

Nanofabrikacija single-hole tranzistora

Borna Radatović, JKU University Linz, Austria / PMF Zagreb

14.1.2016.

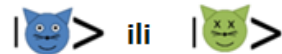
Sažetak

Cilj ovoga seminara bio je izraditi single-hole tranzistore koristeći se kvantnim točkama i nanožicama. Prilikom izrade uređaja (kvantnih tranzistora) koristili smo se e-beam litografijom (elektroničkom zrakom) te ALD-em a nakon izrade rađena su transportna mjerenja. Veći dio vremena imali smo problema s uzorcima pa nam mjerenja nisu pokazivali očekivane rezultate. Stoga smo uglavnom radili testne uzorke da bismo locirali izvor problema. Na kraju smo ustanovili da je problem bio u koraku s ALD-em, to jest izvoru TMA koji se koristi.

1. Teorijski uvod

Jedna od najambicioznijih predloženih ideja na području nanoelektronike jest iskorištavanje elektronskog spina za tranzistore ili kvantno procesiranje informacija. Za razliku od klasičnih bitova koji su nositelji informacije i koji mogu biti u dva stanja, kvante karakteristike spinova to jest superpozicija stanja otvara nove mogućnosti za pohranu informacija, što vidimo na slici 1.

Klasični bit:



Qubit:

$$|\psi\rangle = \alpha |\text{blue cat}\rangle + \beta |\text{green cat}\rangle$$

Slika 1. Usporedba klasičnog bita i kvantnog qubita.

Spinski stupanj slobode je veoma privlačan zato što je imun na dugodosežne elektrostatske Coulombove interakcije između naboja, a kao posljedica očekuju se duga koherencijska vremena za spinove. Loss i DiVincenzo [1] predložili su

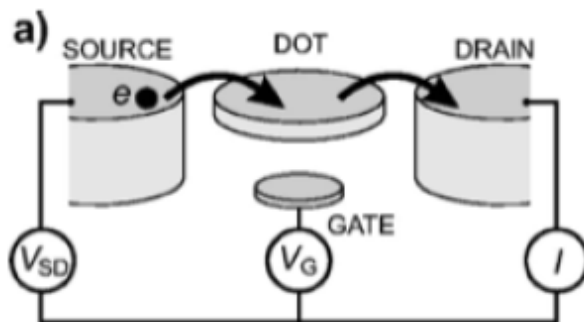
upotrebu elektronskog spina zarobljenog u litografski definiranoj kvantnoj točki (QD), kao elementarnog kvantnog bita (spin Q-bit) u kvantnom računalu (QC). Do sada su se na ovome području uglavnom promatrali GaAs-bazirane kvantne točke (QD). U GaAs kvantna koherencija od elektronskog spina se gubi na relativno maloj vremenskoj skali zbog hiperfine interakcije s nuklearnim spinovima, što predstavlja izuzetan problem za izradu spinski baziranih kvantnih točaka od ovoga materijala. Tijekom proteklih par godina postojali su pokušaji izrade kvantnih točaka od InAs poluvodičkih nanožica, takozvani spin orbit q-biti [2]. Ipak opažena koherencijska vremena su razmjerno kratka, u nanosekundnoj skali.

U razmatranjima oko koherencijskih vremena, pojavio se SiGe kao obećavajući materijala za spin q-bite [3]. Očekuje se puno duže koherencijsko vrijeme SiGe nanostrukture, zbog nedostatka hiperfine interakcije (u izotropski pročišćenim kristalima). Proteklih par godina provedeno je intenzivno istraživanje za razvoj kvantnih točki u SiGe [4-11]. Izmjereno je spinsko relaksacijsko vrijeme (T_1) od par sekundi za elektrone u SiGe. Šupljine su se počele tek nedavno promatrati, zbog toga što je očekivano veoma kratko relaksacijsko vrijeme zbog spin orbit interakcije. Ipak dobivena T_1 vremena za InGaAs kvantne točke su par stotina mikrosekundi unatoč tome što imamo hiperfinu interakciju i spin orbit vezanje [12]. Šupljinske kvantne točke su ostvarene u Ge/Si nanožicama [13,14] a kasnije u SiGe *self-assembled* kvantnim točkama.

Cilj ovoga rada bio je izrada single hole tranzistora baziranom na otocima u obliku točaka i nanožici.

1.1. Osnove kvantnih točaka

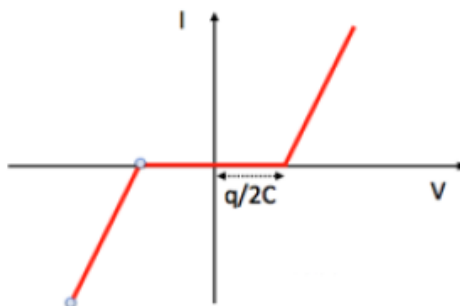
Kvantne točke su niskodimenzionalne strukture koje zarobljuju elektrone i šupljine u tri dimenzije, zbog čega se oni mogu lokalizirati. U malim kvantnim točkama, diskretni energetske nivoi mogu se promatrati i pod utjecajem magnetskog polja možemo maknuti spinsku degeneraciju od jednog orbitalnog nivoa. Da bismo promatrali elektronska svojstva kvantne točke potrebno je vršiti nisko temperaturna transportna mjerenja, koja iskorištavaju fenomen Coulombove blokade. Kvantna točka je vezana za metalne kontakte, pomoću kojih vršimo izmjenu naboja. Također je kapacitivno vezana za jednu gate elektrodu koja može uskladiti elektrokemijski potencijal kvantne točke (prikaz na slici 2).



Slika 2. Shematski prikaz spajanja kvantne točke na metalne kontakte i gate elektrode. Preuzeto s [15].

1.2. Coulombova barijera

Energija pohranjenja u paralelnom kondenzatoru jednaka je $E = \frac{Q^2}{2C}$. Ako je kondenzator *leaky* ("curi naboj iz njega") onda pojedini naboj može tunelirati kroz izolatorski sloj između jedne ploče kondenzatora do druge. Ali da bi se to dogodilo, potrebna je energija koja će kompenzirati odboj naboja. Potrebnu energiju moguće je dati tako da narinemo razliku napona između dvije ploče kondenzatora. Tada napon može podići takozvanu Coulombovu barijeru (prikaz na slici 3).



Slika 3. Efekt Coulombove barijere u *leaky* nanokondenzatoru. Ako se primjeni dovoljno visok napon ($V > \frac{q}{2C}$) može doći do podizanja Coulombove barijere.

U tablici 1 vidimo prikazanu promjenu u energiji koja je rezultat transfera jednog naboja kroz kondenzator. Za milimetarske kondenzatore, ova energija je reda veličine 10^{-7} , dok je za nanokondenzatore otprilike oko 1MeV. Stoga, iako Coulombova barijera nije evidentna u makroskopskim spojevima, zamjećujemo je na nanometarskoj razini spojeva (pri niskim temperaturama).

Tablica 1. Usporedba makroskopskog kondenzatora i nanokondenzatora, gdje je A površina ploče, d razmak između ploča, C kapacitet i ΔE promjena energije.

	A (nm^2)	d (nm)	C (F)	ΔE (eV)
nanokondenzator	80^2	1	$5.7 \cdot 10^{-17}$	0.0014
milimetarski kondenzator	$(5 \cdot 10^6)^2$	$2 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^{-13}$	$7.3 \cdot 10^{-7}$

1.3. Transport u trokontaktnim uređajima

Da bismo razumjeli transport kroz kvantne točke, koristimo se modelom konstante interakcije. On se bazira na dvije pretpostavke. Prva pretpostavka je da su Coulombove interakcije između elektrona u kvantnoj točki parametrizirane preko jednog kapaciteta C. Taj kapacitet je suma kapaciteta između točke i sourcea (izvora) C_S , točke i draina (odvoda) C_D te točke i gatea (vrata) elektrode C_G . Druga da je energetska spektar pojedine čestice nezavisan o broju elektrona.

Kada uzmemo ove pretpostavke, totalna energija od N-elektronske točke sa source naponom V_S , drain naponom V_D i gate naponom V_G dana je sljedećim izrazom:

$$U(N) = \frac{[-|e|(N - N_0) + C_S V_S + C_D V_D + C_G V_G]^2}{2C} + \sum_{n=1}^N E_n(B) \quad (1)$$

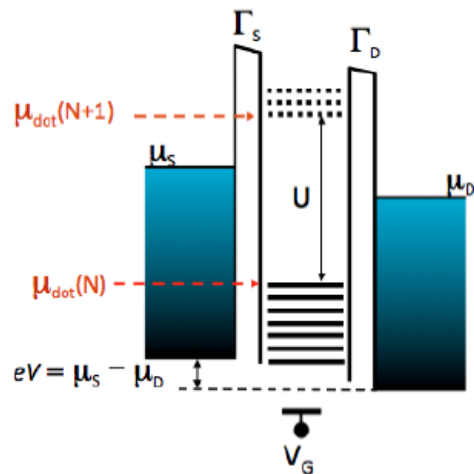
gdje je $-|e|$ naboj elektrona, N_0 broj elektrona u točki prilikom gate napona $V_G = 0$ te B primijenjeno magnetsko polje. Članovi $C_S V_S$, $C_D V_D$, $C_G V_G$ mogu se mijenjati kontinuirano. Posljednji član je suma preko svih zaposjednutih jednočestičnih energetskih nivoa. Kada se opisuju eksperimentalna istraživanja transporta, korisnije je uzeti elektrokemijski potencijal μ , jer μ ovisi linearano o naponu gatea i ta ovisnost je jednaka za sve N. Stoga je udaljenost između elektrokemijskih potencijalnih nivoa konstanta. Definicija $\mu(N)$ dana je sljedećim izrazom:

$$\mu(N) \equiv U(N) - U(N-1) = (N - N_0 - \frac{1}{2})E_C - \frac{E_C}{|e|}(C_S V_S + C_D V_D + C_G V_G) + E_n \quad (2)$$

gdje je $E_C = \frac{e^2}{C}$ energija punjenja. $\mu(N)$ opisuje tranziciju između točke s N elektrona i N-1 elektrona.

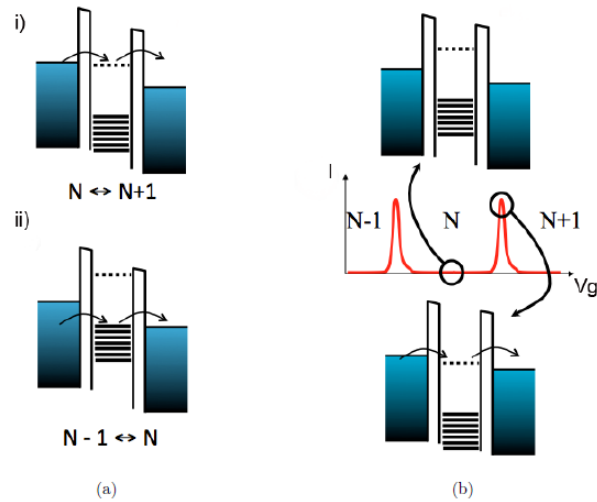
Kada je narinut prednapon $V_{SD} = V_S - V_D$ između sourcea i draina, otvara se energetska procjep između μ_S i μ_D .

$$\mu_S - \mu_D = -|e|V_{SD} \quad (3)$$



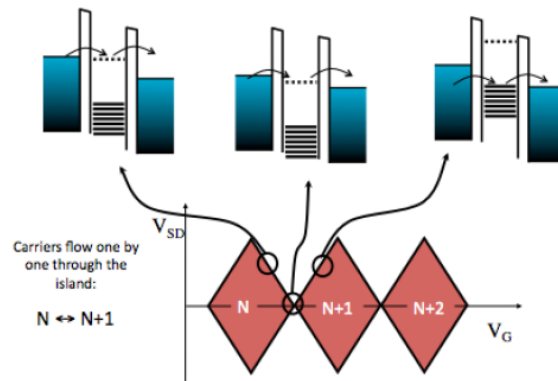
Slika 4. Ako nema elektrokemijskog potencijala ($\mu_{\text{dot}}(N + 1)$ ili $\mu_{\text{dot}}(N)$) koji leži između otvorenog procjepa $\mu_S - \mu_D$, transport je blokiran na niskim temperaturama.

Na niskim temperaturama transport je generalno blokiran, budući da niti jedan elektrokemijski potencijal od točke ne leži u otvorenom procjepu (slika 4). Postoje dva načina da dovedemo elektrokemijski potencijal između μ_S i μ_D . Prvi je da promijenimo napon gatea. Elektrokemijski potencijal točke se može pomicati ili gore ili dolje. U slučaju da se pomakne dolje (slika 5a.i), jedan elektron može tunelirati iz sourcea do točke i onda od točke do draina. U slučaju da potencijal ode gore, elektron može ići od točke do draina i onda se može zamijeniti elektronom iz sourcea (slika 5a.ii).



Slika 5. **a)** Ako se promjeni napon gatea, elektrokemijski potencijal točke se pomiče ili gore ili dole, što može rezultirati strujom kroz točku u slučaju da završi u otvorenom procjepu. **b)** tipično nema struje zbog Coulombove blokade i broj zarobljenih naboja je konstantan. Ali ako jedan od elektrokemijskih potencijala leži u otvorenom procjepu, možemo primijetiti vrhove u struji.

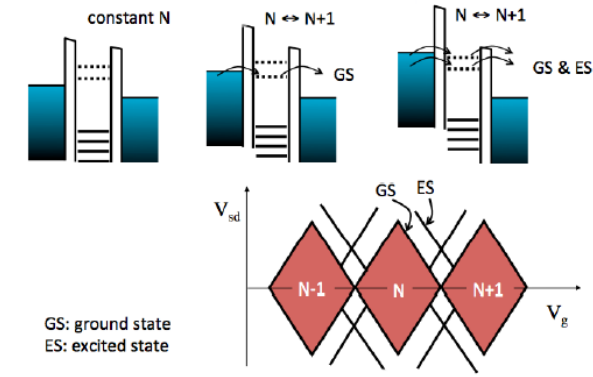
Drugi način da bi se podigla Coulombova barijera jest otvoriti prednaponski procjep (*bias window*). Ovisnost struje naspram source-drain naponu i naponu gatea (slika 6) prikazuje takozvane Coulombove dijamanate, koji su područja gdje nema toka struje. Između dijamanata odvija se transport pojedinih elektrona.



Slika 6. Mjerenja diferencijalne provodnosti (*differential conductance measurement*) vs source-drain i gate napona. Gornji dio objašnjava poravnanje elektrokemijskih potencijala .

Ako se procjep otvori još više, moguće je da uz osnovno stanje i pobuđeno stanje ima elektrokemijski potencijal koji leži u procjepu. Stoga naboji imaju

više načina da tuneliraju kroz točku i struja se povećava. U mjerjenjima diferencijalne provodnosti ovo povećanje rezultira s vrhom (slika 7).



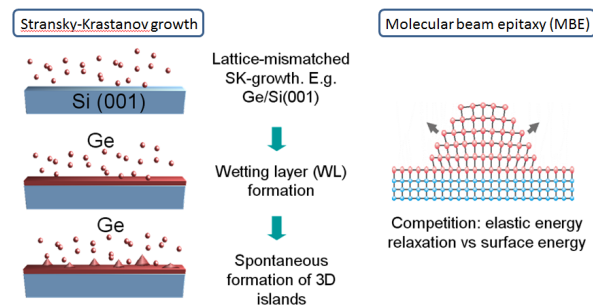
Slika 7. Mjerenja diferencijalne provodnosti (*differential conductance measurement*) vs source-drain i gate napona u prisutnosti pobuđenih stanja. Gornji dio objašnjava poravnanje elektrokemijskih potencijala. U režimu transporta pojedinih elektrona, u slučaju da nam je uređaj uključen, to jest ako ima transporta kroz pobuđena stanja primjećujemo vrhove (ES).

2. Eksperimentalni postav

Cijelokupni rad napravljen je u cleanroomovima u kojima se nalaze korišteni uređaji, a jedino su mjerenja napravljena u laboratoriju izvan cleanrooma.

2.1. Rast Si-Ge kvantnih točaka

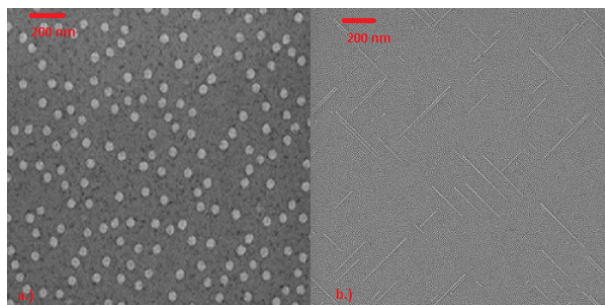
Korištene kvantne točke dobivali smo već napravljene na waferima koje smo kasnije izrezali na manje komadiće veličine 4.8 mm * 4.8 mm. Kvantne točke su dobivene iz dvodimenzionalnih elektronskih plinova (2DEG) deponirajući plin pomoću elektrostatskog gatea, takozvani Stransky-Krastanov rast [16]. Koristili smo se metodom beam epitaxy (MBE), a pojednostavljeni princip metode rasta vidimo na slici 8. Mi smo za naše istraživanje dobivali već napravljene uzorke i od toga smo započinjali proces izrade single-hole tranzistora.



Slika 8. Shematski rast kvantnih točaka.

2.2. SEM slike

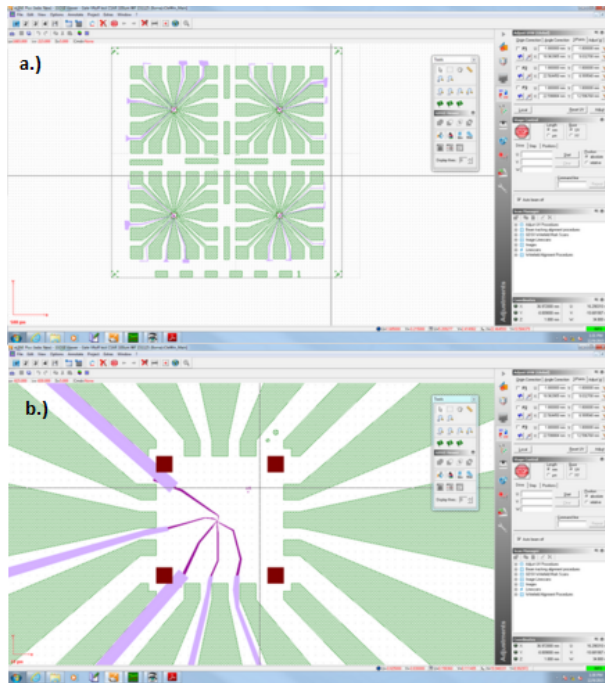
Prvi korak u izradi “kvantnog” tranzistora jest uzimanje SEM slika našeg uzorka, kako bismo odredili točne lokacije naših kvantnih točaka. Na slici 9 vidimo kako izgledaju korištene točke i odgovarajuću skalu veličine. SEM je ugrađen u e-beam uređaj.



Slika 9. a.) SEM slike korištenih kvantnih točaka. b.) SEM slike korištenih nanožica koje također imaju ulogu kvantnih točaka.

2.3. Dizajn u softveru

Nakon što smo locirali kvantne točke, sljedeći korak jest odrediti kako će naš dizajn izgledati. To se radi u posebnom softveru koji dolazi s e-beam uređajem. U njega unosimo uzete slike našeg uzorka i točne lokacije tih slika. Uzorak smo podijelili na 4 velika dijela veličine 2.4 mm* 2.4 mm te 4 manja od 100\mu m*100\mu m koja se nalaze na sredini većih područja, jer korišteni e-beam ima tako definirana područja pisanja (writefield area). Na slici 10 vidimo prikaz korištenog softvera i podjelu uzorka. Treba još napomenuti da se na slici 10. b) u sredini uzorka vide prvotno uzete SEM slike nakon što ih ubacimo u softveru, te baš zbog toga znamo gdje točno staviti naše kontakte na točke.



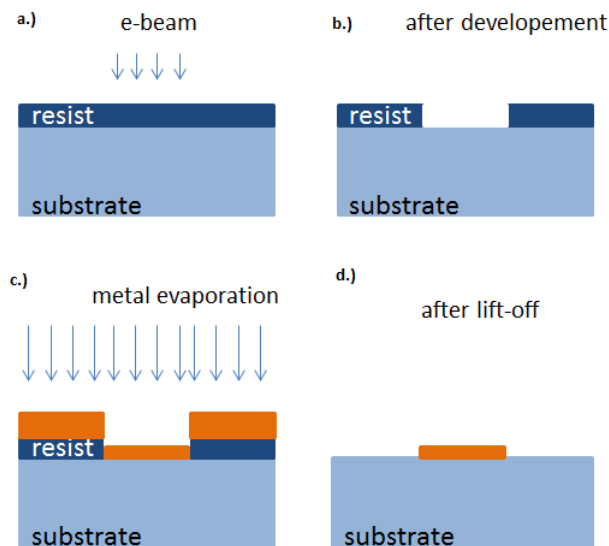
Slika 10. a.) Prikaz cijelog uzorka podijeljenog na 4 dijela u softveru. **b.)** Povećana sredina jednog od četiri veća područja, gdje vidimo da se unutarnji dio piše u jednom koraku (ima svoj tamniji sloj) a vanjski to jest veći dio se piše u drugom koraku.

2.4. E-beam litografija

Electron beam litografija je proces u kojem su elektroni ubrzavani na određena mjesta na uzorku koji je prekriven s resistom, polimer koji smo nanosili pomoću centrifuge. Koristili smo više vrsta polimera zavisna o tome koliko precizno smo trebali pisati kontakte. Nakon izlaganja uzorka elektronskoj zraci, napravi se razvijanje (30 sekundi u development tekućini (tekućini razvijачa) te nakon toga 60 sekundi u izopropanolu da bi se zaustavio proces). Ova tehnika se koristi kada su strukture na nm skali, a na tu skalu se lako dolazi za razliku od optičke litografije budući da e-beam litografija ne ovisi o difrakcijskom limitu svjetla. Jedini nedostatak ove metode jest što treba dosta vremena da se nešto napiše na uzorak. Minimalno vrijeme za ekspoziciju određenog dijela zadanom dozom dano je sljedećim izrazom:

$$D \cdot A = T \cdot I \quad (4)$$

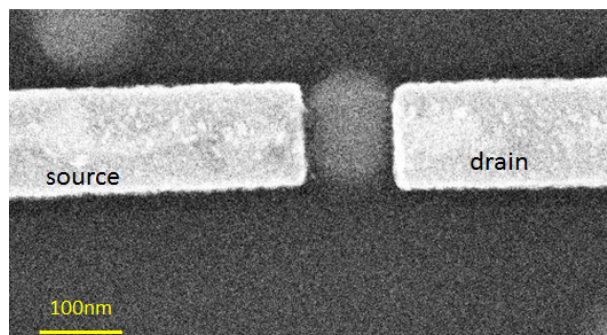
gdje je T vrijeme ekspozicije metala, I iznos struje koji izmjerimo prije prices, D zadana doza zrake i A područje koje izlažemo zraci. Na slici 11. vidimo shematski prikaz koraka u e-beam litografiji.



Slika 11. Shematski prikaz e-beam litografskog procesa. **a.)** Elektroni se emitiraju prema uzorku, koji je prekriven rezistom. **b.)** Nakon izlaganja uzorka elektronskoj zruci, dolazi development resista koji otvara rupu na području gdje je uzorak bio izložen zruci. **c.)** Depozicija metala na uzorak. **d.)** Radimo Lift-off (to jest stavljamo uzorak na 45 minuta u aceton na sobnoj temperaturi ili 10 minuta na 58 stupnjeva) pomoću kojega mičemo ostatak resista i skupa s njim i metal nataložen na njemu, to jest ostaje nam samo metalni dio na željenoj poziciji. Preuzeto iz [17].

U koraku prije depozicije metala radi se HF dip, to jest umakanje u fluorovodičnu kiselinu. Nakon rasta Ge na Si stavlja se Si *cap* od par nm (3-4) jer i Si i Ge oksidiraju na zraku što bi napravilo izolator od uzorka. Ako se stavi Si *cap* onda se samo na to ulovi kisik i stvori se mali sloj SiO_2 koji se može maknuti sa HF kiselinom i onda možemo staviti metalne kontakte na nanostrukturu.

U cijelokupnom procesu e-beam litografije izradili smo source i drain metalne kontakte a stanje uzorka vidimo na slici 12. Korišteni metali za depoziciju su bili kombinacija platine i titanija, paladija i titanija, te kroma i zlata.

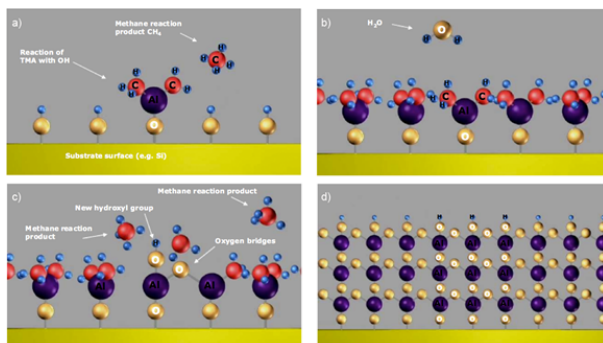


Slika 12. Detaljna SEM slika uzorka nakon prve e-beam litografije.

2.5. Atomic layer deposition ALD

Ovaj korak nam je potreban kako bismo stvorili sloj izolatora između naših source-drain i gate kontakta. “Atomic layer deposition (ALD) je tehnika koja omogućuje rast tankih filmova s atomskom preciznošću. ALD sistem služi za rast Al_2O_3 filma, koji koristi vodu i trimetil aluminij (TMA) kao prethodnik. ALD je samo-limitirajući proces te se stoga svaki ciklus depozicije ostvaruje u obliku monosloja aluminijevog oksida od maksimalne dimenzije od 1.1\AA , ovisno o temperaturi.” [18]. Prednost ove metode u odnosu na ostale tehnike jest to da omogućuje depoziciju visoko kvalitetnih dielektričnih filmova na temperaturi kompatibilnoj s e-beam litografijom. Nakon što je uzorak smješten u komoricu, Trimetil Aluminium (TMA) je pulsiran u komoru. On reagira s hidroksilnom grupom i producira metan, koji se ispumpava van. TMA ne reagira sam sa sobom, što limitira reakciju na jedan sloj. Nakon toga pulsiramo vodu u komoru i ona reagira s metilnom grupom. Suvišna vodena para ne reagira s hidroksilnom površinskom grupom. Sve to vodi ka savršenoj uniformnosti ALD-a. Na slici 13. vidimo shematski prikaz koraka potrebnih za rast aluminijskog filma pomoću ALD-a.

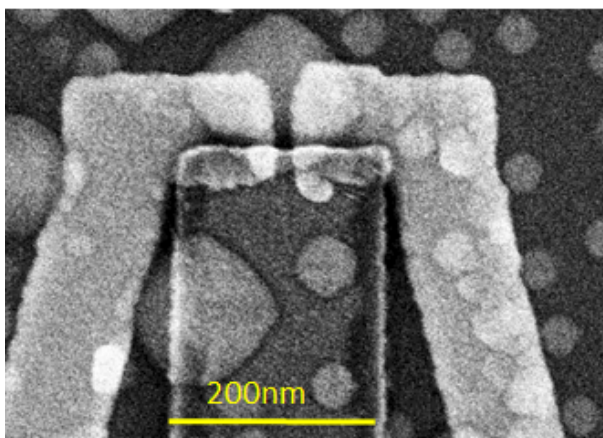
Prilikom našeg istraživanja, cijela grupa je imala izuzetnih problema s mjerenjima i nakon višemjesečne potrage zbog čega je tako, ustvrdili smo da su izvori TMA bili već istrošeni to jest kontaminirani te se zbog toga nisu dobivali funkcionalni uređaji.



Slika 13. a.) TMA reagira s apsorbiranom hidroksilnom grupom. b.) Vodena para je pulsirana u reakcijsku komoru. c.) Voda reagira s povezanim metilnim grupama. d.) Prikazana su tri sloja, svaki oko 1 angstrom po ciklusu. Preuzeto s [19].

2.6. E-beam litografija za izradu gatea

Za izradu gate kontakta potrebno je ponoviti korak 2.4. samo što ovoga puta pišemo sloj koji odgovara gate u našem dizajnu u softveru. Korišteni metali u depoziciji su ponovno iste kombinacije kao i za source i drain. Stanje uzorka vidimo na slici 14.

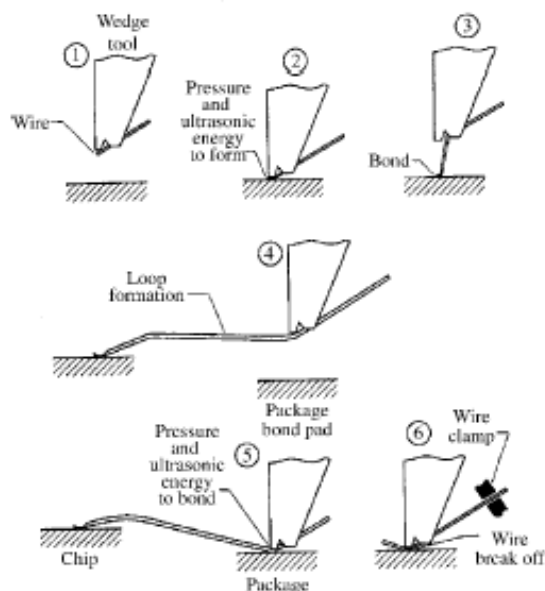


Slika 14. SEM slike konačnog stanja uzorka, vidimo source i drain kontakte koje smo prethodno izradili te na njima gate kontakt.

2.7. Wedge Bonding

Zadnji korak u procesu izrade jest montiranje uzorka na nosioc uzorka i spajanje žica na uzorak i njegov nosioc. Žice se pritisku na takozvani *bond pad* i izložene

su ultrazvučnoj frekvenciji. Materijal se lokalno istopi i slitina koja se formira drži žice na mjestu. Nakon što bondamo (spojimo) drugi dio žice, ostatak žice se povuče i raspukne se točno na pozicija klina. Shematski prikaz vidimo na slici 15.



Slika 15. Shematski prikaz procesa bondinga (spajanja). Preuzeto s [20]

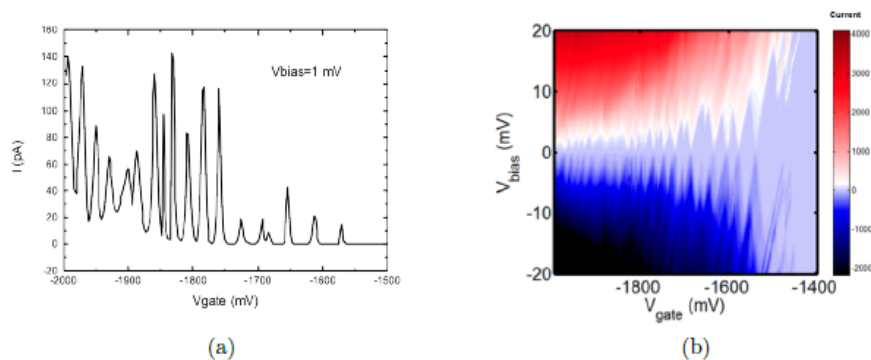
3. Rezultati

Moj zadatak u timu bio je uglavnom izrada ovakvih uređaja, to jest kvantnih tranzistora, nakon čega sam pratio mjerenja koji su obavljali kolege. Tijekom većeg dijela rada u timu dobivali smo neočekivane rezultate te sam većinu vremena potrošio na ponovnu izradu testnih uzoraka. Izrađivao sam ovakve uređaje ali s različitim parametrima kao što su različiti polimeri za resist, različite debljine i vrste metala za kontakte, različite debljine sloja izolatora... Na kraju smo došli do zaključka da je korišten izvor TMA u metodi ALD-a istrošen te smo ga na kraju promjenili, nakon čega smo počeli dobivati očekivane rezultate.

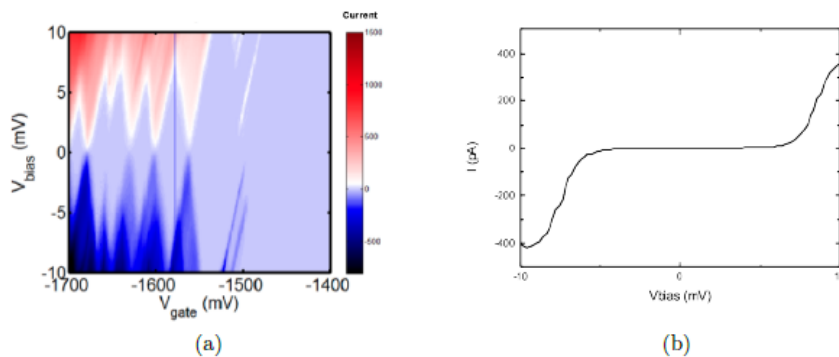
Općenito postupak mjerenja se odvija na 4K te je potrebno ohladiti uzorke na tu temperaturu jer na njoj imaju nisku termalnu energiju. nakon čega su radena električna mjerenja koristeći elektroniku s malo šuma. Optička izolacija se koristi kako bi se izbjegao utjecaj vanjskih mjernih uređaja. Svi spojevi na uzorku su analogni, pogonjeni na bateriju i mogu se uzemljiti odvojeno od uzemljenja napajajuće mreže. [20]

Tijekom zadnjih par dana, naši tranzistori su proradili i kolege su dobili očekivane ovisnosti u mjerenjima. Tipične rezultate transportnih mjerenja uređaja

(tranzistora) koje smo dobili u timu vidimo na slici 16. Gdje primjećujemo dobro odvojene Coulombove vrhove u mjerenjima struje I kao funkcije od napona na gateu V_{gate} . Dodatna informacija se saznaje nakon što pogledamo ovisnost I o (V_{gate}, V_{bias}) . Režim Coulombove blokade događa se u unutar regija s karakterističnim dijamantnim oblikom. Veličina dijamanta raste s lijeva na desno, što odgovara energijama napajanja (charging energies) od par meV-a do 20meV-a. Ta energija je promjenjiva jer napon gatea utječe na kapacitivno vezanje kvantne točke na source i drain.

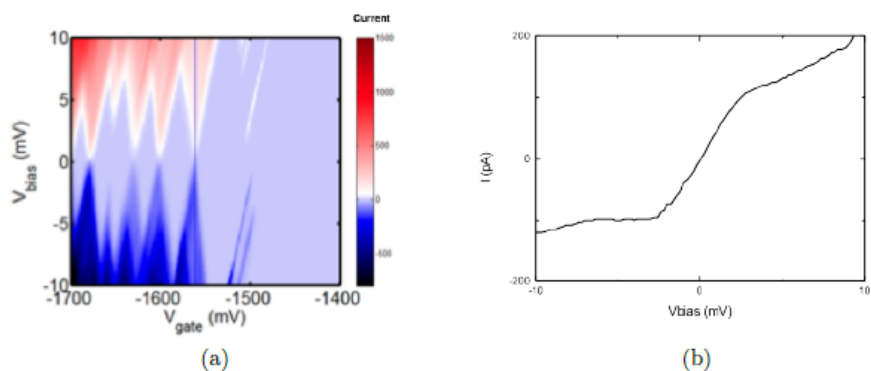


Slika 16. a.) Reprezentativne oscilacije Coulombove barijere u grafu ovisnosti I naspram V_{gate} na $5K$ i $V_{bias} = 1mV$. b.) Graf od I kao funkcija V_{gate} i V_{bias} .

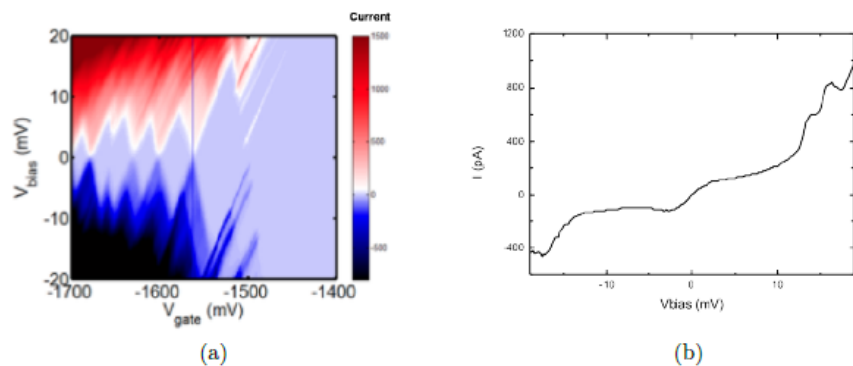


Slika 17. Rezultati transportnih mjerenja. a.) Ovisnost I kao funkcija V_{gate} i V_{bias} . Plava linija označava mjesto gdje je linijski scan uzet. b.) Ovisnost I o V_{bias} kroz Coulombov dijamant na mjestu plave linije.

Ako zumiramo u desni dio, vidimo više detalja, slika 17. Linijski scan kroz Coulombov dijamant pokazuje Coulombovu blokadu unutar njega, slika 17b. U točki degeneracija naboja Coulombova blokada je podignuta i struja teče, slike 18a i 18b.



Slika 18. a.) Ovisnost I kao funkcija V_{gate} i V_{bias} . Plava linija označava mjesto gdje je linijski scan uzet. b.) Ovisnost I o V_{bias} kroz Coulombov dijamant na mjestu plave linije, koja je ovoga puta na mjestu degeneracija naboja to jest gdje je Coulombova blokada podignuta.



Slika 19. a.) Ovisnost I kao funkcija V_{gate} i V_{bias} . Plava linija označava mjesto gdje je linijski scan uzet. Linije paralelne sa rubovima dijamanta su posljedica single hole tuneliranja putem visoko energetske orbitalne nivoe. b.) Ovisnost I o V_{bias} na mjestu degeneracije naboja. Dodatna stepenica u struji nastaje zbog single hole tuneliranja.

Dok na slici 19 vidimo dodatne stepenice u struji, koje izgledaju kao linije paralelne s rubovima dijamanta. Te stepenice vjerojatno dolaze od single hole tuneliranja putem orbitalnih nivoe visoke energije. Dokaz za ovu tvrdnju bilo bi cijepanje orbitalnih nivoe nakon što primijenimo magnetsko polje.

4. Zaključak

U ovome istraživanju reproducirali smo recept za izradu single hole tranzistora i prikazali smo kako izgledaju transportna mjerenja tih uređaja. Veći dio rada

imali smo problema s uzorcima (tranzistorima) i mjerenja nam nisu pokazivala očekivane rezultate. Nizom testnih uzoraka smo u konačnici locirali problem u lošem izvoru TMA u metodi ALD-a, nakon čega smo počeli dobivati očekivane rezultate.

Iako svijet danas sanja kvantna računala, realnost je ta da se još uvijek susrećemo s raznim fizikalnim problemima te je potrebno daljnje istraživanje, uglavnom u smjeru relaksacijskih vremena.

Literatura

- [1] D. Loss and D. P. DiVincenzo, "Quantum computation with quantum dots," *Phys. Rev. A* vol. 57, pp. 120 – 126, January 1998.
- [2] S. Nadj-Perge, S. M. Frolov, E. P. A. M. Bakkers & L. P. Kouwenhoven, "Spin-orbit qubit in a semiconductor nanowire," *Nature* vol. 468, no. 1084–1087, December 2010.
- [3] F. A. Zwanenburg, A. S. Dzurak, A. Morello, M. Y. Simmons, L. C. L. Hollenberg, G. Klimeck, S. Rogge, S. N. Coppersmith, and M. A. Eriksson, "Silicon quantum electronics" 2013
- [4] U. Dotsch, U. Gennser, C. David, G. Dehlinger, D. Grtzmacher, T. Heinzel, S. Luscher i K. Ensslin, "Single-hole transistor in p-Si/SiGe quantum well," *Appl. Phys. Lett.*, vol 78, no 341-343, 2001
- [5] T. Berer, D. Pachinger, G. Pillwein, M. Muhlberger, H. Lichtenberger, G. Brunthaler, "Lateral quantum dots in Si/SiGe realized by a Schottky split-gate technique." *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 162112, 2006.
- [6] Nakul Shaji, C. B. Simmons, Madhu Thalakulam, Levente J. Klein, Hua Qin, H. Luo, D. E. Savage, M. G. Lagally, A. J. Rimberg, R. Joynt, M. Friesen, R. H. Blick, S. N. Coppersmith & M. A. Eriksson, "Spin blockade and lifetime-enhanced transport in a few-electron Si/SiGe double quantum dot," *Nature Physics* vol. 4, no 540 - 544, 2008
- [7] Robert R. Hayes, Andrey A. Kiselev, Matthew G. Borselli, Steven S. Bui, Edward T. Croke III, Peter W. Deelman, Brett M. Maune, Ivan Milosavljevic, Jeong-Sun Moon, Richard S. Ross, Adele E. Schmitz, Mark F. Gyure, Andrew T. Hunter, "Lifetime measurements (T1) of electron spins in Si/SiGe quantum dots".
- [8] C. B. Simmons, J. R. Prance, B. J. Van Bael, Teck Seng Koh, Zhan Shi, D. E. Savage, M. G. Lagally, R. Joynt, Mark Friesen, S. N. Coppersmith, and M. A. Eriksson, "Tunable Spin Loading and T1 of a Silicon Spin Qubit Measured by Single-Shot Readout", *Phys. Rev. Lett.* 106, 156804, April 2011.
- [9] J. R. Prance, Zhan Shi, C. B. Simmons, D. E. Savage, M. G. Lagally, L. R. Schreiber, L. M. K. Vandersypen, Mark Friesen, Robert Joynt, S. N. Coppersmith, and M. A. Eriksson, "Single-Shot Measurement of Triplet-Singlet Relaxation in a Si/SiGe Double Quantum Dot", *Phys. Rev. Lett.* 108, 046808, January 2012.

- [10] Y. Shin, R. Brunner, A. Shibatomi, T. Obata, T. Otsuka, J. Yoneda, Y. Shiraki, K. Sawano, Y. Tokura, Y. Harada, K. Ishibashi, S. Tarucha, "Aluminum oxide for an effective gate in Si/SiGe two-dimensional electron gas systems", *Semiconductor Science and Technology*, Mar 2011.
- [11] A. Wild, J. Sailer, J. Nützel, G. Abstreiter, S. Ludwig, D. Bougeard "Electrostatically defined quantum dots in a Si/SiGe heterostructure", *New J. Phys.* 12, 113019, 2010.
- [12] D. Heiss, S. Schaeck, H. Huebl, M. Bichler, G. Abstreiter, J. J. Finley, D. V. Bulaev, and Daniel Loss, "Observation of extremely slow hole spin relaxation in self-assembled quantum dots", *Phys. Rev. B* 76, 241306(R), December 2007.
- [13] Lu W, Xiang J, Timko BP, Wu Y, Lieber CM., "One-dimensional hole gas in germanium/silicon nanowire heterostructures", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. no. 10046-51.,2005.
- [14] Hu Y, Churchill H., Reilly D., Xiang J., Lieber C., Marcus C., "A Ge/Si heterostructure nanowire-based double quantum dot with integrated charge sensor", *Nat Nanotechnol.* 2007.
- [15] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha, L. M. K. Vandersypen, "Spins in few-electron quantum dots", *Rev. Mod. Phys.*, vol. 79, pp. 1217-1265, Oct 2007.
- [16] Koichi Yamaguchi, Kunihiro Yujobo and Toshiyuki Kaizu, "Stranski-Krastanov Growth of InAs Quantum Dots with Narrow Size Distribution", *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume 39, Part 2, Number 12A, 2000.
- [17] P.D. Jarillo-Herrero, "Quantum transport in carbon nanotubes," Master's thesis, TU DELFT, 2005.
- [18] "<http://www.princeton.edu/mnfl/the-tool-list/cambridge-nanotech/cambridge-ald.pdf>
- [19] "<http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/the-savannah-ald-system.html>
- [20] F.H.L. Koppends, "Coherence and control of a single electron spin in a quantum dot. PhD thesis, Delft University of Technology, 10, 2007