

ELEKTRONSKI FAKULTET NIŠ

Katedra za mikroelektroniku

Miloš Marjanović

TEHNOLOGIJE MIKROSISTEMA

RAČUNSKÉ VEŽBE

(EKM, IV semestar)

Niš, 2016.

DOBIJANJE POLUPROVODNIČKIH SUPSTRATA

ZADATAK 1. Potrebno je dobiti monokristalni silicijum metodom CZ dopiran borom, koncentracije 10^{15}cm^{-3} . Odrediti potrebnu koncentraciju bora u rastvotu. Za 60kg silicijuma koliko grama B ($A_B=10.8$) je potrebno dodati rastvoru? Sagregacioni koeficijent bora je 0.8, a gustina rastopljenog Si 2.53g/cm^3 .

Rešenje:

Koeficijent sagregacije se definiše kao:

$$k_0 = \frac{n_s}{n_l} \rightarrow n_l = \frac{n_s}{k_0} = \frac{10^{15}}{0.8} = 1.25 \cdot 10^{15} \text{at/cm}^3$$

gustina se definiše kao:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} = \frac{60 \cdot 10^3}{2.53} = 2.37 \cdot 10^4 \text{cm}^3$$

koncentracija se definiše kao:

$$n_l = \frac{N}{V} \rightarrow N = n_l V = 2.96 \cdot 10^{19} \text{at.}$$

pa se iz gustine dobija:

$$\rho = \frac{NM}{VN_a} = \frac{m}{V} \rightarrow m = \frac{NM}{N_a} = \frac{2.96 \cdot 10^{19} \cdot 10.8}{6.023 \cdot 10^{23}} = 5.31 \cdot 10^{-4} \text{g.}$$

ZADATAK 2. Metodom Czochralski je potrebno dobiti borom dopirami monokristalni Si otpornosti $10\Omega\text{cm}$. Ako imamo 100g čistog silicijuma, koliko grama borom dopiranog silicijuma otpornosti $0.01\Omega\text{cm}$ je potrebno dodati rastopu? Pretpostaviti da je $k_0 = 0.8$ i da je pokretljivost šupljina $\mu_p = 550\text{cm}^2/\text{Vs}$.

Rešenje:

Specifična električna otpornost je:

$$\rho = \frac{1}{ep\mu_p}$$

ako su sve primese jonizovane, uzimamo da je:

$$p = N_A$$

tako da je:

$$N_A(10\Omega\text{cm}) = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 10^{-2} \cdot 550 \cdot 10^{-4}} = 1.14 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3},$$

$$N_A(0.01\Omega\text{cm}) = \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.01 \cdot 10^{-2} \cdot 550 \cdot 10^{-4}} = 1.14 \cdot 10^{24} \text{m}^{-3}.$$

Raspodela primesa u naraslom kristalu opisana je relacijom:

$$C_s = k_0 C_0 (1 - x)^{k_0 - 1}.$$

Uzimamo $x=0.5$, pola rastopa očvrstnulo, tako da je inicijalna koncentracija primesa:

$$C_0 = \frac{C_s}{k_0 (1-x)^{k_0 - 1}} = \frac{1.14 \cdot 10^{21}}{0.8 (1-0.5)^{-0.2}} = 1.24 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3}.$$

Oдавde se dobija:

$$C_0 = \frac{N}{V} = \frac{N_{A(B)} V_{(B)}}{V_{(Si)}} = \frac{N_{A(B)} \frac{m_{(B)}}{\rho}}{\frac{m_{(Si)}}{\rho}} = \frac{N_{A(B)} m_{(B)}}{m_{(Si)}} \rightarrow m_{(B)} = \frac{m_{(Si)} C_0}{N_{A(B)}} = 0.109 \text{g}.$$

ZADATAK 3. Czochralski monokristalni silicijum se dobija iz rastopa koji sadrži 10^{15}cm^{-3} bora i $2\cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$ fosfora. U početku silicijum će biti p-tipa, ali tokom izvlačenja kristala zbog efekta segregacije sve više fosfora ostaje u tečnoj fazi, tako da će u jednom trenutku početi da se dobija monokristalni silicijum n-tipa. Ako je koeficijent segregacije bora $k_0=0.8$, a koeficijent segregacije fosfora $k_0=0.32$, izračunati na kom će se rastojanju duž izvučenog kristala promeniti tip poluprovodnika (prelaz iz p-tipa u n-tip).

Rešenje:

Raspodela primesa u naraslom kristalu opisana je relacijama:

$$C_{s(P)} = k_{0(P)} C_{0(P)} (1 - x)^{k_{0(P)} - 1} \text{ i } C_{s(B)} = k_{0(B)} C_{0(B)} (1 - x)^{k_{0(B)} - 1}.$$

Tačka u kojoj se menja tip poluprovodnika iz p u n, ove dve koncentracije moraju biti jednake. Sređivanjem izraza se dobija:

$$x = 1 - \sqrt[k_{0(P)} - k_{0(B)}]{\frac{k_{0(B)} C_{0(B)}}{k_{0(P)} C_{0(P)}}} = 0.995.$$

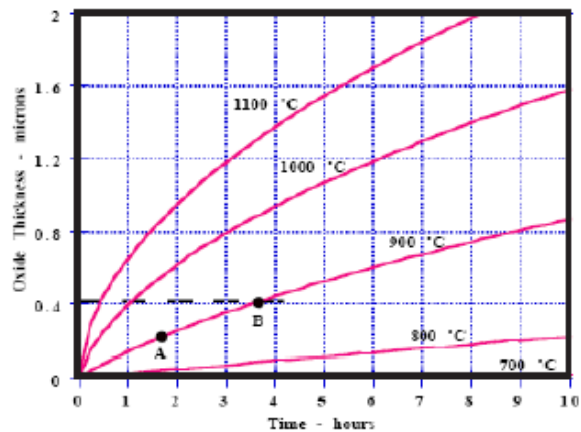
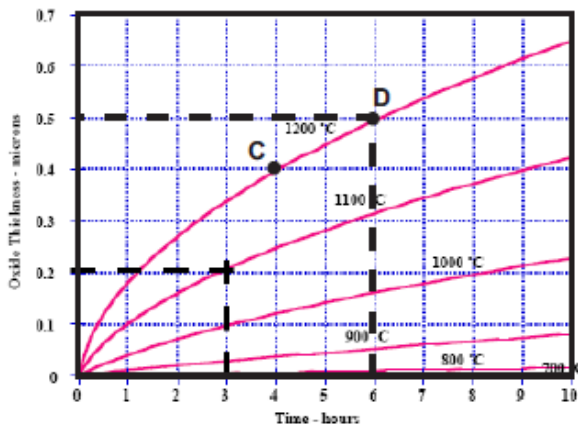
Dakle, poslednjih 0.5% kristala je n-tipa.

OKSIDACIJA

ZADATAK 1. Proces oksidacije (100) Si pločice se odvija 3 sata na 1100°C u O₂ ambijentu, zatim još 2 sata na 900°C u H₂O ambijentu, i konačno još 3 sata na 1200°C u O₂ ambijentu. Odrediti konačnu debljinu oksidnog sloja posle ovakvog multi-step oksidacionog procesa.

Rešenje:

Debljina oksida se određuje na sledeći način. Prvo, određujemo debljinu oksida za dry O₂ proces. Posle tri sata oksidacije na 1100°C dobija se oksid debljine 0.21μm. Zatim prelazimo na krive koje odgovaraju wet oksidaciji. Najpre na zavisnosti koja odgovara temperaturi od 900°C nalazimo tačku koja odgovara debljini oksida od 0.21μm, s obzirom da je to početna debljina oksida za ovaj proces oksidacije (tačka A). Posle dva sata oksidacije (tačka B) dobijamo da je debljina oksida na kraju wet procesa oksidacije oko 4μm. Sada se vraćamo na zavisnosti koje odgovaraju dry procesu oksidacije. Na zavisnosti koja odgovara temperaturi od 1200°C nalazimo tačku koja odgovara debljini oksida od 0.4μm, s obzirom da je to početna debljina oksida za ovaj proces oksidacije (tačka A). Posle dva sata oksidacije (tačka B) dobijamo konačnu debljinu oksida koja je oko 5μm.



ZADATAK 2. Pretpostavljajući da se LOCOS proces odvija na 1000°C u H₂O ambijentu izračunati, koriseći Deal-Grove model procesa oksidacije, koliko je vremena potrebno da se oksidiše sloj Si debljine 0.3μm?

Rešenje:

Deal-Grove model je linearno parabolički model oblika:

$$x^2 + Ax = B(t + \tau)$$

gde je x- debljina oksida. Radi jednostavnosti proračuna koristi se aproksimacija, za duga vremena oksidacije proces se opisuje jednačinom:

$$x^2 = Bt_1$$

gde je B konstanta parabolične brzine rasta: $B = C_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right)$.

Aproksimacija, za kratka vremena oksidacije opisuje se jednačinom:

$$x = \frac{B}{A} t_2$$

gde je B/A konstanta linearne brzine rasta: $\frac{B}{A} = C_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)$.

Ukupno vreme rasta je $t=t_1+t_2$.

Kako se tokom procesa oksidacije debljina supstrata smanji za $0.44d_{ox}$, a da bi se kompletno oksidisao sloj debljine 0.3μm neophodno je da se formira sloj oksida debljine: $d_{ox}=0.3\mu\text{m}/0.44=0.68\mu\text{m}$. Na temperaturi od 1000°C u H₂O ambijentu, vrednosti konstanti za Deal-Grove model date su u tabeli:

Oksidacioni ambijent	Parabolična brzina B (μm ² /h)	Linearna brzina B/A (μm/h)
Dry O ₂	$C_1 = 7.72 \cdot 10^2 \mu\text{m}^2/\text{h}$ $E_1=1.23\text{eV}$	$C_2 = 6.23 \cdot 10^6 \mu\text{m}^2/\text{h}$ $E_2=2.0\text{eV}$
Wet O ₂	$C_1 = 2.14 \cdot 10^2 \mu\text{m}^2/\text{h}$ $E_1=0.71\text{eV}$	$C_2 = 8.95 \cdot 10^7 \mu\text{m}^2/\text{h}$ $E_2=2.05\text{eV}$
H ₂ O	$C_1 = 3.86 \cdot 10^2 \mu\text{m}^2/\text{h}$ $E_1=0.78\text{eV}$	$C_2 = 1.63 \cdot 10^8 \mu\text{m}^2/\text{h}$ $E_2=2.05\text{eV}$

tako da se dobija:

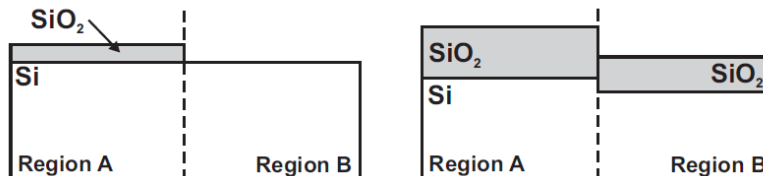
$$B = C_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) = 0.317\mu m^2/hr$$

$$\frac{B}{A} = C_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right) = 1.27\mu m/hr$$

prema tome dobijamo:

$$t = \frac{(0.68)^2}{0.317} + \frac{0.68}{1.27} = 2hr.$$

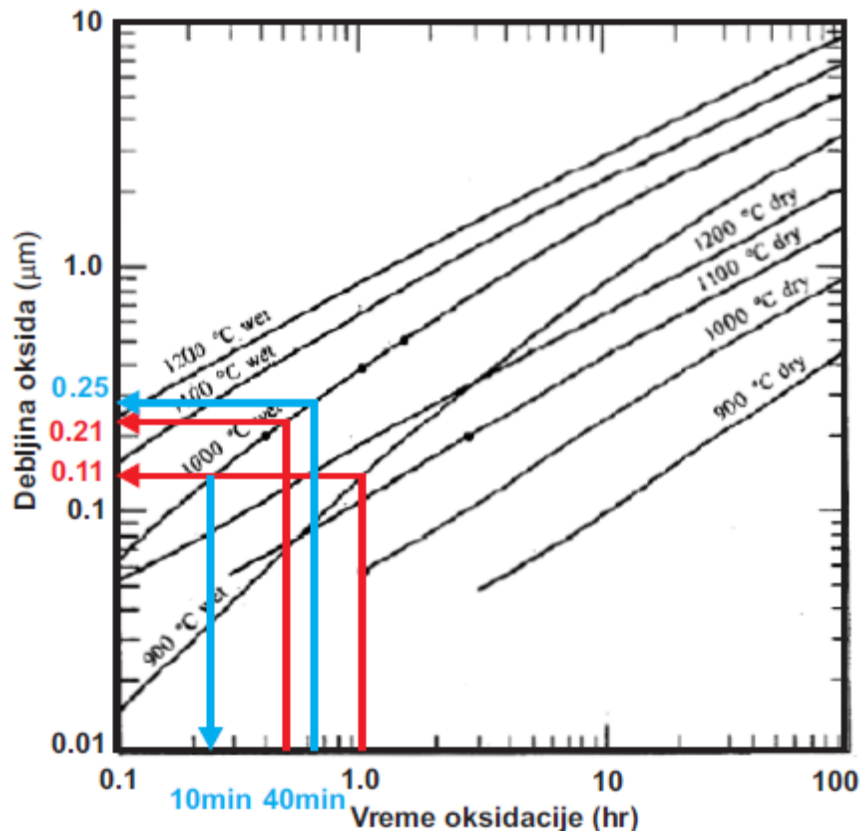
ZADATAK 3. Si pločica kristalografske orijentacije (100) oksidiše 1 sat na 900°C u wet H₂O ambijentu. Posle foto postupka formirani sloj oksida se ukloni sa polovine pločice. Pločica se zatim reoksidira u steam H₂O ambijentu 30 minuta na 1000°C. Koristeći date Jaegerove zavisnosti debljine formiranog oksida od temperature, ambijenta i vremena oksidacije, odrediti finalnu debljinu formiranog oksida u oblastima A i B prikazane strukture.



Rešenje:

Region B: 1000°C, 30min, steam H₂O debljina SiO₂ je 0.2μm.

Region A: 1100°C, 60min, dry O₂, pa je debljina SiO₂ jednaka 0.11μm, što je ekvivalentno 10 minuta oksidacije na 1000°C u H₂O ambijentu. Prema tome, sa grafika se dobija da je debljina oksidnog sloja posle 40 minuta na 1000°C u H₂O ambijentu 0.25μm.



ZADATAK 4. Početna debljina oksida na Si pločici je x_i . U oblastima definisanim foto postupkom najpre se potpuno uklanja oksid, a zatim se oksidacijom na 900°C u dry O_2 ambijentu u njima formira oksid gejta. Odrediti koliko je vreme oksidacije ako se formira oksid gejta debljine $0.1\mu\text{m}$?

Poznato je: $B=5600 \cdot 10^{-20}/\text{min}$, $B/A = 2 \cdot 10^{-10}/\text{min}$.

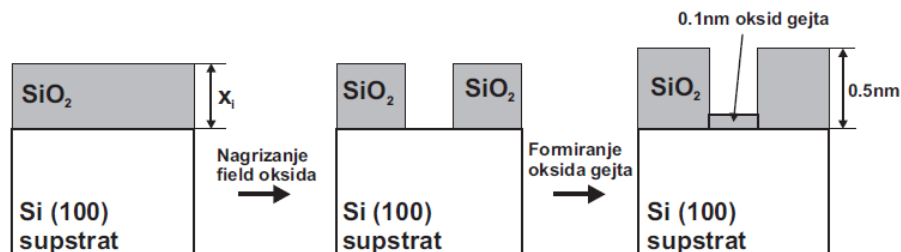
Posle oksidacije gejta ukupna debljina oksida u FIELD oblasti je $0.5\mu\text{m}$. Kolika je bila početna debljina oksida x_i ?

Rešenje:

Poznato je da je:

$$x^2 + Ax = B(t + \tau).$$

Na osnovu poznatih vrednosti B i B/A, dobija se $A=2800 \cdot 10^{-10}\text{m}$, a onda se za $x=1000 \cdot 10^{-10}\text{m}$ i $\tau=0$, dobija se $t=680\text{min}$.



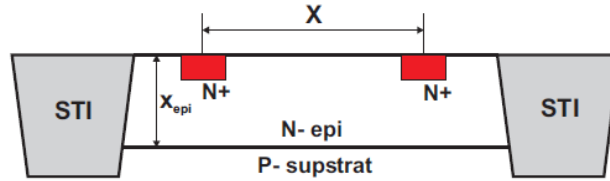
Ako je finalna debljina oksida gejta $x=5000 \cdot 10^{-10}\text{m}$, onda imamo je:

$$(5000)^2 + 2800 \cdot 5000 = 5600 \cdot 680 + x_i^2 + 2800 \cdot x_i$$

Odakle se dobija da je $x_i=4700 \cdot 10^{-10}\text{m}$.

DIFUZIJA

ZADATAK 1. Poprečni presek strukture otpornika, koji je sastavni deo visokofrekventnog analognog IC, prikazan je na slici. Otpornik je napravljen u N- epitaksijalnom sloju. Ako je širina otpornika $2.5\mu\text{m}$, kolika bi trebala da bude njegova dužina, da bi otpornost otpornika bila $50\text{k}\Omega$? Epitaksijalni sloj je dopiran fosforom, koncentracije 10^{15}cm^{-3} , a njegova debljina je $3\mu\text{m}$. Pokretljivost nosilaca je $1560\text{cm}^2/\text{Vs}$.



Rešenje:

Otpornost n oblasti koncentracije 10^{15}cm^{-3} je:

$$\rho = \frac{1}{en\mu_n} = 4\Omega\text{cm}.$$

Slojna otpornost je onda:

$$\rho_s = \frac{\rho}{x_{epi}} = 7500\Omega/\square.$$

Neophodan broj kvadrata da bi se dobila željena otpornost je:

$$n = \frac{R}{\rho_s} = 6.66$$

pa je onda dužina otpornika $X=6.66 \cdot 2.5=16.66\mu\text{m}$.

ZADATAK 2. Difuzija p-tip (bor) oblasti je realizovana na sledeći način:

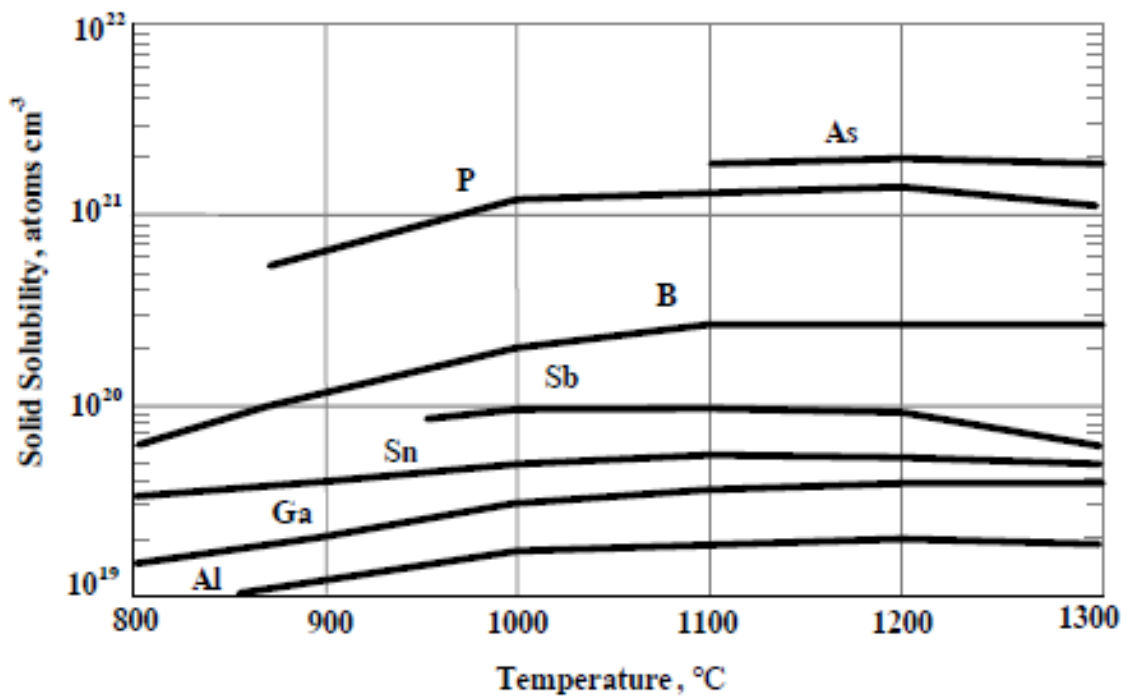
- Pre-dep: 30 minuta, 900°C, solid solubility,
 - Drive-in: 60 minuta, 1000°C.
- Kolika je deponovana doza Q ?
 - Ako je supstrat dopiran fosforom (10^{15} cm^{-3}), kolika je dubina spoja x_{jB} ?
 - Kolika je slojna otpornost formiranog p-tip sloja?

Rešenje:

- Deponovana doza Q je:

$$Q = 2C_s \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$$

Rastvorljivost (solid solubility) određujemo iz poznatih zavisnosti rastvorljivosti od temperature oksidacije, prikazanih na slici.



Za bor koji difunduje na 900°C, $C_s = 1.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Koeficijent difuzije određujemo na osnovu relacije:

$$D = D^0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right).$$

Korišćenjem koeficijenta D^0 i E_A iz tabele:

	Si	B	In	As	Sb	P	Units
D^0	560	1.0	1.2	9.17	4.58	4.7	cm ² /s
E_A	4.76	3.5	3.5	3.99	3.68	3.68	eV

Koeficijent difuzije bora na 900°C je:

$$D_B^{900} = 1.0 \cdot \exp\left(-\frac{3.5 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot (900 + 273)}\right) = 9,45 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}.$$

Tako da je deponovana doza:

$$Q = 2C_S \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} = 2 \cdot 1.2 \cdot 10^{20} \sqrt{\frac{9,45 \cdot 10^{-16} \cdot (30 \cdot 60)}{\pi}} = 1.76 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}.$$

b) Raspodela primesa u supstratu izračunava se korišćenjem izraza:

$$N = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x_j^2}{4Dt}\right).$$

Da bi izračunali dubinu spoja nakon *drive-in* procesa, potreban je koeficijent difuzije bora na 1000°C:

$$D_B^{1000} = 1.0 \cdot \exp\left(-\frac{3.5 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot (1000 + 273)}\right) = 1.43 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}.$$

Uzimamo da je $N=10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Za dubinu spoja, nakon *drive-in* procesa od 60min, dobija se:

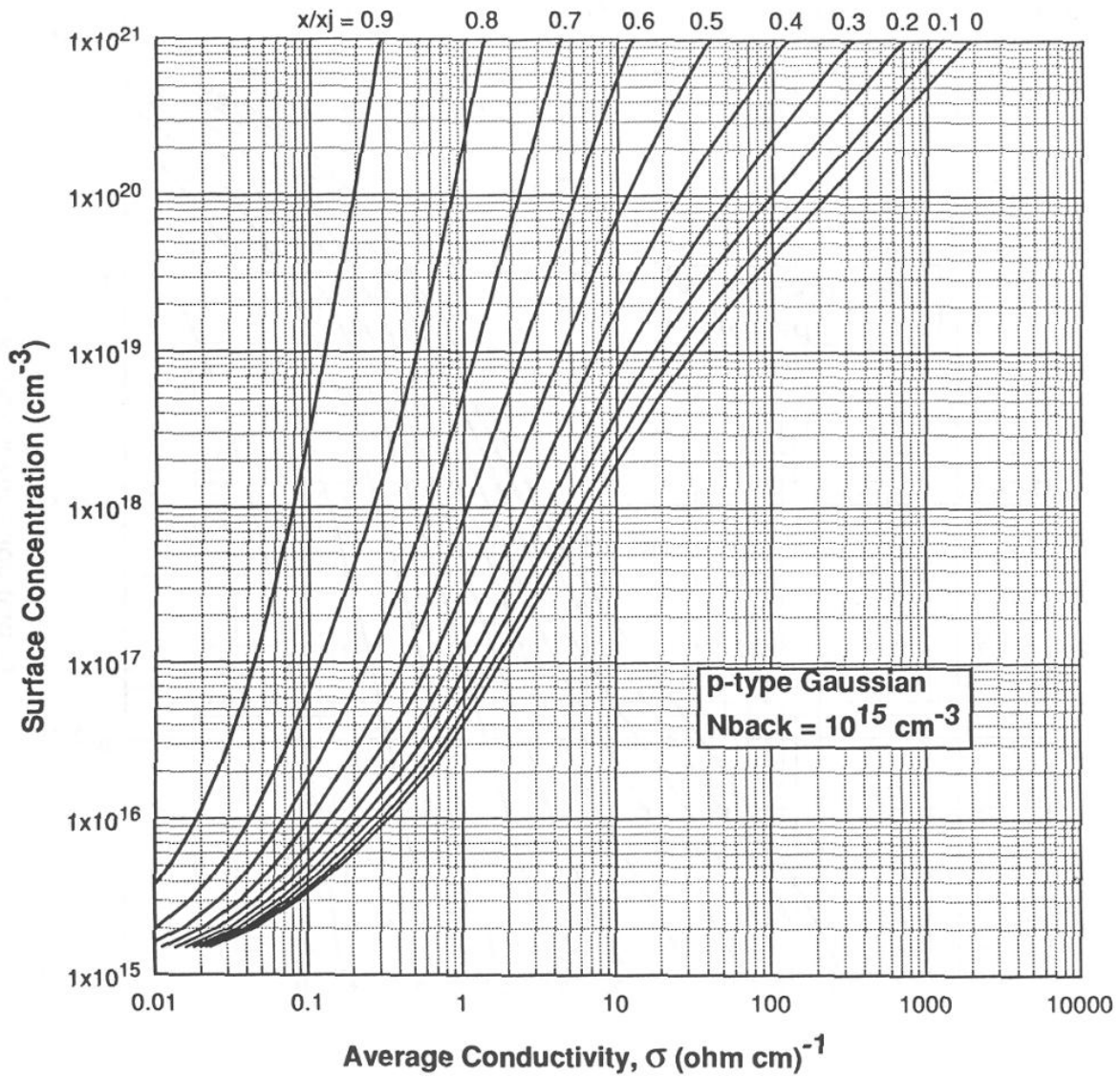
$$x_j = \sqrt{4Dt \cdot \ln\left(\frac{Q}{N\sqrt{\pi Dt}}\right)} = 4.43 \cdot 10^{-5} \text{ cm} = 0,443 \mu\text{m}.$$

c) Slojna otpornost formiranog p-tip sloja određuje se kao:

$$\rho_s = \frac{\rho}{h}$$

gde je $h=x_j$, debljina sloja. Specifična električna otpornost određuje se iz Irvinovih krivih (slika – Gaussov profil p-tipa) na osnovu poznate površinske koncentracije ($x/x_j=0$) $1.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Dobija se specifična električna provodnost $\sigma=300(\Omega\text{cm})^{-1}$. Na osnovu ove vrednosti određujemo slojnu otpornost:

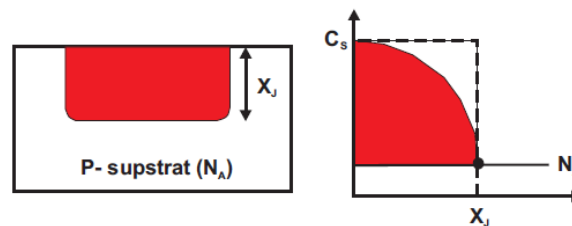
$$\rho_s = \frac{1}{300 \cdot 0,443 \cdot 10^{-6}} = 75.24 \Omega/\square.$$



ZADATAK 3. N^+ oblast dubine x_j se formira u P^- supstratu, kao što je prikazano na slici. Za komponentu koju proizvodimo je važno minimizirati vrednost slojne otpornosti N^+ oblasti.

- Pod pretpostavkom da se može formirati idealni "box" profil, napisati izraz za ρ_s (apsolutni minimum vrednosti slojne otpornosti).
- Ako se kao primesa koristi arsen, odrediti minimalnu vrednost slojne otpornosti kada je $x_j=0.1\mu\text{m}$, pod uslovom da je dobijena maksimalna moguća koncentracija arsena jednaka njegovoj rastvorljivosti u silicijumu $2\cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}$.
- Ako koristimo normalni "error function" profil, sa površinskom koncentracijom koja odgovara vrednosti maksimalne rastvorljivosti arsena u silicijumu i ako je dubina spoja $x_j=0.1\mu\text{m}$, kolika će biti vrednost ρ_s ?
- Ponoviti izračunavanja pod c) ako je arsen deaktiviran na svoju normalnu električnu rastvorljivost u silicijumu, koja je za red veličine manja, zbog formiranja klastera, tako da deo arsenovih primesa ostaje električno neaktivan.

* **KLASTER:** određeni broj čestica formira novu česticu (klaster), čije se transportne karakteristike bitno razlikuju u odnosu na matičnu česticu.



Rešenje:

- Slojna otpornost uniformnog „box“ profila je data izrazom:

$$\rho_s = \frac{1}{Nq\mu x_j}.$$

- Vrednost slojne otpornosti u ovom slučaju je $\rho_s=3.67\Omega/\square$.
- Ako se koristi „error function“ profil, vrednost srednje provodnosti sloja se može odrediti iz Irvinovih krivih za n-tip poluprovodnika (complementary error function), pa se ekstrakcijom dobija $\sigma=1500(\Omega\text{cm})^{-1}$, odnosno slojna otpornost je $\rho_s=66.7\Omega/\square$.
- Električna rastvorljivost arsena u Si je za red veličine manja, zbog formiranja klastera arsen-vakancija, tako da deo arsenovih primesa ostaje električno neaktivan. Uz pomoć Irvinovih krivih, za aktivnu površinsku koncentraciju arsena $2\cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}$ se dobija $\sigma=400(\Omega\text{cm})^{-1}$, pa je onda $\rho_s=250\Omega/\square$, što je i tipična vrednost slojne otpornosti visoko dopiranih sors/drejn oblasti tranzistora.

PROBLEM 1. U silicijumu je realizovan proces difuzije bora tako da je maksimalna koncentracija bora 10^{18}cm^{-3} . U kom opsegu temperatura na kojima se odvija proces difuzije je važno uzeti u obzir zavisnost koeficijenta difuzije od koncentracije primesa i uticaj električnog polja na proces difuzije?

Rešenje:

Efekti uticaja električnog polja i zavisnosti koeficijenta difuzije primesa od koncentracije se moraju uzeti u obzir kada su koncentracije primesa (nivo dopiranja) veće od sopstvenih koncentracija elektrona (ili šupljina) n_i . Kao što je poznato sopstvena koncentracija nosilaca ni se povećava sa povećanjem temperature i može se odrediti korišćenjem izraza:

$$n_i = 3.9 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp\left(-\frac{0.605}{kT}\right)$$

Kako je maksimalna koncentracija bora 10^{18}cm^{-3} , rešavanjem gornjeg izraza dobijamo da je $n_i = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ na temperaturi $T = 720^\circ\text{C}$, što znače da se efekti uticaja električnog polja i zavisnosti koeficijenta difuzije od koncentracije primesa moraju uzimati u obzir na temperaturama koje su manje od 720°C .

PROBLEM 2. Silicijumska pločica je uniformno dopirana borom ($2 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$) i fosforom ($1 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$) tako da je ona P-tipa. Procesom termičke oksidacije na pločici se formira sloj osida debljine $1 \mu\text{m}$. Oksid se zatim uklanja i merenjem je utvrđeno da je površina pločice sada N-tipa. Objasniti zašto se površina pločice konvertovala iz P u N-tip?

Rešenje:

U toku procesa oksidacije, zbog efekta segregacije bor prelazi u oksidni sloj koji se formira na površini silicijumske pločice, usled čega se smanjuje površinska koncentracija bora u silicijumu. S druge strane, na međupovršini oksid/silicijum, fosfor segregira na strani silicijuma. Oba navedena efekta deluju u istom pravcu, tj. utiču na površina silicijuma bude više N-tipa. Ovo je i razlog zbog kojeg je P-tip "channel stop" implantacija skoro uvek neophodna ispod LOCOS slabo dopiranih P-tip oblasti, kako bi se sprečilo osiromašenje primesa P-tipa u supstratu i formiranje kanala N-tipa.

JONSKA IMPLANTACIJA

ZADATAK 1. Antimon implantiramo u nedopirani silicijumski supstrat. Energija implantacije je 60keV, a doza implantacije je 10^{12}cm^{-2} .

- Na kojoj dubini se nalazi maksimum implantiranog profila?
- Kolika je koncentracija antimona na ovoj dubini?
- Kolika je koncentracija na dubini 20nm?

Rešenje:

- Na osnovu tabele, određujemo da je za $E=60\text{keV}$, maksimum koncentracije na dubini $R_p=31\text{nm}$, sa odstupanjem $\Delta R_p=5.1\text{nm}$.

E, keV	$^{11}\text{B}^+$		$^{31}\text{P}^+$		$^{75}\text{As}^+$		$^{121}\text{Sb}^+$	
	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p
20	78	11	26	9.4	16	3.7	14	2.4
40	161	19	49	16	27	6.2	23	3.8
60	244	27	73	23	38	8.4	31	5.1
80	324	35	98	30	48	10.5	38	6.3
100	398	42	123	35	58	12.5	46	7.4
120	469	48	149	41	68	14.5	53	8.4
140	537	54	175	47	79	16	60	9.5
160	603	60	201	52	89	18	67	10.5
180	665	60	228	57	99	20	74	11.5
200	725	70	254	61	110	22	81	12.5

- Doza implantacije određuje se kao:

$$Q = \sqrt{2\pi} N_{peak} \Delta R_p$$

pa je vršna vrednost koncentracije $N_{peak}=7.82 \cdot 10^{23}\text{m}^{-3}$.

- Za određivanje koncentracije na dubini x od površine koristi se izraz za raspodelu jona pri implantaciji:

$$N(x) = N_{peak} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] = 2.3 \cdot 10^{24}\text{m}^{-3}.$$

ZADATAK 2. Procesom implantacije potrebno je dobiti profil bora čiji se maksimum (10^{17}cm^{-3}) nalazi na dubini od $0.4 \mu\text{m}$. Odrediti energiju i dozu implantacije. Kolika je dubina pn-spoja, ako je supstrat u koji se bor implantira N-tipa, koncentracije 10^{15}cm^{-3} .

Rešenje:

Na osnovu poznate maksimalne dubine $R_p=0.4 \mu\text{m}$, iz tabele određujemo da energija implantacije treba da bude $E=100 \text{keV}$. Standardno odstupanje od ove dubine je $\Delta R_p=42 \text{nm}$. Dozu implantacije određujemo iz:

$$Q = \sqrt{2\pi} N_{peak} \Delta R_p = 1.05 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}.$$

Iz izraza za raspodelu jona pri implantaciji dobija se da je dubina pn-spoja:

$$x = R_p + \Delta R_p \sqrt{-2 \ln \frac{N(x)}{N_{peak}}} = 0.272 \mu\text{m}.$$