

K1 2022	2
Predrok 2022	3
Jun 2022	4
K1 2019	5
Jun 2020	6
Avg 2021	7
Jul 2019	8
Jul 2020	9
K1 2021	10
Feb 2022	11
Jul 2021	12
Jun 2021	13
Avg 2021	14
Jul 2022	15
Avg 2019	16

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(I kolokvijum)

14.04.2022. god.

Uputstvo: Kolokvijum traje 150 minuta. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (15p.) (a) [7p.] Skicirati šemu jonskog implantera i detaljno objasniti princip funkcionisanja.
(b) [2p.] Brzo termalno odgrevanje.
(c) [6p.] Kanalisanje jona.
2. (20p.) U polubeskonačni besprimesni uzorak izvršena je difuzija primesa sa konstantnom koncentracijom primesa na površini N_0 . Odrediti raspodelu primesa $N(x, t)$ u trenutku t od početka difuzije. Poznat je koeficijent difuzije D .

Napomena: $\mathcal{L}\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{k}{2\sqrt{t}}\right)\right] = \frac{1}{s}e^{-k\sqrt{s}}$

3. (15p.) Za MOS tranzistor:
(a) [2p.] navesti najvažnije efekte koji su posledica smanjenja dimenzija tranzistora;
(b) [7p.] detaljno objasniti efekat smanjenja dužine kanala (L) na napon praga;
(c) [6p.] detaljno objasniti efekat smanjenja širine kanala (W) na napon praga.

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(jun - predrok)

02.06.2022.god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 menjaju drugi kolokvijum. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (15p.) (a) [4p.] Objasniti tehnološki proces difuzije primesa. (b) [3p.] Napisati I i II Fickov zakon i objasniti sve veličine koje u njemu figurišu. (c) [6p.] Navesti uslove pod kojima se odvijaju i oblike zavisnosti koncentracije primesa od rastojanja od površine uzorka (u 1D aproksimaciji) za dva tipična načina odvijanja procesa difuzije primesa u mikroelektronici. (d) [2p.] Objasniti kako utiče naelektrisanje primesa na proces difuzije.

2. (15p.) (a) [7p.] Navesti i detaljno objasniti izraz za napon praga MOS tranzistora sa gejtom od polikristalnog silicijuma (skicirati relevantne dijagrame). (b) [8p.] Detaljno objasniti DIBL efekat.

3. (20p.) Raspodela koncentracije implantiranih primesa fosfora u silicijumskom polubeskonačnom uzorku može se opisati spojenim polugausijanima:

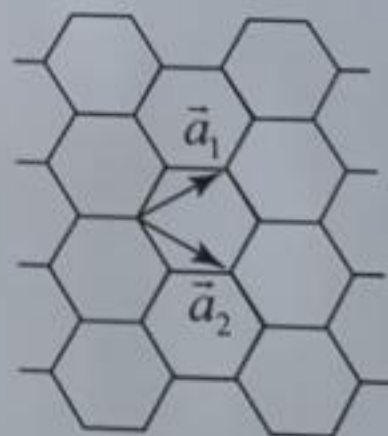
$$N(x) = \begin{cases} N_0 \exp\left[-\frac{(x-R_m)^2}{2\Delta R_{p1}^2}\right], & x < R_m \\ N_0 \exp\left[-\frac{(x-R_m)^2}{2\Delta R_{p2}^2}\right], & x > R_m \end{cases}$$

Izračunati maksimalnu koncentraciju i projektovani domet, ako je poznato: $R_m = 65 \text{ nm}$, $\Delta R_{p1} = 23,29 \text{ nm}$, $\Delta R_{p2} = 32,39 \text{ nm}$ i ukupna doza implantiranih primesa $Q = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

4. (15p.) (a) Objasniti modulaciono dopiranje. (b) HEMT: struktura, energetski dijagram, princip rada, strujno-naponska karakteristika i osobine HEMT-a.

5. (15p.) Rezonantna tunelska dioda (RTD): (a) skicirati izgled strukture i strujno-naponsku karakteristiku; (b) objasniti princip rada skicirajući relevantne energetske dijagrame.

6. (20p.) Odrediti broj atoma ugljenika po jediničnoj ćeliji ugljenične nanotube čije je uvijanje opisano vektorom $\vec{C}_s = 5\vec{a}_1 - 5\vec{a}_2$, gde je dužina C-C veze u grafenu $a_{CC} = 0,142 \text{ nm}$. U ravni sloja grafena-(x,y) ravni, bazisni vektori su definisani sa: $\vec{a}_1 = a \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{e}_x + a \frac{1}{2} \vec{e}_y$, $\vec{a}_2 = a \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{e}_x - a \frac{1}{2} \vec{e}_y$, (videti sliku).



Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 menjaju drugi kolokvijum. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (15p.) (a) [4p.] Skicirati i objasniti osnovne termine/pojmove vezane za strukture koje se koriste za metalizaciju. (b) [6p.] Detaljno objasniti dva glavna nedostatka aluminijuma kao materijala za metalizaciju (dati i objašnjenje kako se opisani neželjeni efekti umanjuju). (c) [2,5p.] Silicidi (objasniti ulogu, način formiranja i navesti koji se najčešće koriste). (d) [2,5p.] Spaterovanje.

2. (15p.) (a) [8p.] Objasniti proces samoporavnjanja na primeru izrade n -MOSFET tranzistora (dati poređenje sa neporavnanom strukturom). (b) [7p.] Detaljno objasniti efekat vrućih nosilaca i kako se on može umanjiti. Objasniti uticaj „HALO“ implanta na razmatrani efekat.

3. (20p.) Funkcija raspodele implantiranih primesa je zadata diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{df}{ds} = \frac{s-a}{b_0 + b_2 s^2} f(s).$$

Asimetrija i spljoštenost imaju vrednosti $\gamma = 0$ i $\beta = 3$, respektivno. Odrediti oblik raspodele.

4. (20p.) (a) Klasifikovati poluprovodničke nanostrukture prema dispoziciji provodne i valentne zone u materijalima koji čine nanostrukturu.

(b) Izvesti izraz za gustinu stanja u poluprovodničkoj kvantnoj jami i skicirati ovu zavisnost.

(c) Izvesti izraz za površinsku koncentraciju elektrona (broj elektrona po jedinici površine) u poluprovodničkoj kvantnoj jami.

5. (10p.) HBT: struktura, energetski dijagram, princip rada i karakteristike.

6. (20p.) Visina barijere ϕ_B metal/ n -GaAs jednog MESFET-a, ima vrednost 0,8 V. Debljina aktivnog n -GaAs sloja je $a = 0,2 \mu\text{m}$, a koncentracija primesa u ovom sloju je $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna gustina stanja u provodnoj zoni GaAs je $N_C = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, a relativna permitivnost GaAs je $\epsilon_s = 13,1$. Izračunati vrednosti ugrađenog potencijala V_{bi} , napona praga V_T , napona dodira V_P i odrediti tip MESFET-a.

Napomena: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $V_T = 25,9 \text{ mV}$

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA (I kolokvijum)

21.04.2019.god.

Uputstvo: Kolokvijum traje 150 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu radena. Primer: Nije radeno pitanje 2. (b) i 3. (c)

1.	2. (a)	2. (b)	2. (c)	3. (a)	3. (b)	3. (c)	3. (d)
		X			X	XX	

1. Raspodela koncentracije implantiranih primesa fosfora u silicijumskom polubeskonačnom uzorku može se opisati spojenim polugaussianima:

$$N(x) = \begin{cases} N_0 \exp\left[-\frac{(x-R_m)^2}{2\Delta R_{p1}^2}\right], & x < R_m \\ N_0 \exp\left[-\frac{(x-R_m)^2}{2\Delta R_{p2}^2}\right], & x > R_m \end{cases}$$

Izračunati maksimalnu koncentraciju (5p.), projektovani domet (7p.) i projektovano rasipanje (8p.), ako je poznato: $R_m = 65 \text{ nm}$, $\Delta R_{p1} = 23,29 \text{ nm}$, $\Delta R_{p2} = 32,39 \text{ nm}$ i ukupna doza implantiranih primesa $Q = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

2. (4p.) (a) Skicirati i definisati osnovne termine vezane za višeslojnu metalizaciju.
(6p.) (b) Navesti i detaljno objasniti dva glavna nedostatka aluminijuma kao materijala za metalizaciju (dati suštinsko objašnjenje efekta i kako se on može sprečiti/umanjiti).
(6p.) (c) Skicirati procesne korake i detaljno objasniti dualni damaskni proces (eksplicitno navesti materijale koji se koriste za izradu pojedinih slojeva, navesti način formiranja slojeva i njihovu funkciju).

3. NMOS tranzistor realizovan je na podlozi od silicijuma dopiranog akceptorskim primesama koncentracije N_A . Debljina oksida gejtja je x_{ox} , poluprečnik n^+ ostrva za sors i drejn u oblasti kontakta sa kanalom je r_j , a površinska koncentracija elementarnih naelektrisanja na međupovršni oksid-silicijum je Q_{ss} . Poznate su relativne dielektrične konstante ϵ_0 , ϵ_{ox} i ϵ_s , elementarno naelektrisanje q , sopstvena koncentracija u silicijumu n_i , Boltzmannova konstanta k_B , temperatura T_{sob} i napon V_{SB} .

(7p.) (a) Detaljno objasniti efekat uskog kanala na napon praga V_T . Dati izraz za razliku napona praga ΔV_T u odnosu na vrednost dobijenu po modelu dugokanalnog tranzistora.

(5p.) (b) Detaljno objasniti efekat širine kanala na napon praga V_T . Dati izraz za razliku napona praga ΔV_T u odnosu na vrednost dobijenu po modelu širokokanalnog tranzistora.

(2p.) (c) Koliki treba da bude odnos fizičke širine i dužine kanala (W/L) tako da napon praga prema modelu podeljenog naelektrisanja bude isti kao vrednost V_T izračunat po modelu tranzistora "velikih dimenzija"? U cilju numeričke procene vrednosti usvojiti da je $x_d = 1,5 r_j$.

(2p.) (d) Objasniti uticaj „HALO“ implanta na efekat kratkog kanala kod MOS tranzistora malih dimenzija.

Napomena: Pri izvođenjima smatrati da je $V_{DS}=0$. Uzeti da je širina oblasti osiromašenja x_d približno ista na sorsovom i drejnovom kraju. Nije neophodno računati x_d (mada su svi podaci dati).

$$N_0 = 1,4329 \cdot 10^{22}$$

$$12p + 5p + 2p = 19p$$

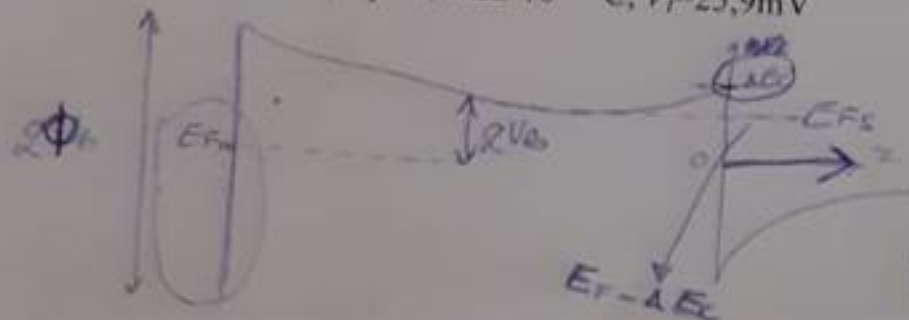
13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(junski ispitni rok)

24.06.2020. god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 su drugi (ispitni) deo. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (16p.) (a) [3p.] Kako se mogu formirati oksidni slojevi u silicijumskoj mikroelektronici? Navesti i ukratko objasniti svojstva ovih oksidnih slojeva.
(b) [4,5p.] Navesti bar tri primera upotrebe SiO_2 u mikroelektronici. Navedenu primenu skicirati i navesti tehniku kojom se oksid formira ili tip formiranog oksida.
(c) [3p.] Navesti i ukratko objasniti dva glavna metoda(tipa) termičke oksidacije.
(d) [4,5p.] Skicirati zavisnost debljine naraslog termičkog oksida od vremena oksidacije i objasniti dva granična režima (početna i poodmakla faza oksidacije). Da li sam proces termičke oksidacije ima uticaja na masku koja se koristi u procesu? Ukoliko ima, objasniti šta se dešava sa maskom.
(e) [1p.] Navesti bar dve dobre karakteristike termičkog oksida.
2. (14p.) (a) [8p.] Objasniti proces samoporavnjanja na primeru izrade n -MOSFET tranzistora (dati poređenje sa neporavnanom strukturom).
(b) [3p.] Ukratko objasniti tehniku izolacije MOS tranzistora ukopanim oksidom.
(c) [3p.] Navesti sve relevantne efekte koji su posledica smanjenja dimenzija MOS tranzistora.
3. (20p.) Na površinu besprimesnog polubeskonačnog poluprovodnika deponovan je tanak sloj primesa, a zatim je ceo sistem izolovan od izvora donorskih primesa. Odrediti raspodelu primesa u trenutku t od početka difuzije na konstantnoj temperaturi, ako je broj primesa po jedinici površine u tankom sloju Q , a koeficijent difuzije primesa na datoj procesnoj temperaturi je D .
4. (15p.) (a) Objasniti modulaciono dopiranje. (b) HEMT: struktura, energetski dijagram, princip rada i karakteristike.
5. (15p.) Rezonantna tunelska dioda (RTD): (a) skicirati izgled strukture i strujno-naponsku karakteristiku; (b) objasniti princip rada.
6. (20p.) Visina barijere ϕ_B metal/ n -GaAs jednog MESFET-a, ima vrednost 0,8 V. Debljina aktivnog n -GaAs sloja je $a = 0,2 \mu\text{m}$, a koncentracija primesa u ovom sloju je $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna gustina stanja u provodnoj zoni GaAs je $N_C = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, a relativna permitivnost GaAs je $\epsilon_s = 13,1$. Izračunati vrednosti ugrađenog potencijala V_{bi} , napona praga V_T , napona dodira V_P i odrediti tip MESFET-a.

Napomena: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $V_T = 25,9 \text{ mV}$



$$V_T = \phi_{ms} - \phi_{si} - \frac{qQ_{ss}}{C_{ox}} - \frac{1Q_{bi}}{C_{ox}}$$

$$|\phi'_{ms}| = -0,6 \text{ V} - |\phi_{si}|$$

$$\phi_{si} = V_T \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$|\phi_{si}| = V_T \ln \frac{N_D n_i}{n_i^2}$$

$$2V_{bi} = E_{fs} - \phi_B - \Delta E_c + \phi(z)$$

$$E_{fs} = \phi_B + \Delta E_c - \phi(z)$$

$$\phi(z) = -Fz$$

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(avgustovski ispitni rok)

01.09.2021. god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 menjaju drugi kolokvijum. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

- (17p.) (a) [6p.] Dati definiciju i osnovne karakteristike tehnike nagrizanja i ukratko objasniti sam mehanizam procesa nagrizanja.
(b) [5p.] Reaktivno jonsko nagrizanje (skicirati aparaturu i objasniti tehniku).
(c) [6p.] Navesti faktore koji utiču na poliranje u procesu hemijsko-mehaničke planarizacije i ukratko objasniti probleme koji mogu nastati pri poliranju.
- (13p.) (a) [8p.] Objasniti proces samoporavnja na primeru izrade n -MOSFET tranzistora (dati poređenje sa neporavnanom strukturom).
(b) [5p.] Objasniti ulogu lako dopiranog drena kod MOSFET tranzistora (skicirati i dati kratko objašnjenje strukture).
- (20p.) Funkcija raspodele implantiranih primesa je zadata diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{df}{ds} = \frac{s-a}{b_0 + b_2 s^2} f(s)$$

Asimetrija i spljoštenost imaju vrednosti $\gamma = 0$ i $\beta = 3$, respektivno. Odrediti oblik raspodele.

- (15p.) (a) Objasniti modulaciono dopiranje. (b) HEMT struktura, energetski dijagram, princip rada i karakteristike.
- (15p.) Rezonantna tunelska dioda (RTD): (a) skicirati izgled strukture i strujno-naponsku karakteristiku; (b) objasniti princip rada skicirajući relevantne energetske dijagrame.
- (20p.) Koristeći jednačine kinetičke teorije gasova za opis MBE, izračunati vreme za koje površina kristala ostaje čista od pozadinskog gasa. Narasta se (001) površina GaAs ($a = 0.5653$ nm), a pozadinski gas je vodonik ($m = 3.347 \cdot 10^{-27}$ kg, masa molekula H_2). Pretpostaviti da je adhezioni koeficijent $\xi = 1$, a pritisak pozadinskog gasa je $5 \cdot 10^{-11}$ mbar na $T = 300$ K. Bolcmanova konstanta je $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K.

Ukupno 2.9 17.50 y 100

Nikola Tasic

Active 25 minutes ago

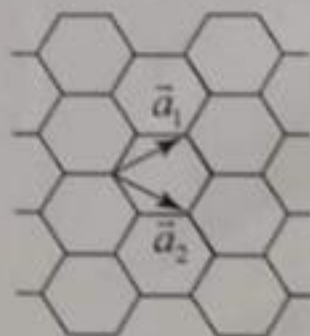
13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(jul)

04.07.2019.god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi ispit ili kolokvijum. Ispit traje 180 min, a II kolokvijum 120 min i rade se samo zadaci 4-6. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

- (12p.) (a) Skicirati šemu jonskog implantera i objasniti princip funkcionisanja. (b) Brzo termalno odgrevanje. (c) Kanalisanje jona.
- (18p.) Za MOS tranzistor: (a) definisati i objasniti potražni nagib, (b) objasniti DIBL efekat, (c) ukratko objasniti uticaj "HALO" implantacije na efekte: kratkog kanala, DIBL, modulacije dužine kanala i vrućih nosilaca.
- (20p.) U beskonačnom uzorku izvršena je difuzija sa početnom raspodelom primesa oblika $N(x,0) = N_0 \Theta(-x)$, gde $\Theta(-x)$ označava jediničnu step (Hevisajdovu) funkciju. Izvesti izraz za raspodelu primesa $N(x,t)$ u trenutku t od početka difuzije, ako je poznat koeficijent difuzije D .
- (15p.) (a) Navesti dobre i loše osobine GaAs za primenu u mikroelektronici. (b) Skicirati i objasniti zavisnost brzine nosilaca v u GaAs od električnog polja E . Uporediti ovu zavisnost sa dijagramom $v(E)$ za Si i objasniti uočene razlike na dijagramima za GaAs i Si.
- (15p.) (a) Objasniti modulaciono dopiranje. (b) HEMT: struktura, energetski dijagram, princip rada i karakteristike.

6. (20p.) Odrediti broj atoma ugljenika po jediničnoj ćeliji ugljenične nanotube čije je uvijanje opisano vektorom $\vec{C}_n = 5\vec{a}_1 - 5\vec{a}_2$, gde je dužina C-C veze u grafenu $a_{CC} = 1,42 \text{ \AA}$. U ravni sloja grafena-(x,y) ravni, bazisni vektori su definisani sa:
 $\vec{a}_1 = a \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{e}_x + a \frac{1}{2} \vec{e}_y$, $\vec{a}_2 = a \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{e}_x - a \frac{1}{2} \vec{e}_y$ (videti sliku).



Napomena: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $\epsilon_{\text{Si}} = 3,9$, $\epsilon_0(\text{Si}) = 11,8$, $q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $E_g(\text{Si}, 300\text{K}) = 1,12 \text{ eV}$, $V_T = 25,9 \text{ mV}$, $k_B = 8,617385 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$, $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $T_{\text{amb}} = 300 \text{ K}$, $n_i(\text{Si}, 300\text{K}) = 1,0 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(julski ispitni rok)

15.07.2020.god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 su drugi (ispitni) deo. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (15p.) (a) [3p.] Objasniti pojam kontakta, vie, barijere, umetka i međuveze u procesu metalizacije. Svaki od navedenih pojmova skicirati.
(b) [9p.] Aluminijum kao materijal za metalizaciju. Napomena: U sklopu odgovora potrebno je navesti dobre karakteristike, navesti i objasniti glavne nedostatke kao i metode za njihovu kompenzaciju, a zatim opisati osnovnu tehniku za depoziciju aluminijuma u mikroelektronici.
(c) [3p.] Šta su silicidi i koja je njihova uloga u mikroelektronici. Dati primer dva silicida i ukratko opisati tehniku formiranja.
2. (15p.) (a) [8p.] Navesti i detaljno objasniti izraz za napon praga MOS tranzistora sa gejtom od polikristalnog silicijuma.
(b) [2p.] Objasniti efekat implantacije akceptorskih primesa pod oksid gejta na napon praga MOS tranzistora.
(c) [5p.] Objasniti efekat modulacije kanala MOS tranzistora.

3. (20p.) Raspodela koncentracije implantiranih primesa fosfora u silicijumskom polubeskonačnom uzorku može se opisati spojenim polugausijanima:

$$N(x) = \begin{cases} N_0 \exp\left[-\frac{(x-R_m)^2}{2\Delta R_{p1}^2}\right], & x < R_m \\ N_0 \exp\left[-\frac{(x-R_m)^2}{2\Delta R_{p2}^2}\right], & x > R_m \end{cases}$$

Izračunati maksimalnu koncentraciju i projektovani domet, ako je poznato: $R_m = 65$ nm, $\Delta R_{p1} = 23,29$ nm, $\Delta R_{p2} = 32,39$ nm i ukupna doza implantiranih primesa $Q = 10^{15}$ cm⁻².

4. (15p.) MBE: (a) skicirati opremu i ukratko objasniti ovaj planarni proces sa čvrstim izvorima za rast slojeva III-V jedinjenja; (b) navesti vrste MBE sa gasnim izvorima i po čemu se one razlikuju; (c) navesti bar 3 dobre osobine MBE sa gasnim izvorima.

5. (15p.) Rezonantna tunelska dioda (RTD): (a) skicirati izgled strukture i strujno-naponsku karakteristiku; (b) objasniti princip rada.

6. (20p.) Debljine dopiranog i razdvojnog sloja HEMT-a su d i s , respektivno. Koncentracija donora u sloju AlGaAs debljine d je N_D , a razlika energije dna provodne zone na kontaktu metal – poluprovodnik i Fermijevog nivoa u metalu je qV_b . Energija dna prve i jedino popunjene podzone u GaAs je E_1 , a površinska koncentracija elektrona u 2DEG je n_{2D} . Usvojiti da je relativna permitivnost GaAs i AlGaAs ista i jednaka ϵ_s , efektivna masa elektrona u provodnoj zoni GaAs je m , a ofset provodne zone je ΔE_c . Temperatura je 0 K. Izvesti izraz za napon gejta – GaAs, V_{GB} . Polazeći od ovog izraza izvesti i izraz za napon praga HEMT-a V_T . Skicirati profil dna provodne zone, koordinatni početak postaviti na međupovrš AlGaAs/GaAs i računati energiju od dna provodne zone u GaAs na mestu $z = 0$.

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(I kolokvijum)

18.04.2021. god.

Uputstvo: Kolokvijum traje 150 minuta (dodatno vreme od 30 minuta je samo u prvom/kolokvijumskom roku). Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

Primer popunjavanja tabele u slučaju kada nije rađeno pitanje 1. (c) i 3. (b):

1. (a)	1. (b)	1. (c)	1. (d)	2.	3. (a)	3. (b)	3. (c)	3. (d)
		X				X		

- (15p.) (a) [4p.] Skicirati i objasniti osnovne termine/pojmove vezane za strukture koje se koriste za metalizaciju. (b) [6p.] Detaljno objasniti dva glavna nedostatka aluminijuma kao materijala za metalizaciju (dati i objašnjenje kako se opisani neželjeni efekti umanjuju). (c) [2,5p.] Silicidi (objasniti ulogu, način formiranja i navesti koji se najčešće koriste). (d) [2,5p.] Spaterovanje.
- (20p.) Raspodela koncentracije implantiranih primesa fosfora u silicijumskom polubeskonačnom uzorku može se opisati spojenim polugausijanima:

$$N(x) = \begin{cases} N_0 \exp \left[-\frac{(x - R_m)^2}{2\Delta R_{p1}^2} \right] & x < R_m \\ N_0 \exp \left[-\frac{(x - R_m)^2}{2\Delta R_{p2}^2} \right] & x > R_m \end{cases}$$

Izračunati maksimalnu koncentraciju i projektovani domet, ako je poznato: $R_m = 65 \text{ nm}$, $\Delta R_{p1} = 23,29 \text{ nm}$, $\Delta R_{p2} = 32,39 \text{ nm}$ i ukupna doza implantiranih primesa $Q = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

- (15p.) Za MOS tranzistor:
 - [2p.] navesti najvažnije efekte koji su posledica smanjenja dimenzija tranzistora;
 - [5p.] detaljno objasniti efekat smanjenja dužine kanala (L) na napon praga;
 - [3p.] detaljno objasniti uticaj HALO implantna na napon praga pri smanjenju dužine kanala;
 - [5p.] detaljno objasniti efekat smanjenja širine kanala (W) na napon praga.

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(februar)

25.01.2020.god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi ispit ili kolokvijum. Ispit traje 180 min, a II kolokvijum 120 min i rade se samo zadaci 4-6. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

- (15p.) (a) Napisati I i II Fickov zakon. (b) Od čega sve zavisi koeficijent difuzije primesa? (Ukoliko postoje analitičke empirijske ili teorijske relacije navesti ih uz objašnjenje promenljivih i konstanti koje u njima figurišu). (c) Navesti uslove pod kojima se odvijaju i oblike zavisnosti koncentracije primesa od rastojanja od površine uzorka za dva tipična načina odvijanja procesa difuzije primesa u mikroelektronici.
- (15p.) (a) Navesti i detaljno objasniti prednosti i nedostatke aluminijuma kao materijala za metalizaciju. (b) Skicirati procesne korake i detaljno objasniti dualni damaskni proces (eksplicitno navesti materijale koji se koriste za izradu pojedinih slojeva, navesti način formiranja slojeva i njihovu funkciju).
- (20p.) MOS tranzistor ima sledeće parametre: $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $x_{ox} = 30 \text{ nm}$, dubina difuzije za sors i drejn $r_j = 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, $V_{FB} = -1 \text{ V}$, $L = 1 \text{ } \mu\text{m}$. Izračunati napon praga V_T prema modelu podeljenog naelektrisanja. Uzeti u obzir empirijski član $6V_T$. Pretpostaviti da se sors i drejn nalaze na istom potencijalu.
- (10p.) MBE: (a) skicirati opremu i ukratko objasniti ovaj planarni proces sa čvrstim izvorima za rast slojeva III-V jedinjenja; (b) navesti vrste MBE sa gasnim izvorima i po čemu se one razlikuju; (c) navesti bar 3 dobre osobine MBE sa gasnim izvorima.
- (20p.) (a) Klasifikovati poluprovodničke nanostrukture prema dispoziciji provodne i valentne zone u materijalima koji čine nanostrukturu.
(b) Izvesti izraz za gustinu stanja u poluprovodničkoj kvantnoj jami i skicirati ovu zavisnost.
(c) Izvesti izraz za površinsku koncentraciju elektrona (broj elektrona po jedinici površine) u poluprovodničkoj kvantnoj jami.
- (20p.) Debljine dopiranog i razdvojnog sloja HEMT-a su d i s , respektivno. Koncentracija donora u sloju AlGaAs debljine d je N_D , a razlika energije dna provodne zone na kontaktu metal – poluprovodnik i Fermijevo nivoa u metalu je qV_b . Energija dna prve i jedino popunjene podzone u GaAs je E_1 , a površinska koncentracija elektrona u 2DEG je n_{2D} . Usvojiti da je relativna permitivnost GaAs i AlGaAs ista i jednaka ϵ_s , efektivna masa elektrona u provodnoj zoni GaAs je m , a ofset provodne zone je ΔE_c . Temperatura je 0 K . Izvesti izraz za napon gejt – GaAs, V_{GB} . Polazeći od ovog izraza izvesti i izraz za napon praga HEMT-a V_T . Skicirati profil dna provodne zone, koordinatni početak postaviti na međupovrš AlGaAs/GaAs i računati energiju od dna provodne zone u GaAs na mestu $z = 0$.

Napomena: ... $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $\epsilon_{ox} = 3,9$, $\epsilon_s(\text{Si}) = 11,8$, $q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $E_g(\text{Si}, 300\text{K}) = 1,12 \text{ eV}$, $V_T = 25,9 \text{ mV}$, $k_B = 8,617385 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$, $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $T_{sob} = 300\text{K}$, $n_i(\text{Si}, 300\text{K}) = 1,0 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 menjaju drugi kolokvijum. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (15p.) (a) [7p.] Skicirati temu jonskog implantera i detaljno objasniti princip funkcionisanja. (b) [2p.] Brzo termalno odgrevanje. (c) [6p.] Kanalisanje jona.

2. (15p.) (a) [8p.] Objasniti proces samoporavnjanja na primeru izrade n -MOSFET tranzistora (dati poređenje sa neporavnanom strukturom).

(b) [4p.] Objasniti tehniku izolacije MOS tranzistora ukopanim oksidom.

(c) [3p.] Navesti sve relevantne efekte koji su posledica smanjenja dimenzija MOS tranzistora i dati kratko objašnjenje (u jednoj rečenici) suštine svakog navedenog efekta.

3. (20p.) U beskonačnom uzorku izvršena je difuzija sa početnom raspodelom primesa oblika $N(x,0) = N_0 \Theta(-x)$, gde $\Theta(-x)$ označava jediničnu step (Hevisajdovu) funkciju. Izvesti izraz za raspodelu primesa $N(x,t)$ u trenutku t od početka difuzije na konstantnoj temperaturi, ako je poznat koeficijent difuzije D na datoj procesnoj temperaturi.

4. (15p.) MBE: (a) skicirati opremu i ukratko objasniti ovaj planarni proces sa čvrstim izvorima za rast slojeva III-V jedinjenja; (b) navesti vrste MBE sa gasnim izvorima i po čemu se one razlikuju; (c) navesti bar 3 dobre osobine MBE sa gasnim izvorima.

5. (15p.) Rezonantna tunelska dioda (RTD): (a) skicirati izgled strukture i strujno-naponsku karakteristiku; (b) objasniti princip rada.

6. (20p.) Debljine dopiranog i razdvojnog sloja HEMT-a su d i x , respektivno. Koncentracija donora u sloju AlGaAs debljine d je N_D , a razlika energije dna provodne zone na kontaktu metal – poluprovodnik i Fermijevog nivoa u metalu je qV_0 . Energija dna prve i jedino popunjene podzone u GaAs je E_1 , a površinska koncentracija elektrona u 2DEG je n_{2D} . Usvojiti da je relativna permitivnost GaAs i AlGaAs ista i jednaka ϵ_0 , efektivna masa elektrona u provodnoj zoni GaAs je m , a ofset provodne zone je ΔE_c . Temperatura je 0 K. Izvesti izraz za napon gejta – GaAs, V_{Ga} . Polazeći od ovog izraza izvesti i izraz za napon praga HEMT-a V_T . Skicirati profil dna provodne zone, koordinatni početak postaviti na međupovrš AlGaAs/GaAs i računati energiju od dna provodne zone u GaAs na mestu $z = 0$.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 menjaju drugi kolokvijum. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (15p.) (a) [7p.] Skicirati šemu jonskog implantera i detaljno objasniti princip funkcionisanja. (b) [2p.] Brzo termalno odgrevanje. (c) [6p.] Kanalisanje jona.

2. (15p.) (a) [8p.] Objasniti proces samoporavnanja na primeru izrade n -MOSFET tranzistora (dati poređenje sa neporavnanom strukturom).

(b) [4p.] Objasniti tehniku izolacije MOS tranzistora ukopanim oksidom.

(c) [3p.] Navesti sve relevantne efekte koji su posledica smanjenja dimenzija MOS tranzistora i dati kratko objašnjenje (u jednoj rečenici) suštine svakog navedenog efekta.

3. (20p.) Na površinu besprimesnog polubeskonačnog poluprovodnika deponovan je tanak sloj primesa, a zatim je ceo sistem izolovan od izvora donorskih primesa. Odrediti raspodelu primesa u trenutku t od početka difuzije na konstantnoj temperaturi, ako je broj primesa po jedinici površine u tankom sloju Q , a koeficijent difuzije primesa na datoj procesnoj temperaturi je D .

4. (15p.) (a) Klasifikovati poluprovodničke nanostrukture prema dispoziciji provodne i valentne zone u materijalima koji čine nanostrukturu.

(b) Izvesti izraz za gustinu stanja u poluprovodničkoj kvantnoj jami i skicirati ovu zavisnost.

5. (15p.) (a) Objasniti modulaciono dopiranje. (b) HEMT: struktura, energetski dijagram, princip rada i karakteristike.

6. (20p.) Visina barijere ϕ_B metal/ n -GaAs jednog MESFET-a, ima vrednost 0,8 V. Debljina aktivnog n -GaAs sloja je $a = 0,2 \mu\text{m}$, a koncentracija primesa u ovom sloju je $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Efektivna gustina stanja u provodnoj zoni GaAs je $N_C = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, a relativna permitivnost GaAs je $\epsilon_s = 13,1$. Izračunati vrednosti ugrađenog potencijala V_{bi} , napona praga V_T , napona dodira V_P i odrediti tip MESFET-a.

$$V_{bi} \approx 0,7V \quad V_P = 0,276V \quad V_T = 0,424V \quad \text{EMESFET}$$

Napomena: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $q = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $V_F = 25,9 \text{ mV}$

$$X_d(V=0) = 0,318 \mu\text{m}$$

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(avgustovski ispitni rok)

01.09.2021.god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 menjaju drugi kolokvijum. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (17p.) (a) [6p.] Dati definiciju i osnovne karakteristike tehnike nagrizanja i ukratko objasniti sam mehanizam procesa nagrizanja.
(b) [5p.] Reaktivno jonsko nagrizanje (skicirati aparaturu i objasniti tehniku).
(c) [6p.] Navesti faktore koji utiču na poliranje u procesu hemijsko-mehaničke planarizacije i ukratko objasniti probleme koji mogu nastati pri poliranju.

2. (13p.) (a) [8p.] Objasniti proces samoporavnjanja na primeru izrade n -MOSFET tranzistora (dati poređenje sa neporavnanom strukturom).

(b) [5p.] Objasniti ulogu lako dopiranog drejna kod MOSFET tranzistora (skicirati i dati kratko objašnjenje strukture).

3. (20p.) Funkcija raspodele implantiranih primesa je zadata diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{df}{ds} = \frac{s-a}{b_0 + b_2 s^2} f(s).$$

Asimetrija i spljoštenost imaju vrednosti $\gamma = 0$ i $\beta = 3$, respektivno. Odrediti oblik raspodele.

4. (15p.) (a) Objasniti modulaciono-dopiranje. (b) HEMT: struktura, energetski dijagram, princip rada i karakteristike.

5. (15p.) Rezonantna tunelska dioda (RTD): (a) skicirati izgled strukture i strujno-naponsku karakteristiku; (b) objasniti princip rada skicirajući relevantne energetske dijagrame.

6. (20p.) Koristeći jednačine kinetičke teorije gasova za opis MBE, izračunati vreme za koje površina kristala ostaje čista od pozadinskog gasa. Narasta se (001) površina GaAs ($a = 0.5653$ nm), a pozadinski gas je vodonik ($m = 3.347 \cdot 10^{-27}$ kg, masa molekula H_2). Pretpostaviti da je adhezioni koeficijent $\xi = 1$, a pritisak pozadinskog gasa je $5 \cdot 10^{-11}$ mbar na $T = 300$ K. Bolemanova konstanta je $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K.

Ukupno 74. 17.30 y 100

$$p_{H_2} = 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$F = \frac{P}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

$$\bar{N} = \frac{2}{a^2}$$

$$t = \frac{\bar{N}}{\xi \cdot F}$$

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(jul)

01.07.2022.god.

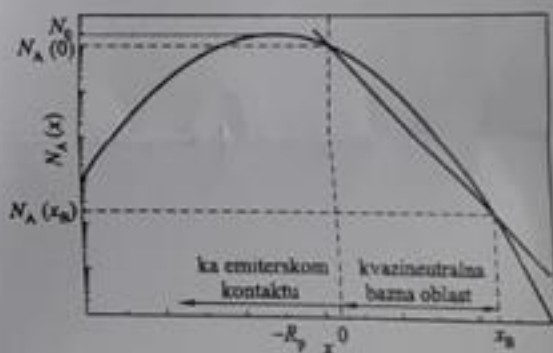
Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi integralni ispit ili samo jedan od kolokvijuma i koji. Zadaci 1-3 menjaju prvi kolokvijum, a zadaci 4-6 menjaju drugi kolokvijum. Ispit traje 180 min, a kolokvijum 120 min. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu radena.

1. (15p.) (a) [5p.] Dati definiciju i osnovne karakteristike tehnika nagrizanja i ukratko (uopšteno) objasniti mehanizme procesa nagrizanja.
(b) [5p.] Reaktivno jonsko nagrizanje (skicirati aparaturu i objasniti tehniku).
(c) [5p.] Navesti relevantne faktore koji utiču na poliranje u procesu hemijsko-mehaničke planarizacije i ukratko objasniti probleme koji mogu nastati pri poliranju.

2. (15p.) Za MOS tranzistor:

- (a) [2p.] navesti najvažnije efekte koji su posledica smanjenja dimenzija tranzistora;
(b) [5p.] detaljno objasniti efekat smanjenja dužine kanala (L) na napon praga;
(c) [3p.] detaljno objasniti uticaj HALO implantna na napon praga pri smanjenju dužine kanala;
(d) [5p.] detaljno objasniti efekat smanjenja širine kanala (W) na napon praga.

3. (20p.) Pokazati da su srednje vrednosti električnog polja koje potiče od jonizovanih primesa koje su raspodeljene u bazi n -pn tranzistora po Gausovoj i eksponencijalnoj raspodeli (kao na slici) međusobno jednake. Eksponencijalni profil je zadat sa $N_A \exp(x) = N_A(0)e^{-\alpha(x/x_B)}$.



4. (15p.) (a) Navesti dobre i loše osobine GaAs za primenu u mikroelektronici.
(b) Skicirati i objasniti zavisnost brzine nosilaca v u GaAs od električnog polja K . Uporediti ovu zavisnost sa dijagramom $v(K)$ za Si i objasniti uočene razlike na dijagramima za GaAs i Si.
5. (15p.) Rezonantna tunelska dioda (RTD): (a) skicirati izgled strukture i strujno-naponsku karakteristiku; (b) objasniti princip rada skicirajući relevantne energetske dijagrame.

5. (20p.) Koristeći jednačine kinetičke teorije gasova za opis MBE, izračunati vreme za koje površina kristala ostaje čista od pozadinskog gasa. Narasta se (001) površina GaAs ($a = 0.5653$ nm), a pozadinski gas je vodonik ($m = 3.347 \cdot 10^{-27}$ kg, masa molekula H_2). Pretpostaviti da je adhezioni koeficijent $\xi = 1$, a pritisak pozadinskog gasa je $5 \cdot 10^{-11}$ mbar na $T = 300$ K. Bolcmanova konstanta je $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K.

13E063MIN-MIKROELEKTRONIKA I NANOELEKTRONIKA
(avgustovski ispitni rok)

28.08.2019.god.

Uputstvo: Pre početka ispita na koricama naznačiti da li se radi ispit ili kolokvijum. Ispit traje 180 min, a II kolokvijum 120 min i rade se samo zadaci 4-6. Na koricama vežbanke obavezno precrtati kućice ispod brojeva ispitnih pitanja koja nisu rađena.

1. (15p.) (a) [4p.] Napisati I i II Fickov zakon i objasniti članove koji se u njima pojavljuju. (b) [3p.] Od čega sve zavisi koeficijent difuzije primesa? (Ukoliko postoje analitičke empirijske ili teorijske relacije navesti ih uz objašnjenje promenljivih i konstanti). (c) [8p.] Navesti uslove pod kojima se odvijaju i oblike zavisnosti koncentracije primesa od rastojanja od površine uzorka za dva tipična načina odvijanja procesa difuzije primesa u mikroelektronici. Dati relevantna objašnjenja raspodela u kontekstu veličina koje figurišu u izrazima.

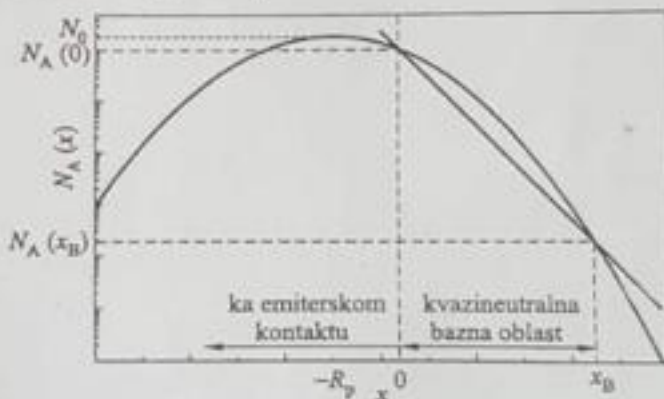
2. (15p.) Za MOS tranzistor malih dimenzija detaljno objasniti efekat:

(a) [6p.] modulacije dužine kanala,

(b) [9p.] vrućih nosilaca.

U sklopu objašnjenja dati primer kako se neželjeni efekti mogu umanjiti.

3. (20p.) Pokazati da su srednje vrednosti električnog polja koje potiče od jonizovanih primesa koje su raspodeljene u bazi *npn* tranzistora po Gausovoj i eksponencijalnoj raspodeli (kao na slici) međusobno jednake. Projektovano rasipanje Gausove raspodele je ΔR_p , a nagib eksponencijalne raspodele (za logaritamsku razmeru *N* ose) je α .



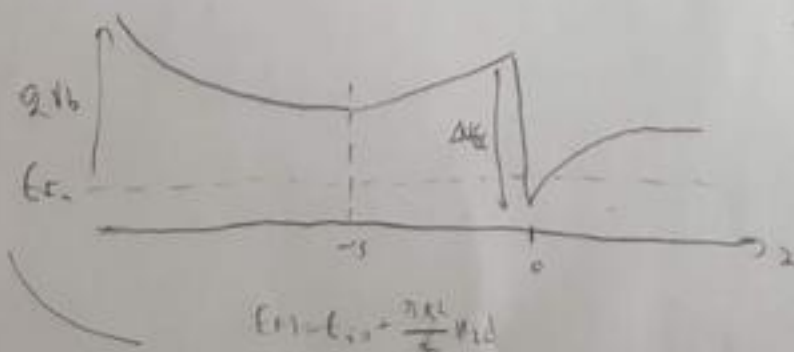
4. (15p.) MBE: (a) skicirati opremu i ukratko objasniti ovaj planarni proces sa čvrstim izvorima za rast slojeva III-V jedinjenja; (b) navesti vrste MBE sa gasnim izvorima i po čemu se one razlikuju; (c) navesti bar 3 dobre osobine MBE sa gasnim izvorima.

5. (15p.) HBT: struktura, energetski dijagram, princip rada i karakteristike.

6. (20p.) Debljine dopiranog i razdvojnog sloja HEMT-a su *d* i *s*, respektivno. Koncentracija donora u sloju AlGaAs debljine *d* je *N_D*, a razlika energije dna prvodne zone na kontaktu metal – poluprovodnik i Fermijevog nivoa u metalu je *qV_b*. Energija dna prve i jedino popunjene podzone u GaAs je *E₁*, a površinska koncentracija elektrona u 2DEG je *n_{2D}*. Usvojiti da je relativna permitivnost GaAs i AlGaAs ista i jednaka ϵ_s , efektivna masa elektrona u provodnoj zoni GaAs je *m*, a ofset provodne zone je ΔE_c . Temperatura je 0 K. Izvesti izraz za napon gejt – GaAs, *V_{GB}*, a polazeći od njega i izraz za napon praga HEMT-a *V_T*.

$$n_i = N_C \cdot N_V \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

$$n_i^2 = N_C \cdot N_V \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$



$$\epsilon_s = \frac{m}{m_0} \epsilon_0$$

$$\epsilon_s = \frac{m}{m_0} \epsilon_0 (1 - \epsilon_s)$$