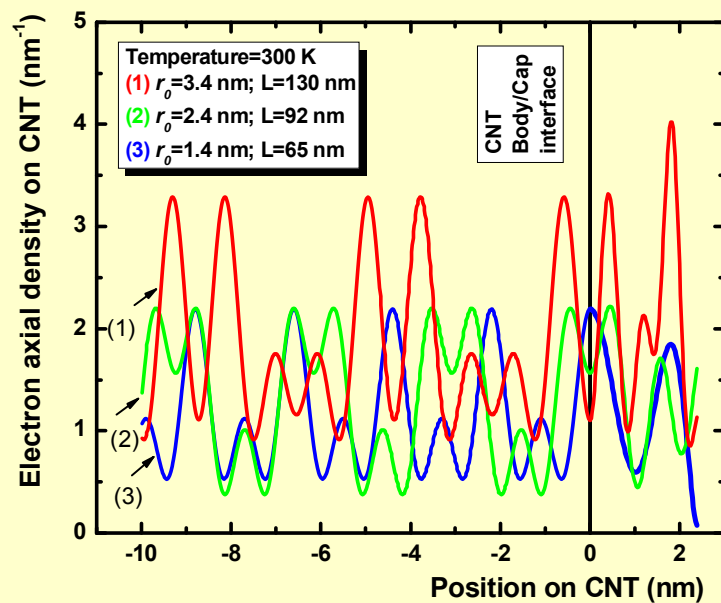
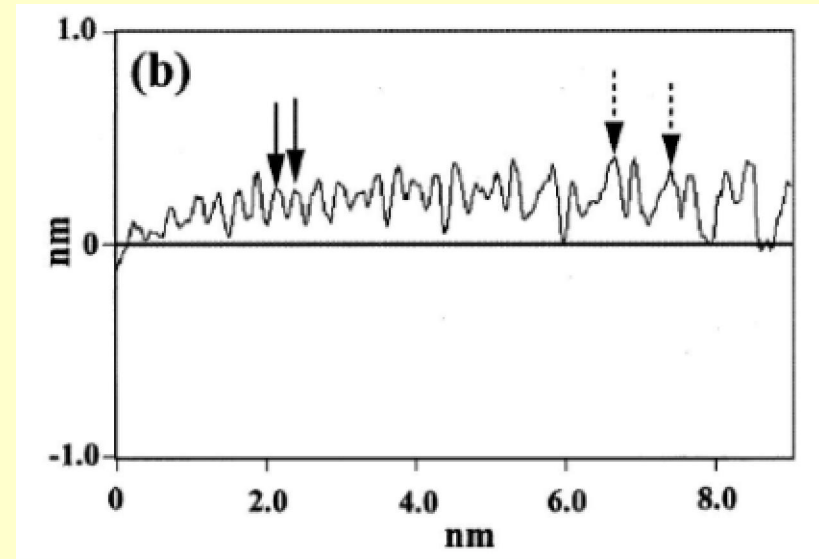
*L. D. Filip et al. J.
Vac. Sci. Technol. B
24(2), 874 (2006).*



Distributia axiata a electronilor cvasi-liberi pe CNT

Explorarea prin STM a unui CNT, in lungul acestuia, indica variatii periodice ale densitatii de electroni. Calculul bazat pe modelul de electroni 2D cuasi-liberi produce diagrame similare.

*Hassanien et al. Appl.
Phys. Lett 78(6), 808
(2001).*



*L. D. Filip et al. J.
Vac. Sci. Technol. B
24(2), 874 (2006).*

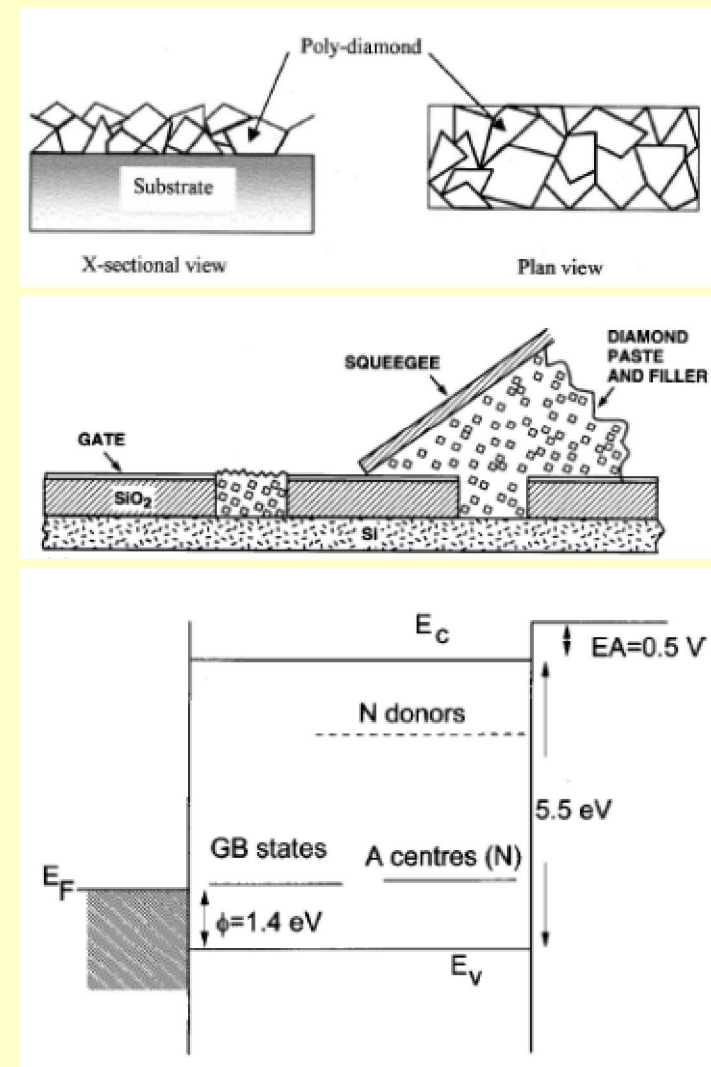
Emisia electronica in camp din diamant

Diamantul apare ca material interesant pentru emisia in camp datorita afinitatii electronice foarte reduse sau chiar negative (de-a lungul anumitor directii cristaline) si datorita suprafetei sale extrem de stabile.

Cea mai importanta dificultate este de a aduce electroni in banda de conductie a diamantului. Pentru diamant nedopat, aceasta se poate face aplicand campuri externe foarte mari (suportate bine, fara strapungeri, de acest material).

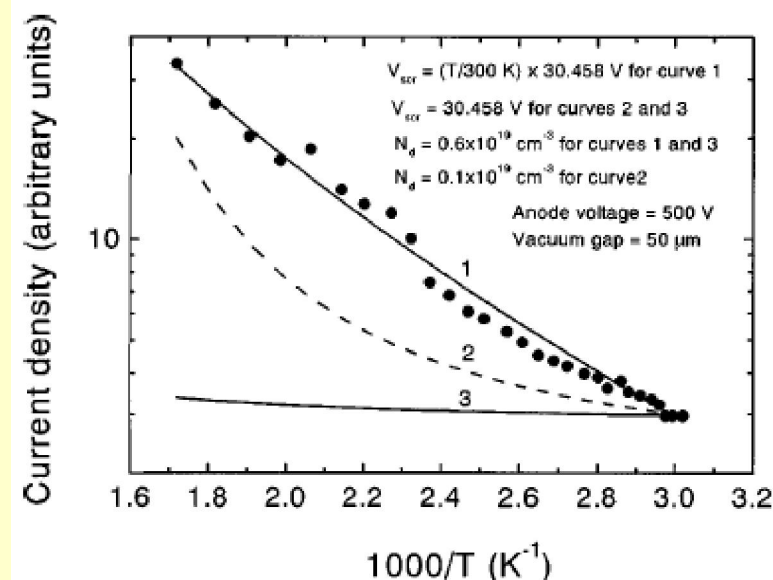
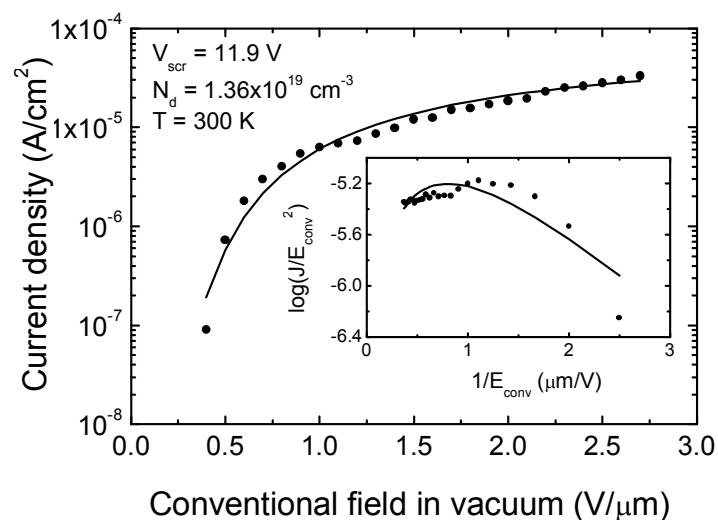
Folosind diamant policristalin sau nanodiamant, tensiunea de extractie se poate diminua cu doua ordine de marime.

Totusi, emisia are loc din puncte localizate intamplator (de fapt din straturile grafitice formate in jurul granulelor de diamant) si de aceea electronii emergenti sunt dificil de focalizat.



Sursa: M. W. Geiss et al., Appl. Phys. Lett. 67, 1328 (1995).

Emisia din diamant dopat cu azot



V. Filip et al., *Calculation of the field emission current density from n-Si through injection in N-doped diamond*, J. Vac. Sci. Technol. B 18(2), 937 (2000).

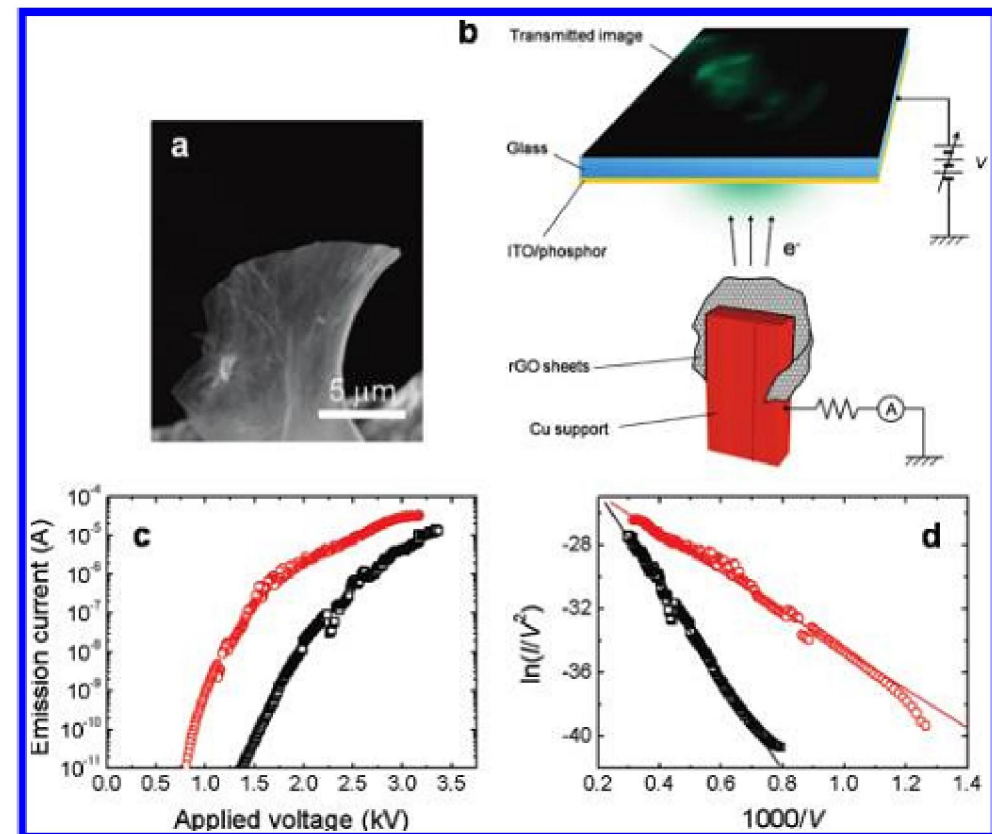
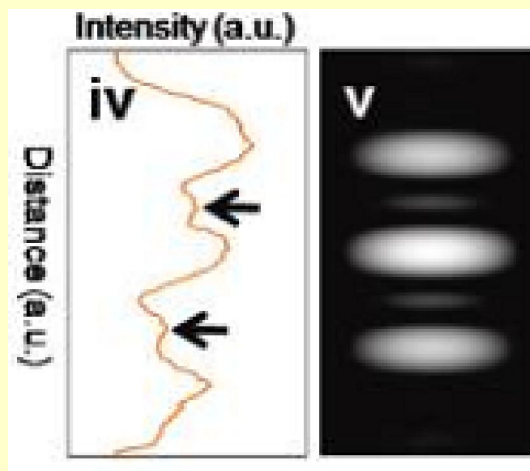
Diamantul dopat cu azot si crescut prin metode epitaxiale, in filme, pe substraturi de siliciu s-au dovedit a avea un potential de extractie extrem de mic (de ordinul catorva volti). Electronii sunt de fapt injectati in banda de conductie a diamantului din substrat printr-o bariera Schottky formata la interfata (azotul este un donor cu energie joasa - deep donor - in diamant si poate injecta electroni in banda de conductie a Si).

Folosind acest model si tinand seama de ecranarea produsa de sarcina spatiala in diamant, diagramele experimentale curent-tensiune si curent-temperatura pot fi bine reproduse.

Emisia din foi de grafena

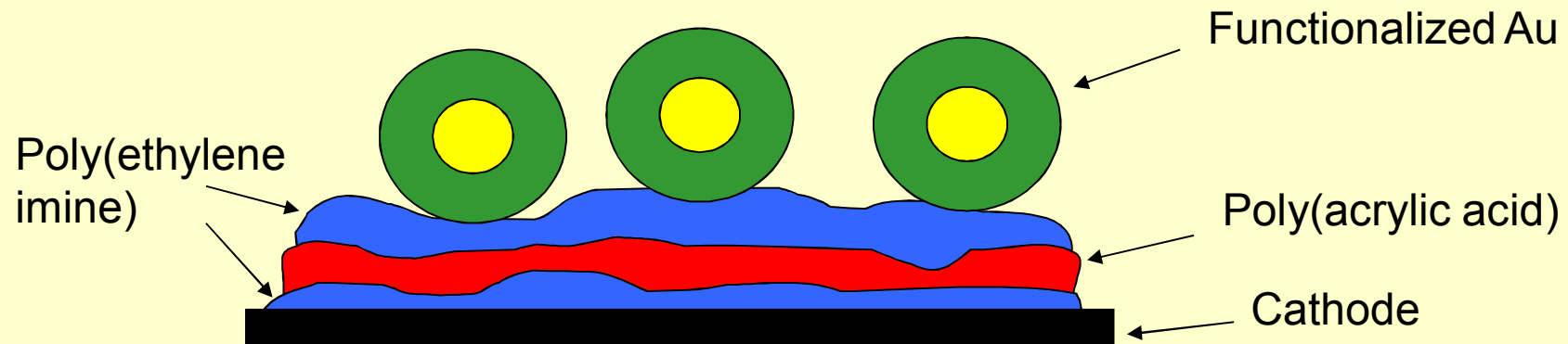
Foi de grafena oxidate au fost recent folosite ca emitori in camp. Se observa emisia la campuri efective foarte coborate si din multiple puncte ale muchiei de grafena.

Puncte de emisie plasate la distante de cativa nanometri prezinta efecte de interferenta, sugerand ca fasciculele de electroni emise sunt coerente.

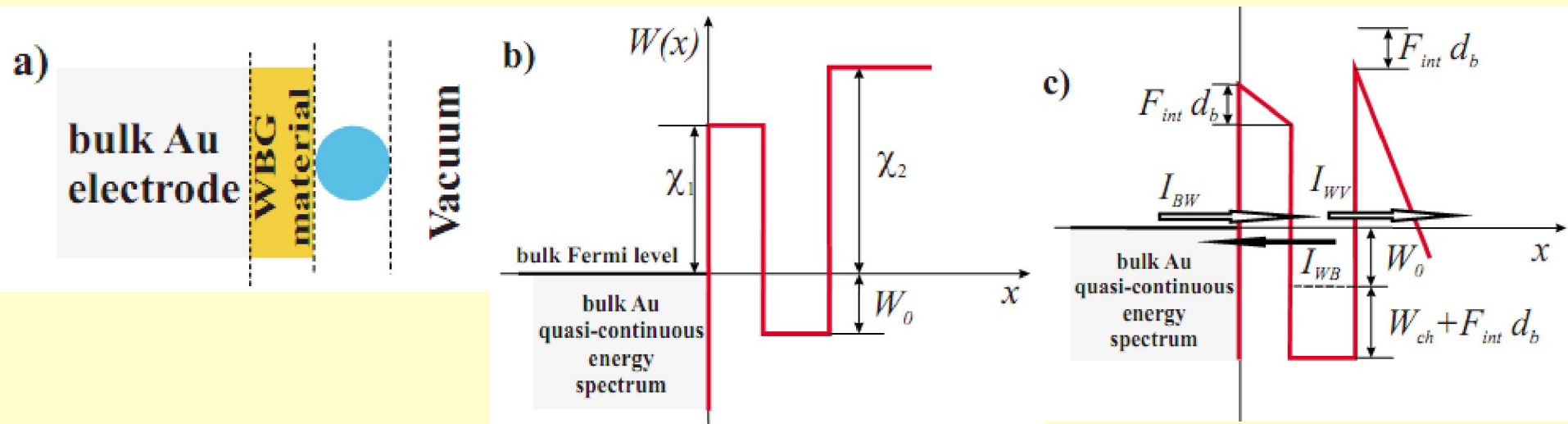


Sursa: H. Yamaguchi et al., *Field Emission from Atomically Thin Edges of Reduced Graphene Oxide*, ACS Nano 5, 4945 (2011).

Emisia din filme compozite, cu incluziuni nanometrice conductoare



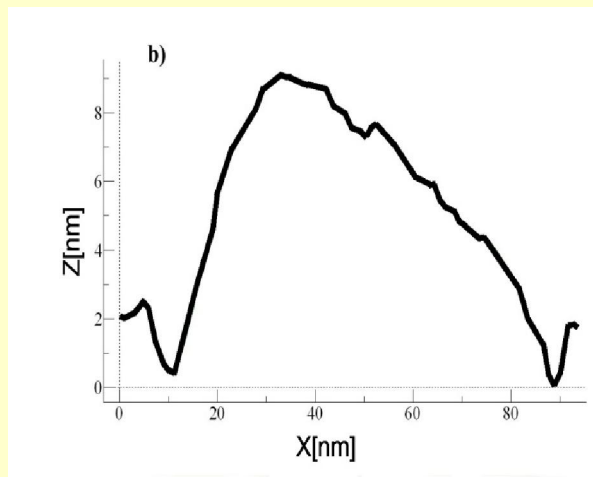
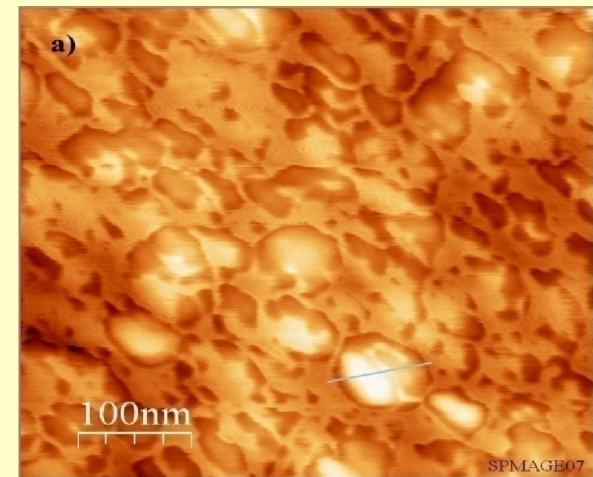
Emisia electronica din straturi compozite cu incluziuni conductoare poate produce la temperaturi obisnuite efecte de genul blocadei Coulomb.



L. D. Filip et al. Phys. Rev. B 79, 245429 (2009).

Emisia din filme cu incluziuni nanometrice de Au

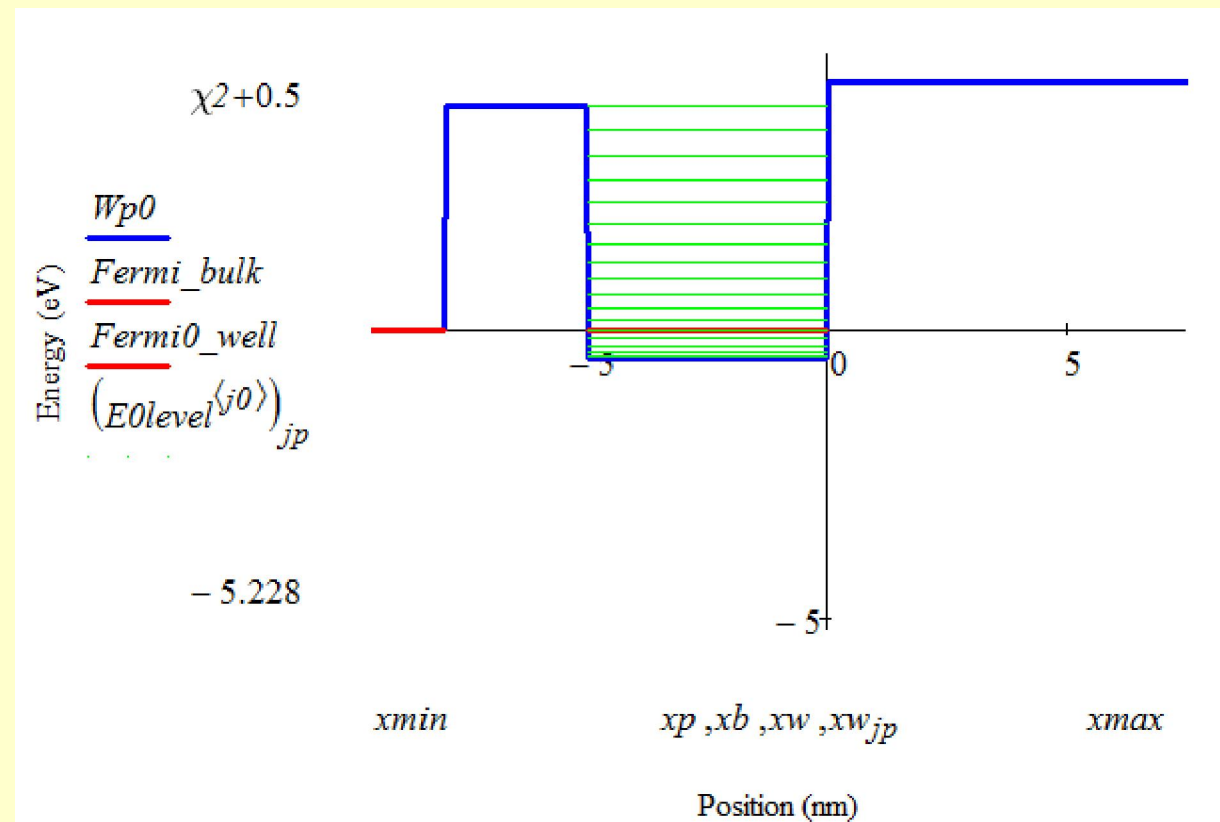
- Depunerea filmului de particule de Au se face prin proceduri chimice (layer-by-layer).
- Suprafata apare uniform acoperita cu particule nanometrice
- Investigarea SEM si AFM poate releva dimensiunile medii ale particulelor depuse. In cazul din figura, particula masurata are un diametru mediu de 10 nm.



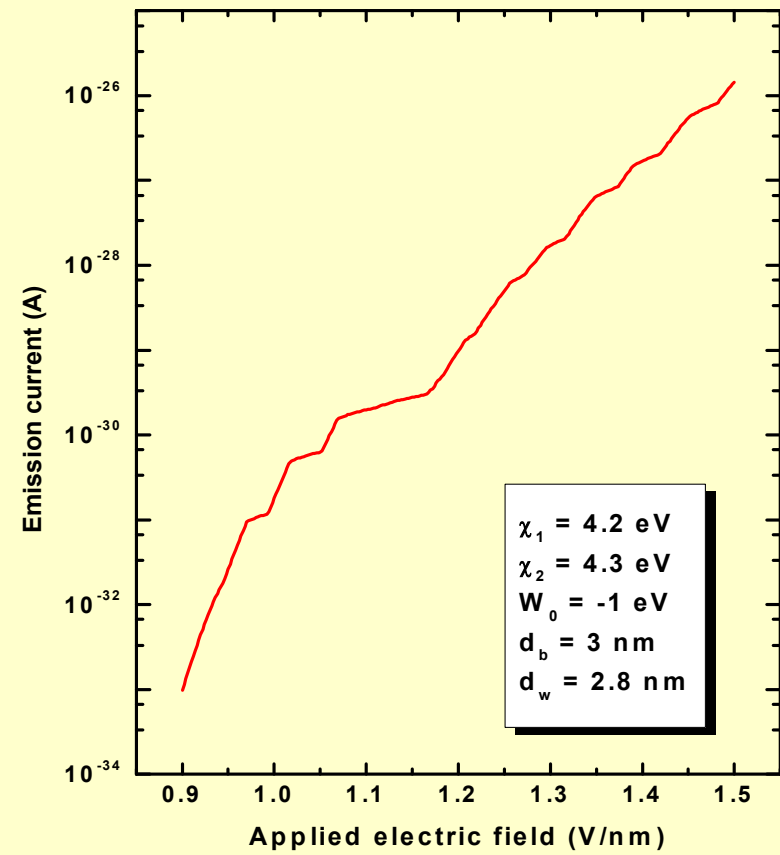
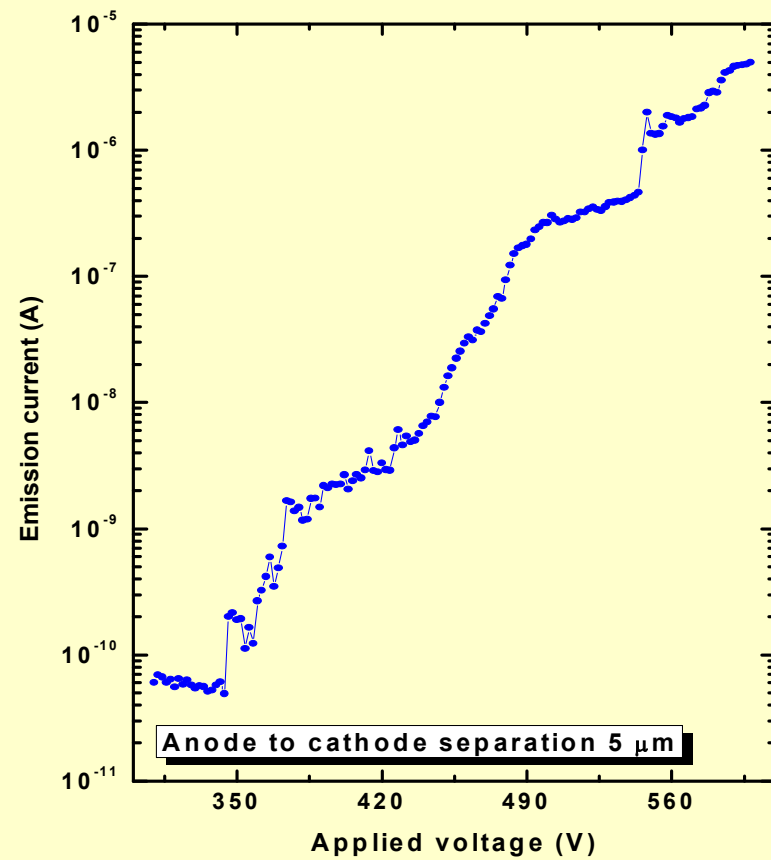
*L. D. Filip et al. Phys. Rev. B
79, 245429 (2009).*

Modelul teoretic: tunelare secventiala cu incarcarea electrostatica a nano-particulei

Applied field = 0 V/nm



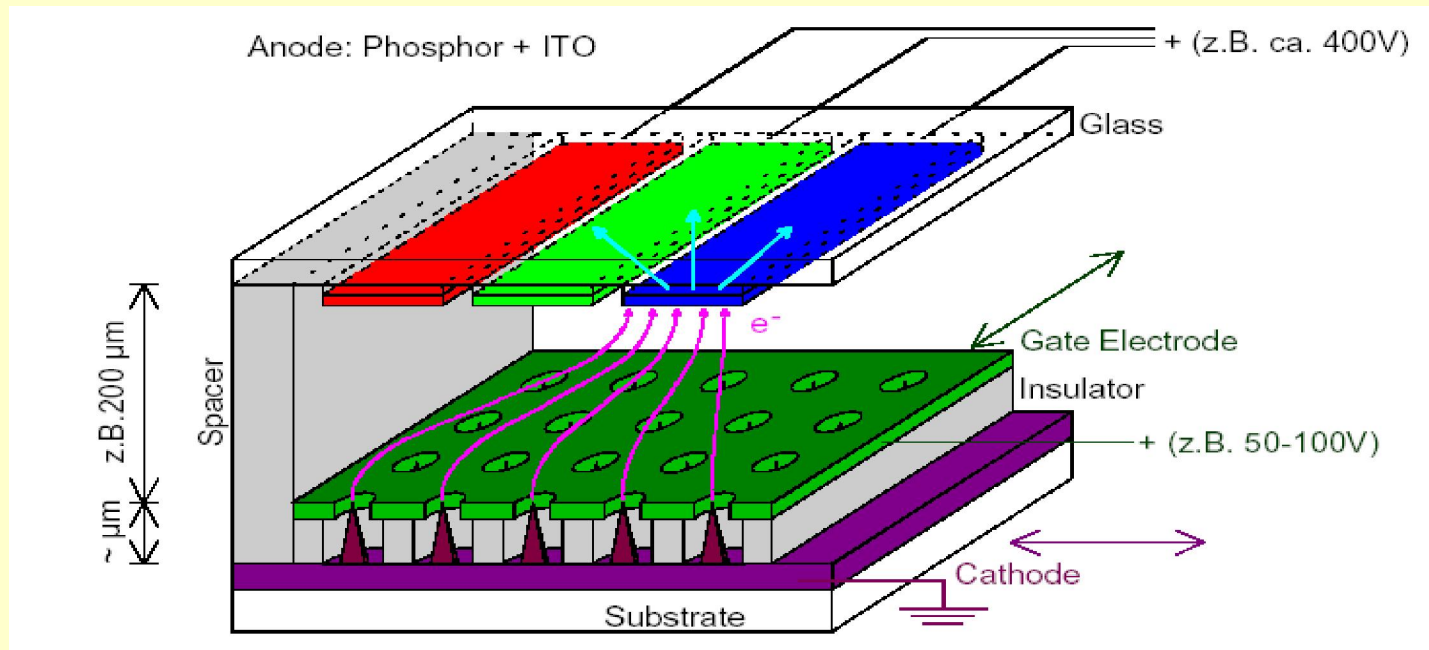
Rezultate



L. D. Filip et al. Phys. Rev. B 79, 245429 (2009).

Aplicatii

Aplicatii comerciale: display-ul cu emisie in camp (FED)



Avantaje fata de LCD-uri sau display-uri cu plasma:

- Consum de energie foarte scazut
- Rezolutie marita
- Grosime si greutate mai mici
- Nu apar efecte unghiulare in vizibilitate

Display-ul cu emisie in camp fabricat de Motorola

Caracteristici:

Diagonala 15";

Rezolutie VGA (640x480)

W/ 8 Bit/color;

Curent de emisie de $2 \mu\text{A}$ /
pixel color;

250 varfuri emise / 1
subpixel color.



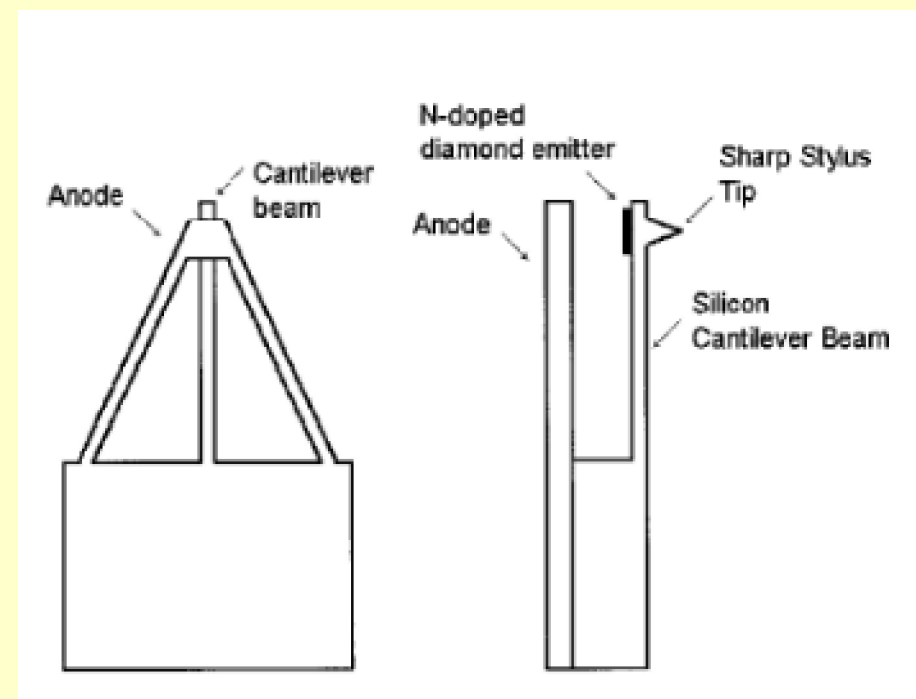
Sursa: K. L. Jensen, Theory and Simulation of Field Emission from
Microstructures, Naval Research Laboratory presentation, May 10, 2001

Senzor de temperatura bazat pe emisie in camp din n-diamant

Stratul catodic este plasat pe cantileverul unui AFM, pe partea opusa a varfului de scanare. Astfel se pot face simultan atat scanari mecanice cat si termice ale probei.

Sensibilitatea termica a microprobei este asigurata de o dioda cu FE care are catodul format din diamant dopat cu azot si depus pe n-Si.

Dependenta exponentiala a curentului de emisie de temperatura permite obtinerea unei inalte sensibilitati a microprobei.

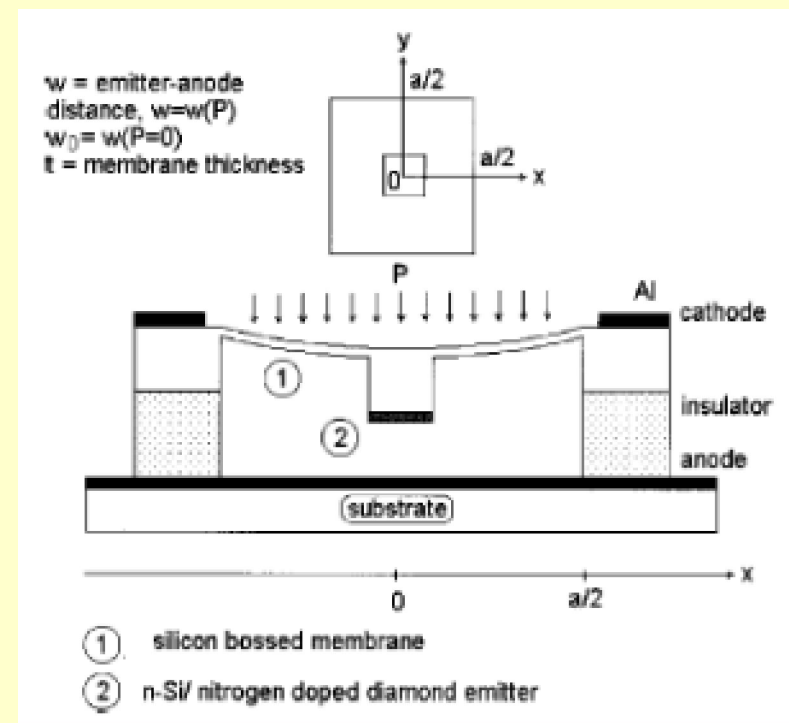


D. Nicolaescu, V. Filip, J. Itoh, and F. Okuyama,
*Proposal and modeling of a novel thermal microprobe
using n-Si /nitrogen doped diamond cathodes*, J. Vac.
Sci. Technol. B 18(2), 1073 (2000).

Sensor de presiune bazat pe emisie in camp din N-diamant

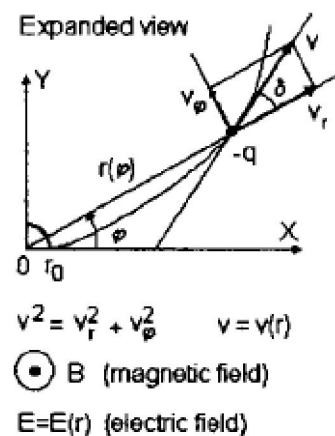
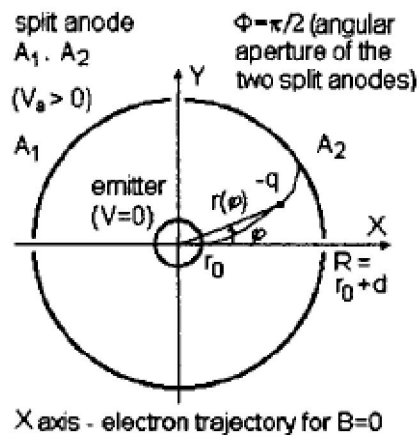
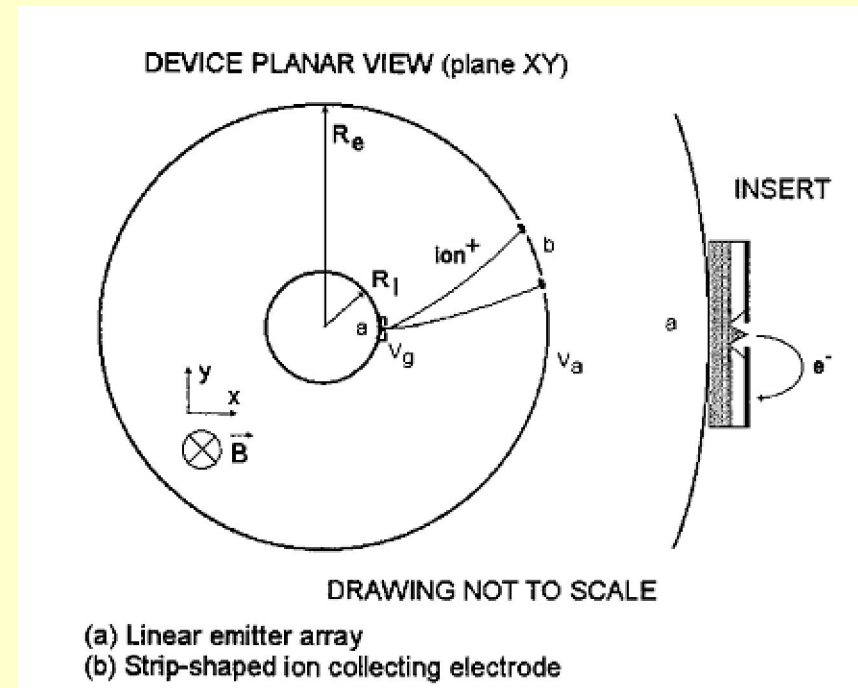
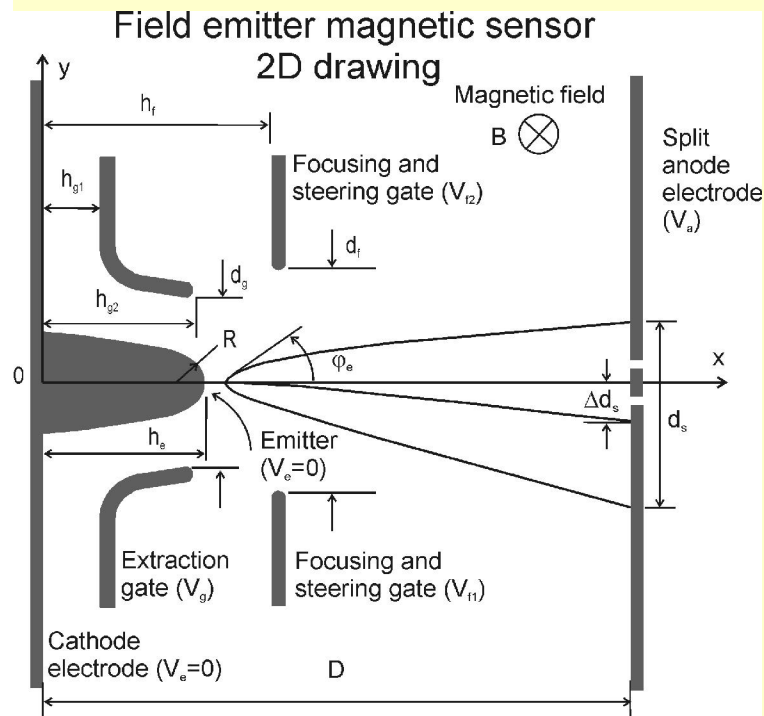
Dispozitivul contine o membrana de Si ca element sensibil la presiune. Membrana are atasata in centru un suport cu o depunere de N-diamant.

Mentinand curentul de emisie constant, indoirea membranei sub actiunea presiunii externe determina micsorarea tensiunii de lucru. Dependenta dintre deplasarea centrului membranei si tensiunea aplicata este liniara.



D. Nicolaescu, V. Filip, J. Itoh, and F. Okuyama, *Analysis of a pressure sensor using n-Si/nitrogen doped diamond cathodes*, J. Vac. Sci. Technol. B 18(2), 1077 (2000).

Senzori magnetici si spectrometre de masa bazate pe emisie in camp



D. Nicolaescu and V. Filip, *Modeling of a magnetic sensor based on vacuum field emission*, Applied Surface Science 94/95, 87 (1996).

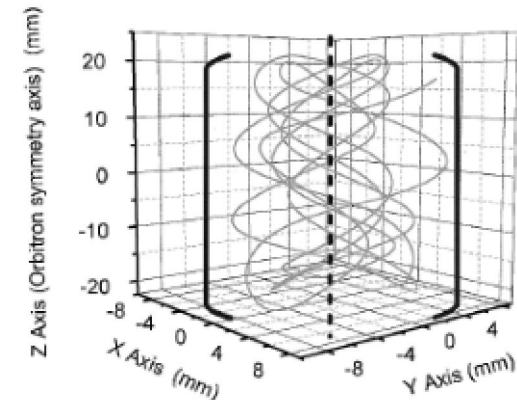
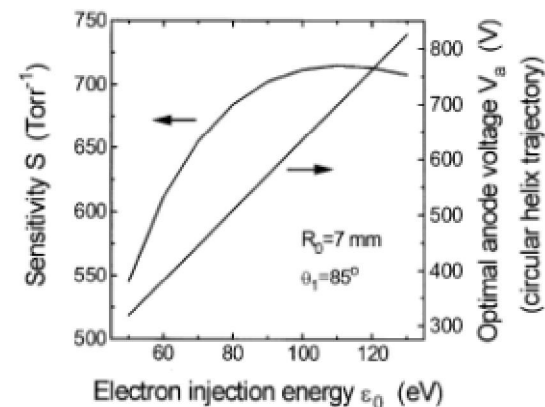
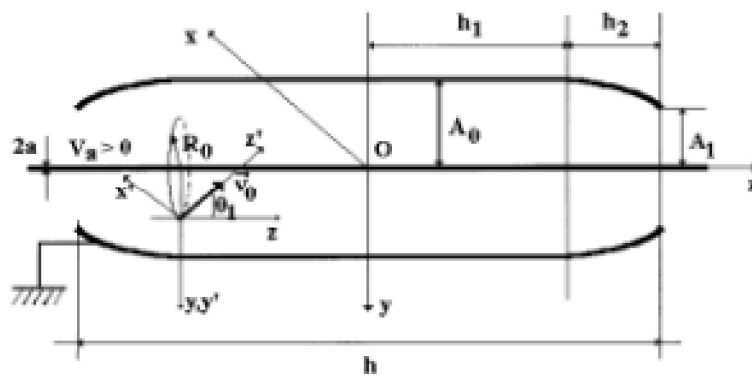
D. Nicolaescu, V. Filip, J. Itoh, and F. Okuyama, *Modeling of a miniaturized mass spectrometer with field emission electron source*, Applied Surface Science 146, 217 (1999).

D. Nicolaescu, V. Filip, and J. Itoh, *Field emission magnetic sensor with steered focused electron beam*, Jpn. J. Appl. Phys. 40(4A), 2173 (2001).

Senzori de vid bazati pe emisie in camp

Surse de electroni (FE) de dimensiuni micronice se pot folosi in configuratii speciale de electrozi pentru care lungimile traiectoriilor electronice in spatiul de lucru sunt mult extinse, marind astfel probabilitatea de ionizare.

Avantaje: Sensibilitate mare, dimensiuni reduse (de ordinul a 1 mm), tehnologie de fabricatie disponibila, operare continua pentru scopuri de monitorizare a presiunii in incinte vidate.



D. Nicolaescu, V. Filip, and F. Okuyama, *Study of the inverted-magnetron cold emission microelectronic vacuum gauge*, Ultramicroscopy 73, 129 (1998).

V. Filip, D. Nicolaescu, F. Okuyama, and J. Itoh, *Electron motion and confinement in the orbitip vacuum gauge. I. Theory*, Ultramicroscopy 79, 159 (1999).

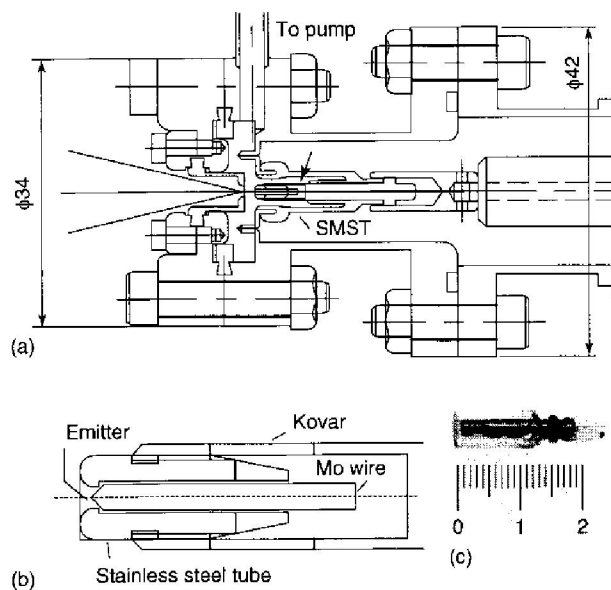
D. Nicolaescu, V. Filip, F. Okuyama, and J. Itoh, *Electron motion and confinement in the orbitip vacuum gauge. II. Modeling results*, Ultramicroscopy 79, 167 (1999).

Surse de raze x bazate pe emisie in camp

Tuburile clasice de raze x au surse de electroni bazate pe emisie termica (TE). Aceste componente se pot inlocui cu surse de electroni prin emisie in camp.

Avantaje:

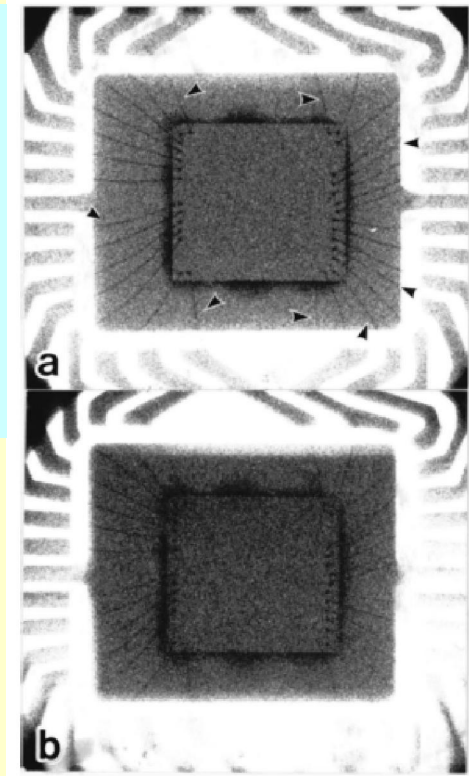
- ❖ Rezolutie superioara in comparatie cu tuburile bazate pe surse TE de electroni.
- ❖ Posibilitatea miniaturizarii aparatului de raze x pentru aplicatii in microelectronica, defectoscopie, medicina.



Schita si fotografia unui tub de raze x miniaturizat (MXT).

Prin amabilitatea Prof. Fumio Okuyama, Nagoya Institute of Technology, Japonia

Radiografia
ounui circuit
integrat realizata
(a) cu un tub de
raze x bazat pe
FE si (b) cu un
tub de raze x
bazat pe TE.

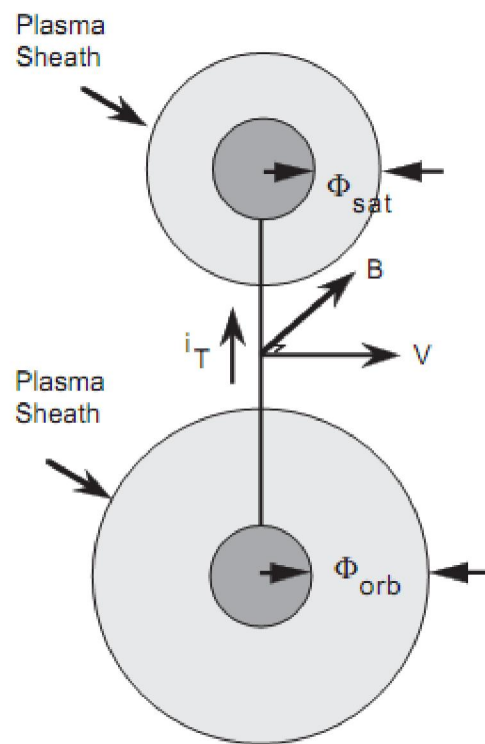


H. Sugie, M. Tanemura, V. Filip, K. Iwata, K. Takahashi and F. Okuyama, *Carbon nanotubes as electron source in an x-ray tube*, Applied Physics Letters Volume 78, Number 17, p. 2578 (2001).

Sisteme de control al orbitelor satelitare

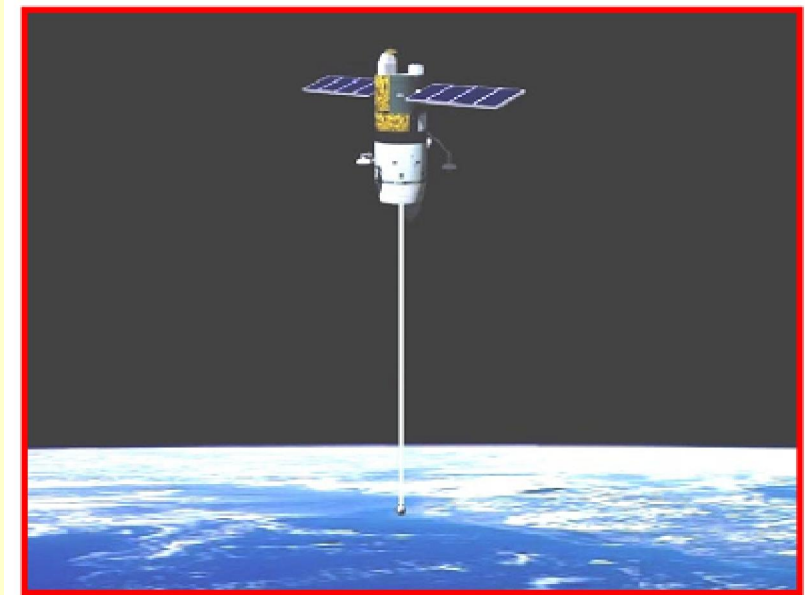
Un procedeu care nu implica folosirea de combustibil pentru propulsie: cablul de ancorare, care se deplaseaza in campul magnetic terestru si creeaza o tensiune electromotoare la capete.

Daca la capatul negativ se plaseaza un catod cu emisie in camp, al carui anod este chiar plasma inconjuratoare, atunci prin cablu se produce un curent care poate frana translatia satelitului => sistemul trece pe o orbita mai joasa.



Sursa: V. M. Aguero and R. C. Adamo, 6th Spacecraft Charging Technology Conference, AFRL-VS-TR-20001578, 1 Sept. 2000, p. 347

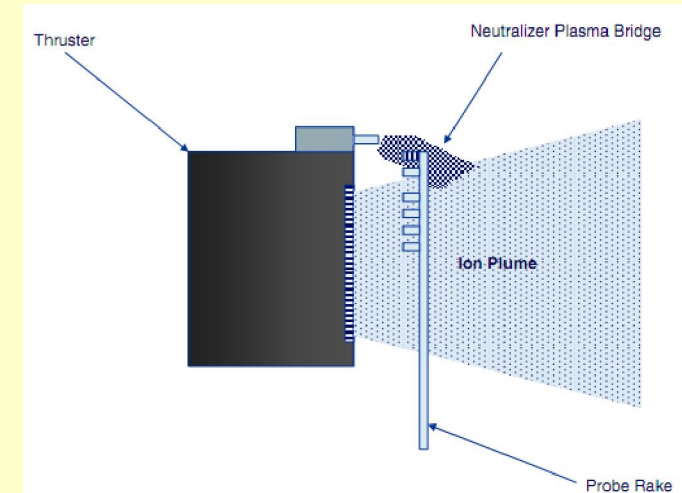
Daca acest curent se inverseaza cu o sursa de tensiune interna, atunci viteza orbitala se mareste => sistemul trece pe o orbita mai inalta. Catodul de emisie electronica trebuie sa reziste la bombardament ionic (vid de 10^{-5} Torr) => filme de CNT-uri



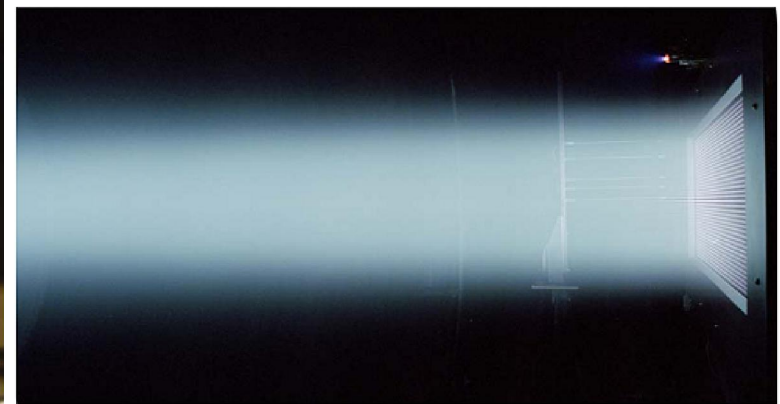
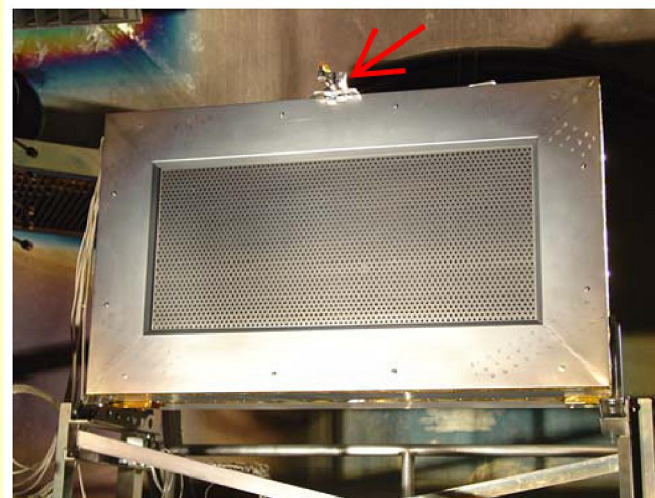
Sursa: K. L. Jensen, Theory and Simulation of Field Emission from Microstructures, Naval Research Laboratory presentation, May 10, 2001

Neutralizatoare pentru fascicule ionice folosite la micropropulsie si in implantatoare

Fasciculele ionice tind sa divearga din cauza repulsiei reciproce a ionilor. Acest fenomen diminueaza tractiunea sistemelor de propulsie ionica si precizia dispozitivelor de implantare. In plus, in cazul operarii in spatiu, un motor ionic cu fascicol incarcat poate acumula rapid o sarcina negativa mare pe vehiculul spatial. Pentru a evita aceste efecte, fasciculele ionice se neutralizeaza prin injectie de electroni, iar ca sursa eficienta se pot folosi FEA-uri.



Sursa: J. E. Foster et al.,
Journal of Propulsion and
Power 23(4), p. 828 (2007)



Noi generatii de emitori extrem de eficienti

Martie 2013: National Institute of Standards and Technology si University of Maryland, College Park

Materialul de baza: carbura de Si (material extrem de dur).

Prelucrare chimica, la temperatura camerei, produce o accentuata porozitate a materialului, din care este ulterior formata o retea de emitori foarte subtiri si avand o suprastructura emisiva de dimensiuni nanometrice.

Rezulta o sursa de electroni extrem de fiabila, cu spectru energetic foarte ingust, si deci foarte potrivita pentru utilizarea in imagistica cu raze x de inalt contrast.

