

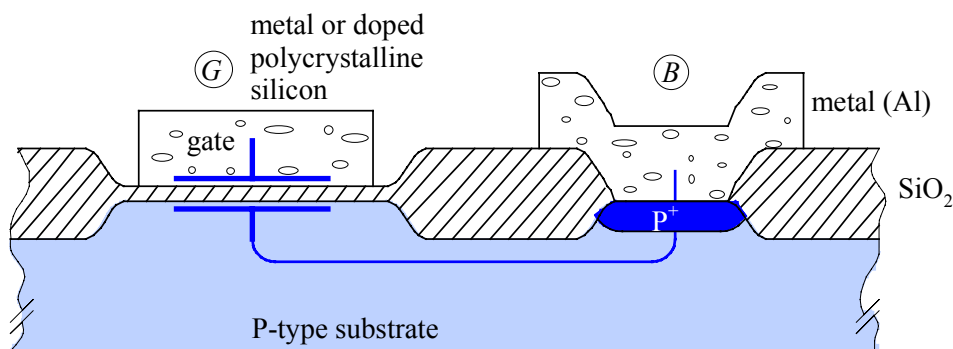
2.5 METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR (MOS) KONDENZATOR I TERMIČKI OKSID

MOS kondenzatori se koriste u linearnim kolima, i čak mnogo češće u digitalnim kolima kao komponente za držanje naelektrisanja u RAM (random-access-memory) memorijama. Pored toga, najčešće korišćena komponenta u savremenoj elektronici, MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), zasnovan je na MOS kondenzatoru. Prema tome, važnost ovog poglavlja nije ograničena samo na primeni kondenzatora, već ono uvodi više koncepata i parametara koji se odnose na MOSFET.

2.5.1 Struktura u integrisanom kolu.

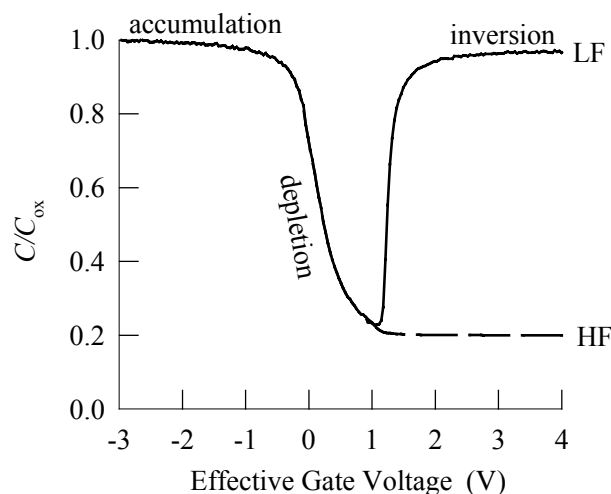
MOS kondenzator se formira korišćenjem poluprovodničkog supstrata kao jedne provodne ploče kondenzatora, koja je odvojena tankim slojem silicijum-dioksida (koji ćemo kratko zvati oksid) od druge provodne ploče koja je nanešena na sloju oksida (Sl. 2.12). Prvobitno se metalni film (najčešće aluminijum) koristio da bi se formirala druga ploča kondenzatora, što je direktno i doprinelo nazivu strukture *metal-oxide-semiconductor* (metal-oxid-poluporovodnik). Mi ćemo ovu ploču kondenzatora (elektrodu) zvati *gejt* (gate = kapija) jer se taj naziv koristi za odgovarajuću elektrodu MOSFET-a. Kod savremenih integrisanih kola aluminijumski gejtovi su zamenjeni silicijumskim gejtovima. U tom slučaju, tanak sloj silicijuma deponovan je preko oksida i jako je dopiran da bi formirao elektrodu gejta. Kada se silicijum deponuje preko oksida, struktura takvog sloja silicijuma nije monokristalna već polikristalna; zbog toga se ova elektroda često naziva *polisilicijumski gejt* ili čak *polygejt*. Medjutim, naziv metal-oksidi-poluprovodnik (MOS) ostaje nepromenjen bez obzira na materijal koji se koristi (metal ili silicijum) za elektrodu gejta.

Aktivna površina kondenzatora (površina tankog sloja oksida koji se naziva *oksid gejta*) je obično okružena znatno debljim oksidom koji se naziva *field oxide* (oksid u polju), kao što je prikazano na Sl. 2.12. Ovo je zbog toga da bi se definisale poluprovodničke ploče kondenzatora i minimizirali efekti električnog polja na ivicama, pa prema tome ima ulogu neke vrste izolacije kondenzatora. Oksid u polju se široko primenjuje u tehnikama izolacije u integrisanim kolima koja koriste MOSFET-ove. Na poluprovodničkoj oblozi ovog MOS kondenzatora načinjen je kontakt da bi se omogućio pristup ovoj elektrodi sa površine integrisanog kola. Kao što je na Sl. 2.12 prikazano, dopiranost poluprovodničkog supstrata je obično povećana (P^+ oblast na slici) da bi se obezbedio bolji kontakt između metalnog sloja i poluprovodničkog supstrata. U MOS kondenzatoru ilustrovanom na Sl. 2.12 iskorišćen je poluprovodnički supstrat P-tipa. Medjutim, MOS kondenzatori se takodje mogu realizovati i na poluprovodničkim supstratima N-tipa.



Sl. 2.12 Poprečni presek MOS (metal-oxide-semiconductor) kondenzatora

U slučaju kondenzatora na bazi P-N spoja, mogu se primeniti samo inverzni naponi polarizacije (u direktnoj polarizaciji PN spoj vodi). Medjutim, kod MOS kondenzatora prisustvo oksida omogućava primenu i negativnih i pozitivnih napona polarizacije; zbog toga je zavisnost kapacitivnosti od napona mnogo složenija. Tipična C-V kriva za MOS kondenzator realizovan na supstratu P-tipa, prikazana je na Sl. 2.13.



Sl. 2.13 C-V kriva MOS kondenzatora; puna linija - niskofrekventna (kvazistatička); isprekidana linija - visokofrekventna kriva

Akumulacija

Kada se između gejta i supstrata primeni negativan napon (V_G) doći će do privlačenja velikog broja šupljina iz supstrata P-tipa na površinu silicijuma. Ovaj efekat, kada je površinska koncentracija većinskih nosilaca (šupljina u ovom slučaju) povećana naziva se *akumulacija*. U stanju akumulacije, pozitivno naelektrisanje koje se pojavljuje na poluprovodničkoj oblozi kondenzatora razdvojeno je samo oksidom gejta, što znači da je kapacitivnost kondenzatora data izrazom

$$C = C'_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{t_{ox}} A \quad (2.59)$$

gde je t_{ox} debljina oksida gejta, ϵ_{ox} je relativna dielektrična konstanta oksida ($\epsilon_{ox}=3.9$), ϵ_0 je dielektrična propustljivost vakuuma ($\epsilon_0=8.85 \times 10^{-14}$ F/cm), a A je površina gejta. Veoma često, mnogo je pogodnije izraziti kapacitivnost po jedinici površine, u kom slučaju je kapacitivnost oksida (po jedinici površine) data sa

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (2.60)$$

gde je C_{ox} u jedinicama F/cm². Sve dok je kondenzator u stanju akumulacije, kapacitivnost je jednaka C_{ox} , što znači da ne zavisi od primenjenog napona.

Osiromašenje

Kada se na gejt MOS kondenzatora primeni pozitivan napon, doći će do potiskivanja šupljina sa površine silicijuma, što dovodi do stvaranja osiromašenog sloja na površini. Provodne obloge kondenzatora sada su razdvojene oksidom plus širinom osiromašenog sloja, što znači da je kapacitivnost manja od kapacitivnosti C_{ox} . Za MOS kondenzator se kaže da je u *stanju osiromašenja*.

Širina osiromašenog sloja zavisi od primenjenog napona (većim naponima na gejtju odgovara širi osiromašeni sloj i više šupljina potisnutih sa površine). Kao posledica toga, kapacitivnost zavisi od primenjenog napona, pri čemu većem naponu na gejtju odgovara manja kapacitivnost.

Inverzija

Ako se veličina pozitivnog napona na gejtju poveća iznad određene vrednosti, električno polje koje prodire kroz oksid gejtja postaje dovoljno jako da privuče elektrone (manjinske nosioce) na površinu poluprovodnika. Ovo se naziva stanjem inverzije. Ako se napon na gejtju menja lagano (niskofrekventni signal primenjen na gejt), elektroni na površini poluprovodnika pratiće promenu pozitivnog naelektrisanja na gejtju. Osiromašeni sloj neće uticati na kapacitivni efekat, pa prema tome oksid gejtja predstavlja efektivni dielektrik kondenzatora. Ovo znači da će kapacitivnost ponovo biti jednaka C_{ox} i nezavisna od napona na gejtju. Elektroni koji dolaze na površinu poluprovodnika kao odgovor na promene napona na gejtju su termički generisani (elektroni u P-tipu su manjinski nosioci koji postoje usled procesa termičke generacije). Proces termičke generacije elektrona je međjutim veoma spor. Zbog toga se gustina elektrona na površini poluprovodnika neće menjati ukoliko je na gejt primenjen naponski signal visoke frekvencije (>100 Hz). U tom slučaju, elektroni na površini poluprovodnika su neefikasni i ne prate visokofrekventni signal. Visokofrekventna kapacitivnost MOS kondenzatora u stanju inverzije ostaće manja od C_{ox} , što je određeno zbirom debljine oksida i širinom osiromašenog sloja.

2.5.2 Termički oksid: Rast oksida i njegove karakteristike

Karakteristike silicijum-dioksida, koji se koristi kao dielektrik MOS kondenzatora, od fundamentalnog su značaja za uspeh tehnologije silicijumskih integrisanih kola. Kada tih karakteristika silicijum-dioksida ne bi bilo, prednosti tehnologija baziranih na silicijumu u odnosu na tehnologije na drugim poluprovodničkim materijalima bile bi verovatno izgubljene. U stvari, međjupovršina silicijumdioksid - silicijum (ili kratko međjupovršina oksid-silicijum) je jedina poznata međjupovršina koja je dovoljno dobra da omogući rad MOSFET-ova do industrijskih standarda.

Osnovne karakteristike oksida i međjupovršine oksid-silicijum.

Karakteristike slojeva silicijumdioksida sumirane su u Tabeli 2.3. Dvodimenzionalni model hemijskih veza međjupovršine oksid-poluprovodnik dat je na Sl. 2.14a. Iako oksid nije kristalan, atomi silicijuma i kiseonika pakovani su po pravilnom rasporedu: svaki silicijumov atom je povezan sa četiri kiseonikova atoma i svaki kiseonikov atom je vezan sa dva silicijumova atoma. U stvarnosti, ćelije formirane od jednog silicijumovog atoma i četiri susedna atoma kiseonika imaju tetraedarski oblik (trodimenzionalno) kao što je objašnjeno u Tabeli 2.3. Model energetskih zona međjupovršine silicijumdioksid-silicijum prikazan je na Sl. 2.14b. Širina zabranjene zone oksida je oko 9 eV. Ovako velika vrednost čini oksid veoma dobrim izolatorom. To je više od osam puta veća vrednost od širine zabranjene zone silicijuma (1.12 eV). Ova disproporcija u širinama zabranjene zone oksida i silicijuma znači da mora postojati i diskontinuitet u energetskim zonama na međjupovršini oksid-silicijum. Sl. 2.14b ilustruje da pred elektronima u silicijumu postoji barijera od $q\Phi_B=3.2$ eV kada se oni kreću ka međjupovršini oksid-silicijum. Što se tiče šupljina, njihova barijera je još veća: $9-3.2-1.12 \approx 4.7$ eV. Ove barijere su dovoljno visoke da u normalnim uslovima spreče bilo koje kretanje elektrona ili šupljina iz silicijuma u oksid.

Površinska stanja i naelektrisanje u oksidu

U praksi, međjupovršina oksid-silicijum nije ograničena na sloj atoma, već se prelaz od silicijuma u oksid odvija preko više atomskih slojeva. Iako Sl. 2.14 ne izražava tu činjenicu, ona ilustruje najčešće defekte koji se pojavljuju na međjupovršini i u oksidu.

Za početak, srednje rastojanje između atoma kiseonika je veće od srednjeg rastojanja između silicijumovih atoma u silicijumu, što znači da će neki od površinskih atoma iz silicijuma propustiti kiseonikove atome da bi formirali Si-O veze. Atomi iz silicijuma koji ostaju povezani samo sa tri silicijumova atoma sa četvrtom nezasićenom kovalentnom vezom (trovalentni površinski silicijumovi atomi) predstavljaju površinske defekte. Energetski nivoi koji odgovaraju četvrtoj nezasićenoj vezi trovalentnih silicijumovih atoma ne pojavljuju se ni u provodnoj ni u valentnoj zoni, već najčešće u zabranjenoj zoni silicijuma. Veruje se da svaki trovalentni silicijumov atom uvodi par energetskih nivoa; jedan može biti zauzet elektronom (nivo akceptorskog tipa) a drugi može biti popunjen šupljinom (donorskog tipa). Elektroni i šupljine koji se pojavljuju na ovim nivoima ne mogu se slobodno kretati jer postoji relativno veliko rastojanje između susednih površinskih trovalentnih silicijumovih atoma (ovi nivoi su lokalizovani i izolovani jedan od drugog). Pošto ovi nivoi mogu efikasno zahvatiti pokretne elektrone i šupljine (iz provodne i valentne zone, respektivno), oni se nazivaju *površinska stanja* (interface traps). Atomi primesa i grupe (kao što su H, OH, i N) mogu biti povezani sa nezasićenim vezama trovalentnih silicijumovih površinskih atoma, što za posledicu ima pomeranje odgovarajućeg energetskog nivoa u provodnu ili valentnu zonu (defekti B na Sl. 2.14). Iako ovaj proces efikasno neutrališe površinska stanja, nije moguće primorati takvo zasićenje svih trovalentnih površinskih silicijumovih atoma, što znači da gustina površinskih stanja nikad ne može biti smanjena na nulu. Gustina površinskih stanja biće označena sa N_{it} , da bi se izrazio broj površinskih stanja po jedinici površine (u m^{-2}), ili sa qN_{it} da bi se izrazila povezanost sa zahvaćenim naelektrisanjem po jedinici površine (u Cm^{-2}).

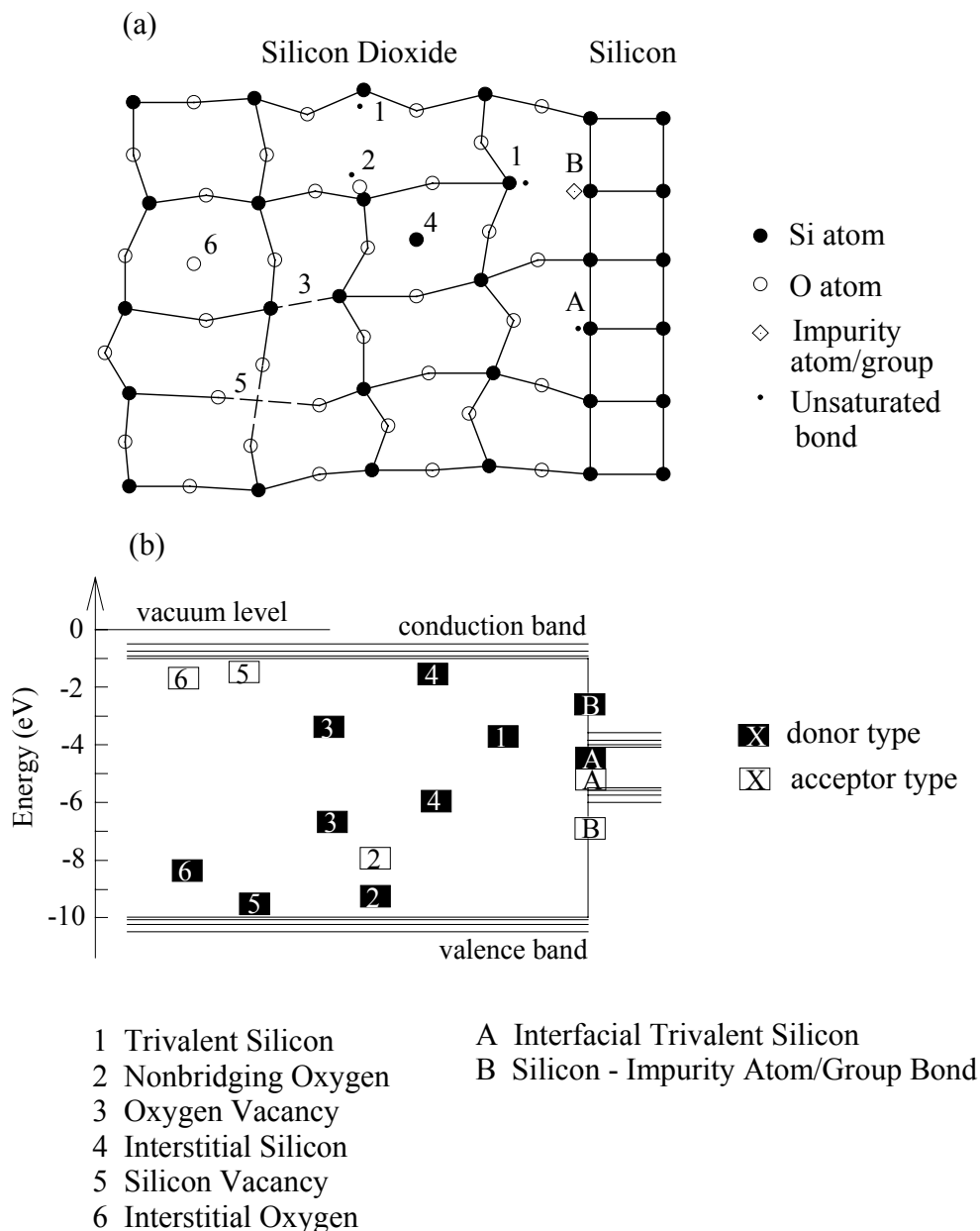
Trovalentni silicijumovi atomi se mogu takodje pojaviti i u oksidu - to su atomi silicijuma povezani sa tri susedna atoma kiseonika i četvrtom kovalentnom vezom nezasićenom (defekt 1 na Sl. 2.14). Takodje, postoje i brojne druge mogućnosti za defekte u oksidu: nepremošćeni kiseonik, vakancija kiseonika, intersticija silicijuma, vakancija silicijuma i intersticija kiseonika. Svi ovi defekti takodje su ilustrovani na Sl. 2.14. Defekti u oksidu uvode energetske nivoe u zabranjenu zonu oksida, što znači da mogu da zahvate elektron ili šupljinu. Naelektrisanje usled zahvaćenih elektrona ili šupljina na defektima u oksidu naziva se *naelektrisanje u oksidu* (oxide charge). Iako centri zahvata u oksidu ne razmenjuju u kontinuitetu elektrone i šupljine sa silicijumom, naelektrisanje u oksidu će uticati na elektrone i šupljine u silicijumu svojim električnim poljem. Generalno, naelektrisanje u oksidu je obično pozitivno i uglavnom je locirano u blizini međupovršine oksid-silicijum. Gustina naelektrisanja u oksidu biće označena sa N_{oc} da bi se izrazio broj naelektrisanih centara po jedinici površine (u m^{-2}) ili sa qN_{oc} da bi se izrazilo u C/m^2 .

Tabela 2.3 Karakteristike termički formiranog SiO ₂	
Struktura	Amorfna u kojoj su atomi Si okruženi sa četiri atoma O: u tetraedarskom položaju Si-O rastojanje varira od 0.152 do 0.169 nm Si-O uglovi variraju od 120° do 180° O-Si-O uglovi su oko 109.5°
Dielektrična konstanta	3.9
Jačina dielektrika	≈ 10 ⁷ V/cm (kritično probojno polje)
Širina zabranjene zone	≈ 9 eV
Specifična otpornost	10 ¹² - 10 ¹⁶ Ωcm

Rast oksida i lokalna oksidacija (LOCOS)

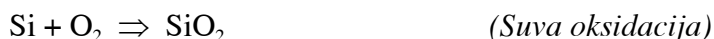
Lako se može zamisliti da gustina površinskih stanja i naelektrisanja u oksidu jako zavisi od uslova procesiranja. Iako je moguće deponovati sloj oksida na površinu silicijuma, takav proces ne obezbeđuje dovoljno dobru međupovršinu oksid-silicijum da bi se koristila u MOS kondenzatorima.

Gustina površinskih stanja u tom slučaju može premašiti gustinu elektrona-šupljina koje bi uopšte bile privučene do medjupovršine. Ovo znači da bi površinska stanja pojavu svake značajne količine slobodnih nosilaca na površini silicijuma učinila nemogućom.



Sl. 2.14 Ilustracija medjupovršine oksid-silicijum i odgovarajućih defekata:
(a) dvodimenzionalni model hemijskih veza i (b) model energetske zone

Medjupovršina oksid-silicijum visokog kvaliteta može se dobiti ukoliko oksid termički naraste na površini silicijuma. Kada se silicijum izloži atmosferi kiseonika ili vodene pare na visokoj temperaturi (oko 1000°C), silicijum dioksid se stvara kroz sledeće reakcije:



Ovaj proces termičke oksidacije, kada se izvodi u ultračistoj atmosferi i nakon sofisticiranog čišćenja površine silicijuma, daje medjupovršinu oksid-silicijum visokog kvaliteta. Gustina površinskih stanja je reda 10^{10}cm^{-2} . Ovo se pokazalo dovoljnim za primenu u tehnologiji integriranih kola koja koriste okside gejta deblje od 5 nm. Kontinualni razvoj tehnologije integriranih kola, koji je

zahtevao razvoj oksida gejta debljine i ispod 5 nm, doveo je do istraživanja mogućnosti za dalje poboljšanje kvaliteta međupovršine oksid-silicijum. Ispostavilo se da će rešenje za dielektrike gejta tanje od 5 nm biti nadjeno u nekoj vrsti silicijum dioksida obogaćenog azotom, jer je bilo pokazano da azot neutrališe brojne defekte u oksidu i na međupovršini oksid-silicijum.

Reakcija oksidacije odvija se na površini silicijuma, što znači da pošto se formira sloj oksida, molekuli kiseonika ili vode moraju da difunduju kroz već formiran sloj da bi reagovali sa silicijumom. Kao posledica toga, brzina rasta oksida se usporava sa porastom debljine oksida. Brzina rasta jako zavisi od temperature oksidacije, i takodje se razlikuje za procese suve (O_2) i vlažne (H_2O) oksidacije. Porast temperature oksidacije značajno povećava brzinu rasta oksida, koja je sa druge strane na bilo kojoj temperaturi veća pri vlažnoj oksidaciji.

Silicijum nitrid (Si_3N_4) se može iskoristiti za zaštitu delova površine silicijuma od oksidacije, jer silicijum nitrid predstavlja veoma efikasnu barijeru za difuziju molekula kiseonika i vode. Sl. 2.15 ilustruje niz procesnih koraka koji se koriste za lokalnu oksidaciju površine silicijuma da bi se formirao oksid u polju (field oxide). Najpre se deponuje sloj silicijum nitrida na površinu silicijuma i fotolitografskim postupkom izvrši njegovo ukrajanje (patterning) da bi se u njemu načinili otvori u oblastima koje će biti oksidisane (Sl. 2.15a). Obično se veoma tanak baferski sloj silicijum dioksida stavlja između silicijum nitrida i površine silicijuma (nije pokazan na slici).

Nakon toga, vrši se termička oksidacija da bi se formirao oksid u polju određene debljine, kao što je ilustrovano na Sl. 2.15b. Ova slika takodje ilustruje i činjenicu da približno polovina formiranog oksida narasta na račun silicijuma, dok se druga polovina izdiže iznad početne površine. Ovo je zbog toga što se atomi silicijuma koriste da bi se formirao oksid (troši se silicijum) a atomi kiseonika se ugrađuju u sloj oksida (oksid raste iznad početne površine silicijuma). Precizan odnos između dubine upotrebljenog silicijuma i ukupne debljine oksida je 0.46. Ovo je korisna karakteristika jer debeo izolacioni oksid u polju može biti formiran bez potrebe da imamo velike stepenike između oksida i silicijuma koje je veoma teško pouzdano prekriti tankim metalnim slojem. Pored toga, dešava se i neka lateralna oksidacija, koja izgledjuje stepenice, čineći ih lakšim za prekrivanje metalnim filmom koji se koristi za kontakte i veze.

Kada naraste oksid u polju, silicijum nitrid se uklanja. Da bi se formirala struktura MOS kondenzatora sa Sl. 2.12, u silicijumu se formira oblast P^+ (korišćenjem odgovarajućih fotolitografskih i difuzionih procesa), a površina se temeljno čisti (Sl. 2.15c) da bi se pripremila za termičku oksidaciju kojom će se formirati tanak oksid gejta (Sl. 2.15d). Završni korak bio bi formiranje otvora u oksidu za kontakte, depozicija metala, i oblikovanje (patterning) odgovarajućim fotolitografskim procesima da bi se dobila struktura sa Sl. 2.12.

Proces termičke oksidacije ne može se koristiti da bi se dobio oksid gejta zadovoljavajućeg kvaliteta sa GaAs supstratima. Ovo je zbog toga što kvalitet prirodnog oksida GaAs nije dovoljno dobar da bi se koristio kao dielektrik gejta. S druge strane, depozicija silicijum dioksida na GaAs supstrat formira veliku gustinu površinskih stanja. Ove činjenice su praktično sprečile korišćenje MOS kondenzatora sa GaAs supstratom.

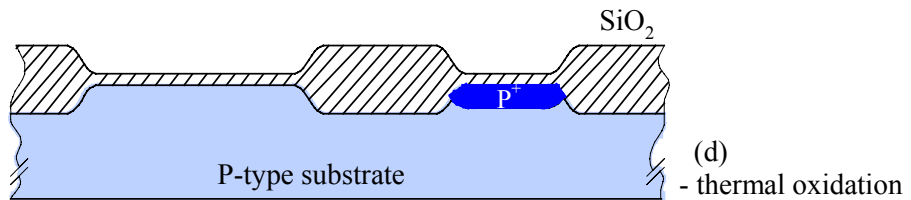
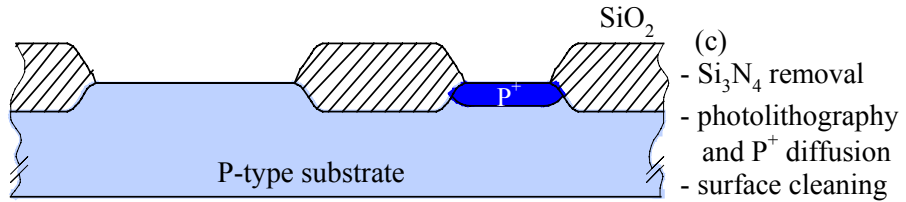
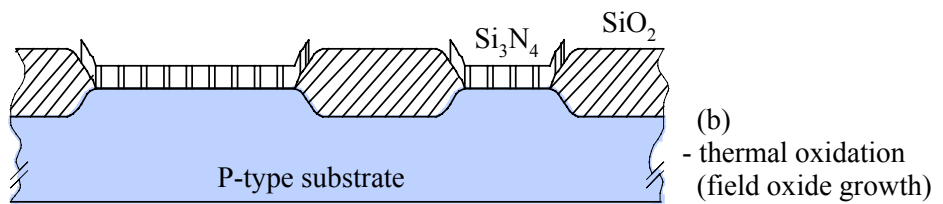
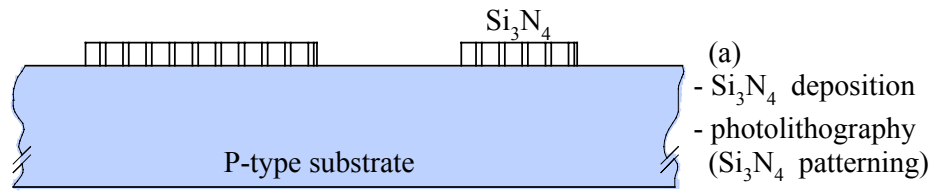
◆ Primer 2.5 Kinetika rasta oksida

Zavisnost debljine termičkog oksida (t_{ox}) od vremena oksidacije i temperature često je modelirana sledećom jednačinom

$$t_{ox}^2 + A \cdot t_{ox} = B \cdot (t + \tau)$$

odnosno

$$\frac{t_{ox}}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t + \tau}{A^2/4B}} - 1$$



Sl. 2.15 LOCOS (LOCAL Oxidation of Silicon) proces koji se koristi za formiranje oksida u polju (debeo oksid koji okružuje aktivne oblasti tankog oksida gejta)

gde su A, B i τ koeficijenti koji zavise od temperature. Vrednosti koeficijenata A, B i τ date su u tabelama 2.4 i 2.5, respektivno (*Izvor: L.E. Katz, "Oxidation" in VLSI Technology, S.M. Sze, ed., McGraw-Hill, New York, 1983, pp. 131-167*).

Koliko vremena je potrebno za narastanje $0.5 \mu\text{m}$ SiO_2 na temperaturi 920°C u vlažnoj atmosferi? Kolika bi bila debljina oksida ako se koristi suva oksidacija? Prokomentarisati razliku. Ponoviti gornja izračunavanja za slučaj temperature 1000°C i komentarisati rezultat.

Rešenje: Vreme oksidacije može biti izraženo iz modela datog u tekstu ovog primera kao

$$t = \frac{l}{B} \left(t_{ox}^2 + A \cdot t_{ox} \right) - \tau$$

Vrednosti parametara mogu se naći u tabeli 2.4 u vrsti koja odgovara $T=920^\circ\text{C}$. Izračunato vreme je $t=2.46\text{h}$. Ako se pri istoj temperaturi koristi proces suve oksidacije, odgovarajući parametri se mogu uzeti iz tabele 2.5 u koloni za $T=920^\circ\text{C}$. Zamenom ovih parametara i vremena $t=2.46\text{h}$ u jednačinu datu u tekstu ovog primera, dobija se da je izračunata debljina oksida $t_{ox}=0.063 \mu\text{m} = 63 \text{ nm}$. Oksid raste mnogo brže u vlažnom nego u suvom ambijentu.

Za slučaj $T=1000^\circ\text{C}$, vreme vlažne oksidacije potrebno za narastanje $0.5 \mu\text{m}$ oksida iznosiće $t=1.26\text{h}$. Isto vreme i temperatura korišćeni u procesu suve oksidacije dali bi oksid debljine $t_{ox}=78 \text{ nm}$. Kada se temperatura oksidacije poveća sa 920 na 1000°C , vreme potrebno za narastanje $0.5 \mu\text{m}$ "vlažnog" oksida se približno prepolovi. "Suv" oksid koji narasta za isto vreme je ponovo mnogo tanji, ali nešto deblji od onog koji narasta za dvostruko vreme pri 920°C .

Tabela 2.4 Konstante brzine rasta za vlažnu oksidaciju silicijuma				
Temperatura oksidacije ($^\circ\text{C}$)	A (μm)	Konstanta paraboličnog rasta B ($\mu\text{m}^2/\text{h}$)	Konstanta linearnog rasta B/A ($\mu\text{m}/\text{h}$)	τ (h)
1200	0.05	0.720	14.40	0
1100	0.11	0.510	4.64	0
1000	0.226	0.287	1.27	0
920	0.50	0.203	0.406	0

Tabela 2.5 Konstante brzine rasta za suvu oksidaciju silicijuma				
Temperatura oksidacije ($^\circ\text{C}$)	A (μm)	Konstanta paraboličnog rasta B ($\mu\text{m}^2/\text{h}$)	Konstanta linearnog rasta B/A ($\mu\text{m}/\text{h}$)	τ (h)
1200	0.040	0.045	1.12	0.027
1100	0.090	0.027	0.30	0.076
1000	0.165	0.0117	0.071	0.37
920	0.235	0.0049	0.0208	1.40
800	0.370	0.0011	0.0030	9.0
700	-	-	0.00026	81.0

2.5.3 Nulta polarizacija i ravne zone: Definicije osnovnih pojmova koji se odnose na MOS strukturu

Sl. 2.16a ilustruje MOS kondenzator na supstratu P-tipa sa polisilicijumskim gejtom N⁺ tipa gde su sva naelektrisanja kompenzovana, tako da se na oblogama kondenzatora ne pojavljuje naelektrisanje. Šupljine u supstratu P-tipa kompenzovane su negativnim akceptorskim jonima i manjinskim nosiocima - elektronima, dok su elektroni u gejtu N⁺ tipa kompenzovani pozitivnim donorskim jonima i manjinskim šupljinama. Može se desiti da se takav slučaj pojavi kada na kondenzator nije primenjen nikakav napon, međjutim, ispitivanje dijagrama energetske zone pokazaće da se ne radi o takvom slučaju.

Da bi se konstruisao dijagram energetske zone MOS kondenzatora, potrebno je razviti proceduru koja se koristi za slučaj P-N spoja (Odeljak 2.2.3) da bi se uključilo postojanje oksida između oblasti P- i N⁺ tipa silicijuma:

1) Kao i ranije, Fermijev nivo se najpre crta (linija crta-tačka-crta na Sl. 2.16)

1.1 Ako je sistem u termičkoj ravnoteži (primenjeni napon jednak je nuli), Fermijev nivo u sistemu je konstantan. Linije Fermijevih nivoa u supstratu i gejtu treba da budu izjednačene, kao na Sl. 2.16b.

1.2 Ukoliko je između gejta i supstrata primenjen napon, linije Fermijevog nivoa (ili preciznije kvazi-Fermijevih nivoa) treba da budu razmaknute da bi izrazile tu činjenicu, kao na Sl. 2.16d.

2) U slučaju P-N spoja, provodna i valentna zona se crtaju za neutralne oblasti P i N-tipa (daleko od međjupovršine oksid-silicijum). Zone se postavljaju na odgovarajućem rastojanju u odnosu na Fermijev nivo, tako da predstavljaju dijagrame zona P-tipa i N-tipa silicijuma, respektivno. Ovo je ilustrovano na Sl. 2.16b.

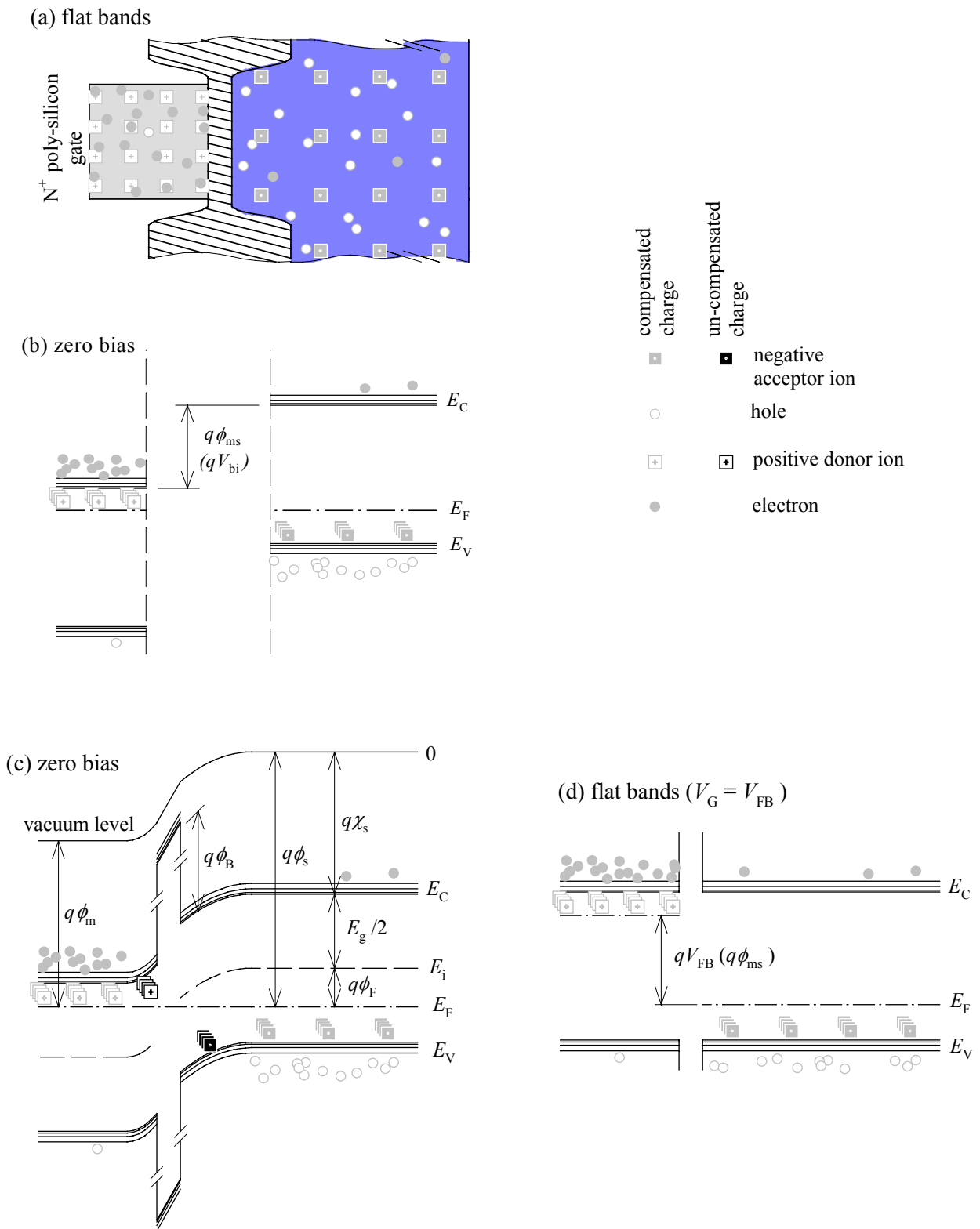
3) U slučaju P-N spoja, nivoi provodne i valentne zone bi se jednostavno povezali zakrivljenim linijama da bi se kompletirao dijagram. Oksid koji se pojavljuje između oblasti P i N⁺ tipa u slučaju MOS kondenzatora ima mnogo veću širinu zabranjene zone ($E_g = E_c - E_v$) nego u oblasti silicijuma. Slika 2.14b ilustruje postojanje diskontinuiteta u provodnoj zoni i valentnoj zoni na međjupovršini oksid-silicijum. Ovi diskontinuiteti treba da budu izraženi i na dijagramu zona. Dijagram zona oko oksida konstruisan je na sledeći način (prati Sl. 2.16c):

3.1 Zone su iskrivljene u oblastima P i N⁺ tipa silicijuma jedne prema drugima, ali one ne dosežu do istog nivoa. Postoji razlika između zona (recimo i između nivoa sredine zabranjene zone E_i) na međjupovršini N⁺-gejt-oksid i međjupovršini oksid-supstrat P-tipa. Ova razlika izražava pad napona u oksidu.

3.2 Zatim se crtaju linije koje izražavaju diskontinuitete provodne i valentne zone na međjupovršini oksid-silicijum. Diskontinuitet provodne zone je $q\phi_b = 3.2$ eV, a diskontinuitet valentne zone je oko 4.7 eV (ovo čini širinu zabranjene zone oksida oko $3.2 + 4.7 + 1.2 \approx 9$ eV).

3.3 Provodna i valentna zona u oksidu se crtaju pravim linijama, da bi se ukazalo postojanje konstantnog električnog polja u oksidu¹. Ovde se pretpostavlja da u zapremini oksida nema ugrađenog naelektrisanja koje bi izazvalo promenu električnog polja u oksidu (naelektrisanje u oksidu se modelira kao sloj naelektrisanja koji se pojavljuje uz međjupovršinu oksid-silicijum)

¹ Konstantno električno polje E odgovara linearnoj promeni električnog potencijala, pa prema tome i potencijalne energije ($E = -d\phi/dx \propto dE_{pot}/dx$)



Sl. 2.16 Ilustracija osnovnih pojmova koji se odnose na MOS strukturu: (a) poprečni presek MOS kondenzatora koji islustruje postojanje različitih vrsta naelektrisanja, (b) polazna tačka u konstrukciji dijagrama energetskih zona MOS strukture, (c) dijagram energetskih zona pri nultoj polarizaciji, i (d) dijagram energetskih zona u uslovima ravnih zona

Sl. 2.16b i c ilustruju postojanje potencijalne razlike izmedju gejta N^+ tipa i supstrata P-tipa pri nultoj polarizaciji. Ovo je analogno potencijalnoj razlici koja se sreće kod P-N spoja. Iako se ova potencijalna razlika u slučaju P-N spoja naziva ugradjeni napon (V_{bi}), u slučaju MOS kondenzatora ona se naziva *razlika izlaznih radova* $q\phi_{ms}$ (work-function difference). Ova potencijalna razlika se odnosi na postojanje električnog polja u oksidu i oko medjupovršina, što dalje znači da mora postojati izvesno nekompenzovano naelektrisanje na oblogama kondenzatora koje je u vezi sa ovim poljem (izvor i ponor polja). Sl. 2.16c ilustruje da je ovo naelektrisanje usled nekompenzovanih negativnih akceptorskih jona na strani supstrata P-tipa, i usled nekompenzovanih pozitivnih donorskih jona na strani gejta N^+ tipa. Količina ovog naelektrisanja je očigledno u vezi sa jačinom električnog polja, i dalje sa vrednošću razlike izlaznih radova. Prema tome, razlika izlaznih radova je važan parametar MOS kondenzatora.

Izlazni rad se prvobitno definisao kod metala, i njegovo fizičko značenje je najbolje objašnjeno u slučaju metala. U metalima ne postoji zabranjena zona i elektroni su na energetsom nivou oko Fermijevog nivoa.

Izlazni rad je energija (rad) koji je potreban za uklanjanje jednog prosečnog elektrona (elektrona na Fermijevom nivou) iz metala. Prema tome, izlazni rad izražava poziciju Fermijevog nivoa u odnosu na energiju slobodnog elektrona u vakuumu (vakuumski nivo).

Kada se radi o poluprovodnicima, mora se koristiti ista definicija izlaznog rada, bez obzira na činjenicu što često nema elektrona ni na Fermijevom nivou ni oko njega. Izlazni radovi za različite metale su poznati i neki od njih su dati u Tabeli 2.6. U slučaju poluprovodnika, izlazni rad zavisi od tipa i nivoa dopiranosti, jer se položaj Fermijevog nivoa menja sa dopiranjem. Medjutim, dopiranje ne utiče na poziciju energetskih zona u odnosu na vakuumski nivo

Tabela 2.6 Izlazni radovi i afiniteti elektrona najčešće korišćenih materijala na 300 K		
Materijal	Izlazni rad $q\phi_m$ (eV)	Afinitet elektrona $q\chi_s$ (eV)
Al	4.1	
Pt	5.7	
PtSi	5.4	
W	4.6	
WSi ₂	4.7	
Si		4.05
GaAs		4.07
Ge		4.0
SiO ₂		1
N ⁺ Si	4.05	4.05
P ⁺ Si	5.17	4.05

Položaj dna provodne zone u odnosu na vakuumski nivo se naziva **afinitet elektrona**, koji se označava sa $q\chi_s$. Afinitet elektrona jednak je energiji potrebnoj da ukloni slobodan elektron sa nultom kinetičkom energijom (elektron na dnu provodne zone) iz poluprovodnika.

Afiniteti elektrona nekih važnih materijala takodje su dati u Tabeli 2.6

Razmatrajući dijagram energetske zone, kao što je pokazano na Sl. 2.16c, izlazni rad poluprovodnika ($q\phi_s$) može se povezati sa afinitetom elektrona $q\chi_s$:

$$q\phi_s = q\chi + \frac{E_g}{2} + q\phi_F \quad (2.62)$$

gde je $E_g/2$ polovina širine zabranjene zone, a $q\phi_F$ je razlika između sredine zabranjene zone (sopstvenog nivoa) E_i i Fermijevog nivoa E_F .

ϕ_F se naziva **Fermijev potencijal**. On se direktno odnosi na razliku između sredine zabranjene zone i Fermijevog nivoa ($q\phi_F = E_i - E_F$). Fermijev potencijal je važan parametar poluprovodnika kojim se izražava tip i nivo dopiranosti.

Fermijev potencijal jednak je nuli u sopstvenim poluprovodnicima jer je $E_F = E_i$. Sa dopiranjem poluprovodnika, Fermijev nivo se udaljava od sredine zabranjene zone, povećavajući vrednost Fermijevog potencijala. Ovo će biti pokazano u Primeru 2.6 da je Fermijev nivo povezan sa nivoom dopiranosti na sledeći način:

$$\phi_F = \begin{cases} + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} & \text{za } P - \text{tip} \\ - \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} & \text{za } N - \text{tip} \end{cases} \quad (2.63)$$

gde su N_A i N_D koncentracije akceptora i donora, respektivno, a n_i je koncentracija sopstvenih nosilaca ($n_i = 1.02 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ za silicijum na 300K).

Korišćenjem jednačine (2.62) razlika izlaznih radova se može izraziti kao

$$q\phi_{ms} = q\phi_m - q\phi_s = q\phi_m - q \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} + \phi_F \right) \quad (2.64)$$

Da bi se izračunala razlika izlaznih radova, Fermijev potencijal se najpre izračuna za dati nivo dopiranosti (korišćenjem jednačine 2.63) i prema jednačini (2.64) kombinuje se sa vrednostima $q\chi_s$, E_g i $q\phi_m$ koje odgovaraju korišćenim materijalima (Tabela 2.6). U slučaju metalnog gejta, vrednost $q\phi_{ms}$ se direktno dobija. Kada se koriste silicijumski gejtovi, može se desiti da je neophodno izračunati $q\phi_m$ iz jednačine (2.62) korišćenjem odgovarajućeg nivoa dopiranja. Medjutim, veoma često polisilicijumski gejtovi su veoma jako dopirani (da bi se obezbedila što je moguće veća bliskost karakteristikama metala u pogledu električne provodnosti), što znači da će Fermijev nivo biti veoma blizu dnu provodne zone (N^+ tip gejta), ili veoma blizu vrhu valentne zone (P^+ tip gejta). Prema tome, kao što je dato u Tabeli 2.6, izlazni rad jako dopiranih polisilicijumskih gejtova može biti približno jednak $q\chi_s$ u slučaju N^+ dopiranja, ili $q\chi_s + E_g$ u slučaju P^+ dopiranja.

Nije uvek pogodno uzeti uslov nulte polarizacije, koju smo do sada razmatrali, kao referentnu tačku pri razmatranju zavisnosti kapacitivnosti od napona kod MOS kondenzatora. Ovo je usled postojanja razlike u izlaznim radovima koja formira ugrađeno električno polje i nekompenzovana naelektrisanja. Ploče kondenzatora dakle nisu razelektrisane pri nultoj polarizaciji. Da bi se postigao uslov da naelektrisanje na oblogama kondenzatora bude nula, električno polje u oksidu i oko međupovršine oksid-silicijum treba da bude jednako nuli. Nulto električno polje znači da nema promena u električnom potencijalu ($E = -d\phi/dx \propto dE_{pot}/dx$), drugim rečima da su **zone ravne**. Da bismo ispravili zone, neophodno je podeliti Fermijeve nivoe u gejtu i supstratu za iznos koji bi kompenzovao razliku izlaznih radova, kao što je ilustrovano na Sl. 2.16d. Fermijevi nivoi su podeljeni primenom napona između gejta i supstrata.

Napon između gejta i supstrata, potreban da se isprave energetske zone naziva se **napon ravnih zona** V_{FB} (flat-band voltage).

Sa Sl. 2.16d je napon ravnih zona jednak $V_{FB} = \phi_{ms}$. Međutim, važno je naglasiti da mogući efekti naelektrisanja u oksidu nisu prikazani na Sl. 2.16d. Kao što je opisano u prethodnim odeljcima, postoji naelektrisanje u oksidu koje je tipično locirano blizu međupovršine oksid-silicijum. Naelektrisanje koje se pojavljuje blizu međupovršine gejt-oksida ne utiče značajno na karakteristike MOS kondenzatora, jer je ono lako kompenzovano naelektrisanjem iz jako dopiranog silicijumskog gejta. Međutim, sloj naelektrisanja koji se pojavljuje blizu međupovršine oksid-silicijumski supstrat, utiče svojim električnim poljem na pokretne nosioce u supstratu. Električno polje ovog naelektrisanja u oksidu je sposobno da proizvede značajno krivljenje energetskih zona u površinskoj oblasti silicijumskog supstrata. Da bi se zone ispravile, ovo električno polje takodje mora biti kompenzovano odgovarajućim naponom na gejt. Drugim rečima, neophodno je primeniti napon na gejt da ukloni svako naelektrisanje koje je na površinu silicijumskog supstrata privučeno ovim naelektrisanjem u oksidu. Ako je kapacitivnost oksida gejta C_{ox} , a gustina naelektrisanja u oksidu qN_{oc} , potreban napon je qN_{oc}/C_{ox} . U slučaju pozitivnog naelektrisanja u oksidu, potreban je negativan napon (jer bi on potisnuo elektrone koji su na površinu privučeni pozitivnim naelektrisanjem u oksidu), i analogno tome, u slučaju negativnog naelektrisanja u oksidu, potreban je pozitivan napon na gejt.

◆ Primer 2.6 Fermijev potencijal (ϕ_F)

Izraziti Fermijev potencijal $\phi_F = (E_i - E_F)/q$ u funkciji koncentracije primesa N_A (N_D) i koncentracije sopstvenih nosilaca n_i .

Rešenje: Razmatrajmo slučaj silicijuma P-tipa. Jednačina (1.67) povezuje Fermijev nivo E_F sa koncentracijom primesa N_A . Iz jednačine (1.67), dobija se

$$E_V - E_F = kT \ln \frac{N_A}{N_V}$$

Da bi eliminisali E_V , a uveli E_i , treba zapaziti da je $E_i - E_V = E_g/2$, gde je $E_g/2$ polovina vrednosti širine zabranjene zone. Širina zabranjene zone povezana je sa koncentracijom sopstvenih nosilaca n_i [jednačina (1.69)], što znači da $E_i - E_V$ može biti izraženo, kao što se traži, preko n_i . Pretpostavljajući da je $N_C \approx N_V$ u jednačini (1.69), za $E_i - E_V$ se dobija

$$E_i - E_V = \frac{E_g}{2} = kT \ln \frac{N_V}{n_i}$$

Sabiranjem poslednje dve dobijene jednačine obezbedjuje se jednačina za $E_i - E_F$:

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Konačno, Fermijev potencijal se izražava kao

$$\phi_F = \frac{E_i - E_F}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Slična procedura može biti primenjena i u izvodjenju Fermijevog potencijala za slučaj silicijuma N-tipa. U tom slučaju linija sredine zabranjene zone E_i je ispod Fermijevog nivoa i Fermijev potencijal postaje negativan:

$$\phi_F = \frac{E_i - E_F}{q} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i}$$

Kombinujući efekte razlike izlaznih radova (ϕ_{ms}) i naelektrisanja u oksidu ($-qN_{oc}/C_{ox}$), napon ravnih zona se može izraziti kao

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{qN_{oc}}{C_{ox}} \quad (2.65)$$

Pošto se obloge kondenzatora razelektrišu (zone se isprave) kada je $V_G - V_{FB} = 0$, napon $V_G - V_{FB}$ biće nazvan *efektivni napon na gejtu*. Sledeća dva odeljka razmatraju uticaj različitih efektivnih napona na gejtu na kapacitivnost MOS strukture.

2.5.4 MOS kondenzator u akumulaciji, osiromašenju i slaboj inverziji

Stanje akumulacije

Razmotrimo najpre slučaj negativnog efektivnog napona, $V_G - V_{FB} < 0$. Negativni efektivni napon proizvešće električno polje koje će privući šupljine na površinu silicijumskog supstrata.

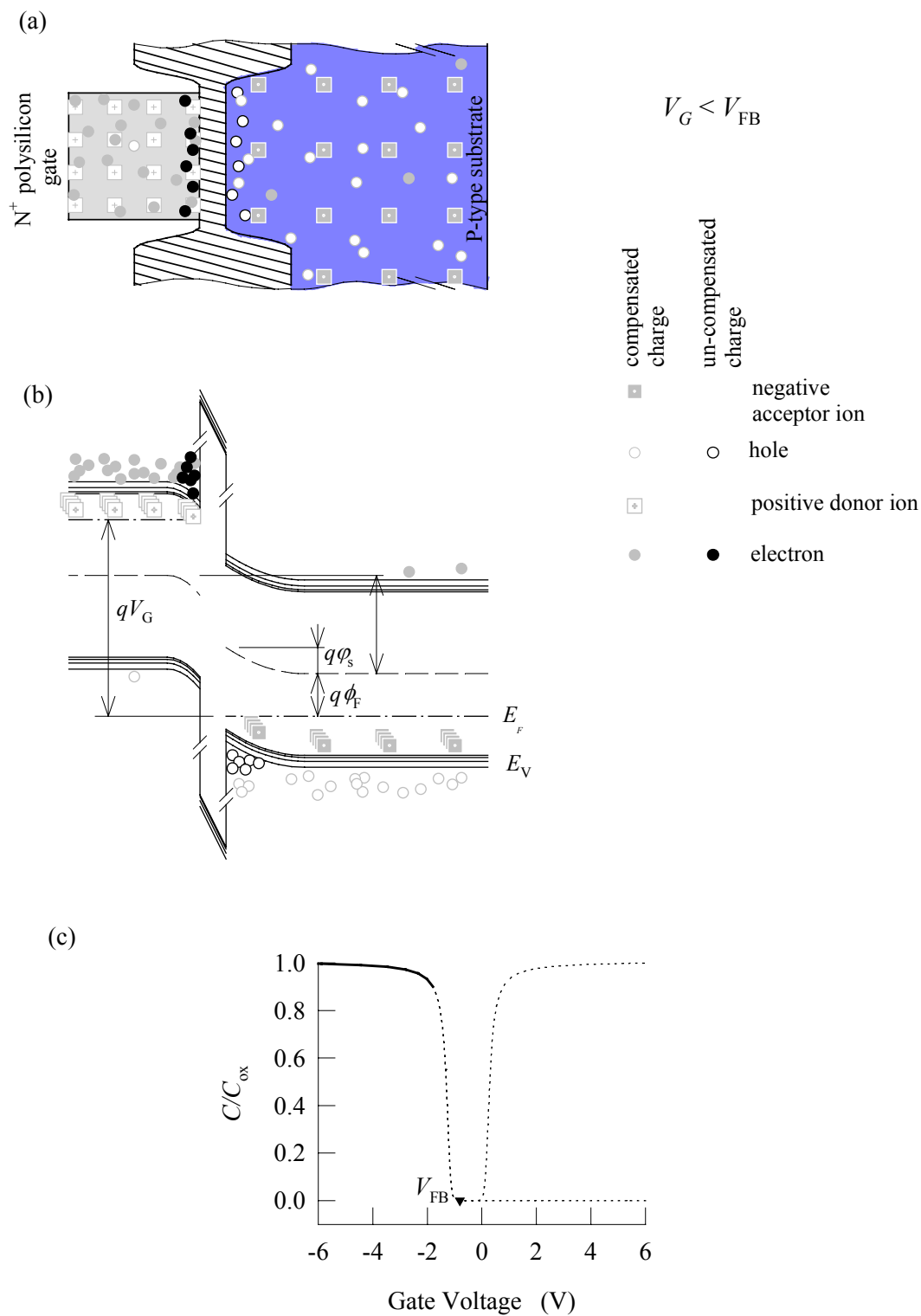
Uslov u kome napon na gejtu privlači većinske nosioce na površinu silicijumskog supstrata naziva se *stanje akumulacije*.

Gustina šupljina u površinskom sloju silicijumskog supstrata upravo je jednaka gustini elektrona na gejtu, indukovanih primenjenim negativnim naponom na gejtu. Ovo je ilustrovano na Sl. 2.17a. Pojava dodatnih šupljina u površinskoj oblasti silicijumskog supstrata znači da će Fermijev nivo u površinskoj oblasti biti bliži vrhu valentne zone, nego što je to u balku (u dubini poluprovodničkog supstrata). Prema tome, energetske zone se krive naviše idući od silicijumskog supstrata prema gejtu, kao što je pokazano na Sl. 2.17b. Ovo krivljenje zona je usled razlike između energetskih nivoa u balku silicijuma i gejtu, što se direktno odnosi na primenjeni efektivni napon ($qV_G - qV_{FB}$). Iznos krivljenja zona u silicijumskom supstratu, koji označavamo sa $q\phi_s$, veoma je važan sa stanovišta karakteristika MOS kondenzatora.

ϕ_s je **površinski potencijal** u odnosu na potencijal balka silicijumskog supstrata, koji se uzima kao referentni nivo.

Gradijent u energetskim zonama oko medjupovršine oksid-silicijum i u oksidu izražava postojanje električnog polja u smeru od supstrata prema gejtu ($E = -d\phi/dx \propto dE_{pot}/dx$). To je polje koje drži dodatne šupljine u supstratu i dodatne elektrone u gejtu blizu medjupovršine oksid-silicijum.

Bilo koja promena u naponu na gejtu ΔV_G neminovno će izazvati promenu u zakrivljenosti energetskih zona. Na primer, ako je napon smanjen za ΔV_G , krivljenje zona će se povećati, što znači da će se Fermijev nivo na površini silicijumskog supstrata pomeriti nešto bliže vrhu valentne zone. Prema tome, gustina šupljina duž medjupovršine oksid-silicijum će se povećati. Kada je Fermijev nivo veoma blizu vrhu valentne zone, samo neznatan pomeraj vrha valentne zone prema Fermijevom nivou (neznatno smanjenje površinskog potencijala) biće potreban da se značajno poveća gustina popunjenih energetskih nivoa u valentnoj zoni novim šupljinama. Ovo proističe iz činjenice da verovatnoća zauzetosti nivoa u valentnoj zoni šupljinama raste eksponencijalno kako se Fermijev nivo pomera prema valentnoj zoni (Sl. 1.27 u Odeljku 1.5.2). Pošto je promena površinskog potencijala mnogo manja od promene napona na gejtu ΔV_G , gotovo celokupna promena napona na gejtu pojavice se kao pad napona na oksidu. Ova situacija u mnogome podseća na slučaj kondenzatora sa metalnim elektrodama razdvojenim dielektrikom ekvivalentnom oksidu gejta.



Sl. 2.17 MOS kondenzator u stanju akumulacije: (a) poprečni presek koji ilustruje vrste naelektrisanja na oblogama kondenzatora, (b) dijagram energetske zone, i (c) C-V zavisnost

U stanju akumulacije, promena površinskog potencijala je neznatna u poredjenju sa promenama napona na gejtju, što znači da se znatan deo bilo koje promene napona na gejtju pojavljuje kroz oksid gejtja. Kapacitivnost po jedinici površine je, prema tome, jednaka

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (2.66)$$

Slika 2.17c ilustruje da kapacitivnost MOS kondenzatora u stanju akumulacije, budući da je jednaka kapacitivnosti oksida gejtja C_{ox} , ne zavisi od napona na gejtju.

Osiromašenje i slaba inverzija

Kada se na gejt primeni relativno mali pozitivni efektivni napon ($V_G - V_{FB} > 0$), električno polje izazvaće potiskivanje šupljina sa površine, formirajući osiromašeni sloj na površini silicijumskog supstrata. Naelektrisanje koje se pojavljuje na supstratskoj ploči kondenzatora u ovom slučaju je usled nekompenzovanih negativnih akceptorskih jona, kao što je ilustrovano na Sl. 2.18a i b. Iako su ovi joni nepokretni, promene napona na gejtju mogu izazvati odgovarajuće promene u gustini naelektrisanja negativnih jona. Da bi se ovo desilo, linije električnog polja koje polaze sa gejtja moraju da prođu kroz osiromašeni sloj i da dalje potisnu šupljine (porast u naponu na gejtju), ili da privuku šupljine nazad prema površini (smanjenje napona na gejtju).

U stanju osiromašenja, površinski potencijal ϕ_s blisko prati promene napona na gejtju. To znači da će se gotovo celokupni iznos neke promene napona na gejtju pojaviti kroz osiromašeni sloj na površini poluprovodnika.

Osiromašeni sloj se ponaša kao dielektrik koji je pridodat oksidu gejtja. Kapacitivnost koja je u vezi sa osiromašenim slojem potpuno je analogna kapacitivnosti osiromašenog sloja P-N spoja. U ovom slučaju kapacitivnost osiromašenog sloja C_d redno je vezana sa kapacitivnošću oksida C_{ox} , što znači da je ukupna kapacitivnost MOS strukture data kao:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \quad (2.67)$$

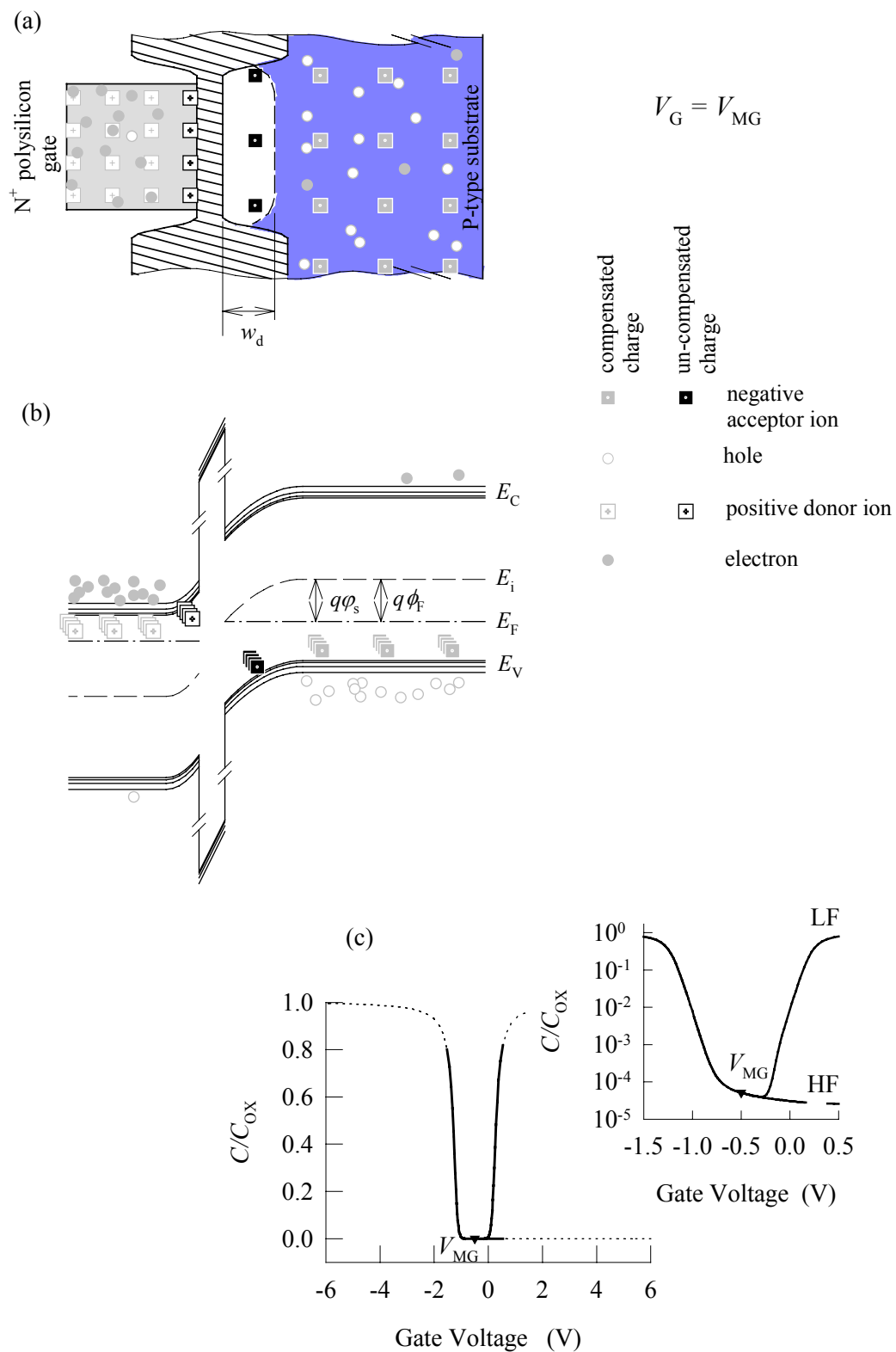
Kapacitivnost osiromašenog sloja zavisi od primenjenog napona na gejtju - veći naponi na gejtju stvaraju širu osiromašenu oblast, što znači da je kapacitivnost manja. Kao posledica toga, ukupna kapacitivnost se smanjuje kada se napon na gejtju povećava. Ovaj režim rada MOS kondenzatora naziva se *stanje osiromašenja*.

Slika 2.18c ilustruje smanjenje kapacitivnosti u režimu osiromašenja, međjutim, ona takodje ilustruje da se ponašanje kondenzatora menja kada se napon dalje povećava. Postoji karakteristična tačka koja može biti objašnjena korišćenjem dijagrama energetske zone sa Sl. 2.18b. Porast napona na gejtju iznad napona ravnih zona dovodi do krivljenja energetske zone u smeru koji povećava razliku između vrha valentne zone i Fermijevog nivoa. Ovo je uslov koji je povezan sa smanjenjem (i eventualno eliminacijom) šupljina sa površine. Kao posledica ovog krivljenja energetske zone, linija sredine zabranjene zone (mid-gap) E_i približava se Fermijevom nivou. Pomenuta karakteristična tačka je ona kada se linija sredine zabranjene zone poklopi sa Fermijevim nivoom na površini silicijuma (ova situacija ilustrovana je na Sl. 2.18b). U ovoj tački, označenoj sa V_{MG} , površina silicijumskog supstrata je u uslovima intrinzičnog (sopstvenog) poluprovodnika. Kada je krivljenje zona veće od ove vrednosti (usled napona na gejtju većeg od vrednosti V_{MG}), linija sredine zabranjene zone E_i preseca Fermijev nivo u nekoj tački, čineći da je Fermijev nivo bliži dnu provodne zone nego vrhu valentne zone. To znači da će koncentracija elektrona (manjinskih nosilaca u supstratu P-tipa) biti veća od koncentracije šupljina na površini silicijuma - na površini se formirao *inverzni sloj*.

Pojava izvesnog pokretnog naelektrisanja na površini silicijuma znači da neke od linija električnog polja neće morati da prođu kroz osiromašeni sloj da bi promenile naelektrisanje kao odgovor na varijacije napona na gejtju. Kapacitivnost raste pošto je povećana gustina pokretnog naelektrisanja (elektrona u ovom slučaju) povećanjem napona na gejtju. Ovo stanje se naziva *slaba inverzija*.

Veoma je važno napomenuti, međjutim, da su elektroni u inverznom sloju (manjinski nosioci u silicijumu P-tipa) nastali procesom termičke generacije parova elektron-šupljina. Pošto je termička

generacija veoma spor proces, elektroni nisu u stanju da prate brze promene napona na gejtu. Opisani porast kapacitivnosti ne može biti zapažen kada je frekvencija signala na gejtu veća od 100 Hz. Slika 2.18c prikazuje da visokofrekventna kapacitivnost ostaje niska u stanju slabe inverzije, što je uslovljeno najvećom mogućom širinom osiromašenog sloja.



Sl. 2.18 MOS kondenzator u tački midgapa: (a) poprečni presek koji ilustruje vrste naelektrisanja na oblogama kondenzatora, (b) dijagram energetske zone, i (c) C-V zavisnost

2.5.5 MOS kondenzator u jakoj inverziji: Napon praga

Ponašanje MOS kondenzatora u tzv. *stanju jake inverzije* je od velike važnosti u pogledu rada MOSFET tranzistora. Da bismo razumeli razliku između slabe i jake inverzije, neophodno je setiti se činjenice da rep Fermi-Dirakove funkcije raspodele pokazuje eksponencijalni porast verovatnoće pojavljivanja elektrona na nivoima u provodnoj zoni kako se razlika između dna provodne zone E_C i Fermijevog nivoa E_F smanjuje². Takođe je korisno imati na umu da je svaki porast napona na gejtju (ΔV_G) povezan sa odgovarajućim porastom gustine elektrona u inverznom sloju (ΔQ_I).

Kada Fermijev nivo E_F nije suviše blizu dnu provodne zone (stanje slabe inverzije), verovatnoća zauzetosti nivoa u provodnoj zoni elektronima je veoma mala. To znači da porast gustine elektrona ΔQ_I , neophodan kao odgovor na promenu napona na gejtju ΔV_G , može biti postignut jedino značajnim krivljenjem energetske zone da bi se smanjila razlika između E_C i E_F . Povećanom krivljenju energetske zone odgovara i određeni porast površinskog potencijala ϕ_S . Značajan deo povećanog pada napona između gejtja i supstrata pojavljuje se između površine silicijuma i balka (unutrašnjosti supstrata), tj. kao porast površinskog potencijala $\Delta\phi_S$.

Kada se razlika $E_C - E_F$ smanji, verovatnoća zauzetosti nivoa elektronima u provodnoj zoni eksponencijalno raste. To znači da značajan porast naelektrisanja ΔQ_I sada može biti postignut samo neznatnim smanjenjem razlike $E_C - E_F$. Odgovarajuća neznatna promena u površinskom potencijalu $\Delta\phi_S$ je mnogo manja od promene napona na gejtju ΔV_G , što znači da se povećan pad napona na gejtju (ΔV_G) pojavljuje uglavnom na oksidu gejtja.

U *stanju jake inverzije*, promene napona na gejtju ne stvaraju značajne promene površinskog potencijala. Kaže se da se površinski potencijal ϕ_S zamrzao na vrednost koja je, radi pogodnosti, pretpostavljena da iznosi $2\phi_F$. Prema tome, u stanju jake inverzije je

$$\phi_S \approx 2\phi_F \quad (2.68)$$

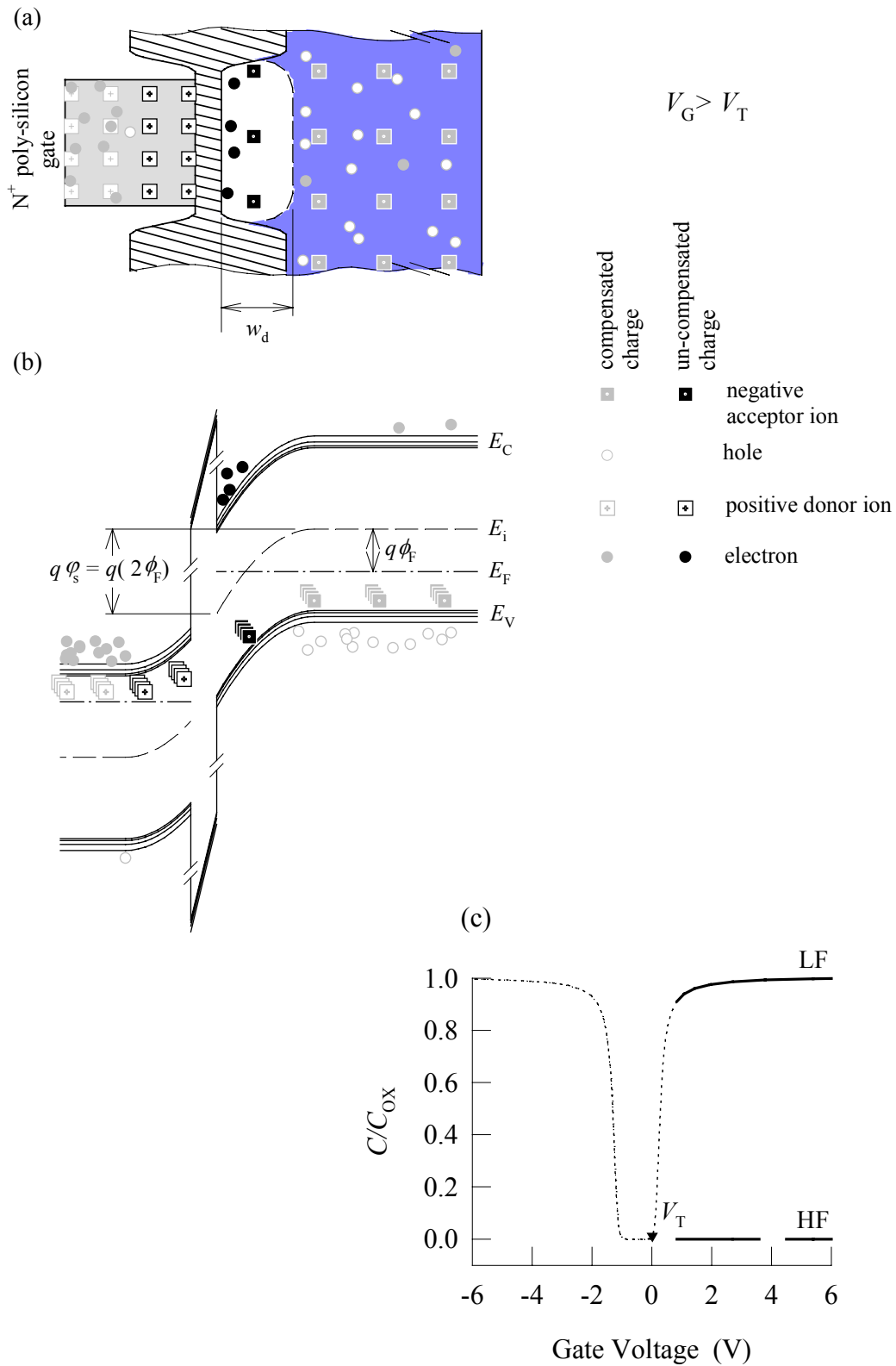
Napon na gejtju potreban da stvori površinski potencijal $2\phi_F$ naziva se **napon praga** V_T .

Slika 2.19a i b ilustruje pojavu elektrona na površini silicijuma kao odgovor na porast napona na gejtju iznad napona praga. Situacija u kojoj varijacije primenjenog napona stvaraju odgovarajuće varijacije naelektrisanja lociranog uz međupovršinu sa oksidom slična je situaciji kod običnog kondenzatora sa metalnim elektrodama i sa dielektrikom ekvivalentnim oksidu gejtja. Ukupna kapacitivnost MOS strukture jednaka je kapacitivnosti oksida gejtja i prema tome ne zavisi od napona. Ovo je ilustrovano na Sl. 2.19c i punom linijom označeno kao LF (low frequency). Važno je napomenuti da je ovaj zaključak ispravan sve dok varijacije gustine elektrona na površini silicijuma (u inverznom sloju) prate varijacije napona na gejtju. Pri visokim frekvencijama signala na gejtju ovo ne mora biti slučaj. Iako ova rezerva nije od velike važnosti kada se inverzni sloj snabdeva elektronima iz susednih oblasti N^+ tipa (slučaj MOSFET-a opisan u Poglavlju 5), od suštinske je važnosti za MOS kondenzatore kod kojih je izvor elektrona termička generacija. Kao što je pomenuto, proces termičke generacije je veoma spor, tako da pri frekvencijama od oko 100 Hz varijacije gustine elektrona ne mogu da prate varijacije signala. Pri visokim frekvencijama, elektroni u inverznom sloju ne utiču na kapacitivnost pošto ne odgovaraju na varijacije napona na gejtju. Slika 2.19c pokazuje da visokofrekventna kapacitivnost ostaje niska i u stanju jake inverzije, što je određeno najvećom postignutom širinom osiromašenog sloja.

Početak stanja jake inverzije definisan je vrednošću napona praga. Prema tome, napon praga postaje ekstremno važan parametar i zahteva detaljno razmatranje. Za početak, treba naglasiti da prelaz

² Fermi-Dirakova funkcija raspodele i zauzetost energetske zone razmatrani su u Odeljku 1.5.2 uključujući Sl. 1.27

od značajne promene površinskog potencijala, karakterističan za stanje slabe inverzije, na bezznačajnu promenu površinskog potencijala iznad napona praga nije idealno strm. Ovo zapažanje je važno da se ne bi mistifikovali značenje i uloga napona praga, da bi se jasno pokazale aproksimacije koje se uvode u koncept napona praga.



Sl. 2.19 MOS kondenzator u jakoj inverziji: (a) poprečni presek koji ilustruje vrste naelektrisanja na oblogama kondenzatora, (b) dijagram energetske zone i (c) niskofrekventna (LF) i visokofrekventna (HF) C-V kriva

Koncept napona praga se koristi da bi se iskoristile sledeće aproksimacije:

- Naelektrisanje u inverznom sloju zanemarljivo je kada je $V_G \leq V_T$. Jednino nekompenzovano naelektrisanje u silicijumskom supstratu potiče od primesnih jona u osiromašenom sloju (Q_d).
- Površinski potencijal ϕ_s , i prema tome gustina naelektrisanja osiromašenog sloja Q_d , su konstantni za $V_G > V_T$. Ukupan porast napona na gejtju iznad napona praga ($V_G - V_T$) troši se na formiranje naelektrisanja u inverznom sloju Q_I :

$$Q_I = (V_G - V_T) \cdot C_{ox} \quad (2.69)$$

Napon praga se može izraziti i preko već uvedenih parametara MOS kondenzatora: kapacitivnosti oksida gejta C_{ox} , napona ravnih zona V_{FB} , Fermijeovog potencijala ϕ_F i koncentracije primesa u supstratu N_A . Ovo se može učiniti izvodjenjem jednačine koja povezuje pad napona na oksidu (V_{ox}) sa naelektrisanjem na oblozi kondenzatora koju čini silicijumski supstrat (Q_d+Q_I):

$$V_{ox} C_{ox} = Q_d + Q_I \quad (2.70)$$

Napomenimo da su gustine naelektrisanja Q_d i Q_I izražene u C/m^2 , a kapacitivnost oksida u F/m^2 da bi se dobio napon u V . Pad napona na oksidu V_{ox} dat je kao razlika između efektivnog napona na gejtju $V_G - V_{FB}$ na jednoj strani oksida i površinskog potencijala ϕ_s na drugoj strani oksida. Efektivni napon na gejtju se mora koristiti da bi na pravi način izrazio činjenicu da je $V_{ox}=0$ (i prema tome i $Q_d=Q_I=0$) u uslovima ravnih zona (Sl. 2.16d) kada je $V_G - V_{FB}=0$ i $\phi_s=0$. Prema tome,

$$[(V_G - V_{FB}) - \phi_s] \cdot C_{ox} = Q_d + Q_I \quad (2.71)$$

Na početku jake inverzije, napon na gejtju jednak je naponu praga ($V_G=V_T$), površinski potencijal je $\phi_s=2\phi_F$, (Jednačina 2.68), a naelektrisanje u inverznom sloju je $Q_I=0$. Primenom ovih uslova u jednačinu (2.71), napon praga se dobija kao

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{Q_d}{C_{ox}} \quad (2.72)$$

Ovaj oblik jednačine za napon praga uvodi gustinu naelektrisanja osiromašenog sloja Q_d , koje može biti izraženo preko površinskog potencijala $2\phi_F$ i koncentracije primesa N_A . Pošto svaki akceptorski jon u osiromašenom sloju (koji se pojavljuje kao nekompenzovani naelektrisani centar) nosi jedinično negativno naelektrisanje, qN_A će izražavati naelektrisanje u osiromašenom sloju u C/m^3 . Da bi izrazili gustinu naelektrisanja u osiromašenom sloju (u C/m^2), qN_A treba pomnožiti širinom osiromašenog sloja w_d :

$$Q_d = qN_A \cdot w_d \quad (2.73)$$

Širina osiromašenog sloja w_d može se dobiti rešavanjem Poisson-ove jednačine, kao što je učinjeno u slučaju strmog P-N spoja. Osiromašeni sloj se u tom slučaju pojavljuje samo u supstratu P-tipa, što je analogno situaciji za $N_D \gg N_A$ u slučaju strmog P-N spoja. Prema tome, rešavanje Poisson-ove jednačine za ovaj slučaj dovelo bi do jednačine koja je slična jednačini (2.33). Jedina razlika je što se umesto graničnih uslova 0 i $V_{bi}+V_R$ u jednačini (2.33) koji se koriste u slučaju P-N spoja, sada u ovom slučaju pojavljuju granični uslovi 0 i $2\phi_F$. Zamenom $V_{bi}+V_R$ u jednačini (2.33) sa $2\phi_F$, za širinu osiromašenog sloja na površini silicijuma dobija se

$$w_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{si}(2\phi_F)}{qN_A}} \quad (2.74)$$

Kombinujući jednačine (2.72)-(2.74) napon praga se sada može izraziti u sledećem obliku

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{si}qN_A}}{C_{ox}} \sqrt{2\phi_F} \quad (2.75)$$

Konačno, napomenimo da se parametar γ , koji se naziva *faktor tela* (body factor), često definiše kao

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{si}qN_A}}{C_{ox}} \quad (2.76)$$

da bi se pojednostavio izraz za napon praga do sledećeg konačnog oblika

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \gamma \cdot \sqrt{2\phi_F} \quad (2.77)$$

U slučaju kondenzatora realizovanog na silicijumskom supstratu N-tipa, naelektrisanje osiromašenog sloja biće pozitivno, jer potiče od nekompenzovanih donorskih jona (koncentracije N_D). Da bi se indukovalo ovo naelektrisanje, potreban je negativan napon na gejtu, što znači da član $Q_d / C_{ox} = qN_D w_d / C_{ox}$ treba da se pojavi sa znakom minus u izrazu za napon praga. Pored toga, Fermijev potencijal (kao što je dato jednačinom 2.63) postaje negativan. U jednačini za širinu osiromašenog sloja (jednačina 2.74) on se ne može koristiti kao negativan. Pažljivo razmatranje graničnih uslova za električni potencijal u postupku rešavanja Poisson-ove jednačine ukazaće da je jedina stvar koja je od značaja za w_d apsolutna vrednost $2\phi_F$. Ova razmatranja ukazuju da se napon praga u slučaju silicijumskog supstrata N-tipa mora modifikovati na sledeći način:

$$V_T = V_{FB} - |2\phi_F| - \gamma \cdot \sqrt{2|\phi_F|} \quad (\text{N-tip supstrata}) \quad (2.78)$$

gde je faktor tela γ dat preko koncentracije donora

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{si}qN_D}}{C_{ox}} \quad (2.79)$$

Jedinica za faktor tela je $V^{1/2}$. Ovaj parametar, kao i cela jednačina za napon praga, biće široko korišćeni i dalje diskutovani u Poglavlju 5.

◆ Primer 2.7 Izračunavanje napona praga

Tehnološki parametri MOS kondenzatora dati su u Tabeli 2.7 zajedno sa vrednostima odgovarajućih fizičkih parametara.

TABELA 2.7 Tehnološki parametri MOS strukture

Parametar	Simbol	Vrednost
Koncentracija primesa u supstratu	N_A	$7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Debljina oksida gejta	t_{ox}	30 nm
Gustina naelektrisanja u oksidu	N_{oc}	10^{10} cm^{-2}
Tip gejta		N^+ polisilicijum
Koncentracija sopstvenih nosilaca	n_i	$1.02 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Širina zabranjene zone	E_g	1.12 eV
Termički napon na sobnoj temperaturi	$V_t = kT/q$	0.026 V
Propustljivost oksida	$\varepsilon_0\varepsilon_{ox}$	$3.45 \times 10^{-11} \text{ F/m}$
Propustljivost silicijuma	$\varepsilon_0\varepsilon_{si}$	$1.04 \times 10^{-10} \text{ F/m}$

- Odrediti vrednost napona ravnih zona.
- Izračunati gustinu naelektrisanja na početku jake inverzije. Kog je tipa i porekla to naelektrisanje?
- Izračunati vrednost faktora tela.
- Izračunati vrednost napona praga

(e) Izračunati gustinu naelektrisanja u inverznom sloju pri $V_G=5V$.

Rešenje:

(a) Da bismo izračunali napon ravnih zona V_{FB} koristeći jednačinu (2.65), potrebna nam je razlika izlaznih radova ϕ_{ms} , a da bismo dobili ϕ_{ms} korišćenjem jednačine (2.64) treba najpre odrediti Fermijev potencijal ϕ_s . Korišćenjem jednačine (2.63) dobijamo

$$\phi_F = V_t \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.41 V$$

Korišćenjem ove vrednosti za ϕ_s , i očitavanjem vrednosti za ϕ_m i χ_s iz Tabele 2.6, razlika izlaznih radova se može izračunati korišćenjem jednačine (2.64)

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \phi_F \right) = 4.05 - \left(4.05 + \frac{1.12}{2} + 0.41 \right) = -0.97 V$$

Nalaženjem C_{ox} kao $C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox} = 3.45 \times 10^{-11} / 30 \times 10^{-9} = 1.15 \times 10^{-3} F / m^2$, napon ravnih zona se izračunava korišćenjem jednačine (2.65):

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{qN_{oc}}{C_{ox}} = -0.96 - \frac{1.6 \times 10^{-19} \cdot 10^{14}}{1.15 \times 10^{-3}} = -0.974 V$$

(b) Na početku jake inverzije, kada je $V_G=V_T$, za naelektrisanje u inverznom sloju se uzima da je jednako nuli. Prema tome, naelektrisanje osiromašenog sloja Q_d pojavljuje se kao jedino nekompenzovano naelektrisanje u silicijumskom supstratu. S obzirom da potiče od nekompenzovanih negativnih akceptorskih jona (koncentracije N_A) u osiromašenom sloju širine w_d , gustina naelektrisanja osiromašenog sloja Q_d (C/m^2) može se izraziti kao

$$Q_d = qN_A \cdot w_d$$

Jednačina (2.74) daje w_d u funkciji N_A i Fermijevog potencijala $2\phi_F$, što nakon zamene u gornju jednačinu dovodi do

$$Q_d = \sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_{si} q N_A (2\phi_F)}$$

Prema tome,

$$Q_d = \sqrt{2 \cdot 1.04 \times 10^{-10} \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 7 \times 10^{22} \cdot (2 \cdot 0.41)} = 1.38 \times 10^{-3} C / m^2$$

(c) Faktor tela definisan je jednačinom (2.76):

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_{si} q N_A}}{C_{ox}} = \frac{\sqrt{2 \cdot 1.04 \times 10^{-10} \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 7 \times 10^{22}}}{1.15 \times 10^{-3}} = 1.327 V^{1/2}$$

(d) Napon praga dat je jednačinom (2.77)

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \gamma \cdot \sqrt{2\phi_F} = -0.974 + 2 \cdot 0.41 + 1.327 \sqrt{2 \cdot 0.41} = 1.05 V$$

(e) Pretpostavlja se da je gustina naelektrisanja u inverziji jednaka nuli pri $V_G=V_T$ i da se celokupni porast napona na gejtju iznad napona praga troši na formiranje naelektrisanja u inverznom sloju. Prema tome

$$Q_I = (V_G - V_T) C_{ox} = (5 - 1.05) \cdot 1.15 \times 10^{-3} = 4.54 \times 10^{-3} C / m^2$$

◆ Primer 2.8 Projektovanje napona praga

U CMOS (complementary MOS) integrisanim kolima neophodno je obezbediti jednake apsolutne vrednosti napona praga MOS struktura na supstratima N-tipa i P-tipa. Odrediti vrednost koncentracije donora N_D koja obezbedjuje da MOS struktura na N-supstratu bude sa apsolutnom vrednošću napona praga jednakom naponu praga MOS strukture na P-supstratu koja je razmatrana u Primeru 2.7. Za sve ostale parametre treba uzeti iste vrednosti.

Rešenje: Jednačina (2.78) daje napon praga za slučaj silicijumskog supstrata N-tipa:

$$V_T = V_{FB} - |2\phi_F| - \gamma \cdot \sqrt{2|\phi_F|}$$

Pošto Fermijev potencijal $2\phi_F$, faktor tela γ i napon ravnih zona V_{FB} zavise od koncentracije donora, neohodno je izraziti ove članove u funkciji koncentracije donora N_D . Korišćenjem jednačine (2.63) za $2\phi_F$, jednačine (2.65) i (2.64) za V_{FB} i jednačine (2.79) za γ , jednačina za napon praga postaje

$$V_T = \phi_m - \chi_s - \frac{E_g}{2q} + V_t \ln \frac{N_D}{n_i} - 2V_t \ln \frac{N_D}{n_i} - \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{si}qN_D}}{C_{ox}} \sqrt{2V_t \ln \frac{N_D}{n_i}}$$

gde je $V_t = kT/q$. Korišćenjem vrednosti poznatih parametara, gornja jednačina se pojednostavljuje na

$$V_T = -0.56 - 0.026 \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} - 5.02 \times 10^{-12} \sqrt{N_D} \sqrt{0.052 \cdot \ln \frac{N_D}{n_i}}$$

Pošto je $\ln(N_D/n_i) > 0$ (to je zbog toga što je $N_D > n_i$), sva tri člana u gornjoj jednačini su negativna, što znači da je napon praga negativan. Da bi se koristila apsolutna vrednost napona praga, sva tri znaka minus treba prepraviti u plus. Uzimajući da apsolutna vrednost napona praga treba da bude 1.05V (kao što je dobijeno u Primeru 2.7) i razvijanjem $\ln(N_D/n_i)$ kao

$$\ln \frac{N_D}{n_i} = \ln N_D - \ln n_i = \ln N_D - \ln 1.02 \times 10^{16} = \ln N_D - 36.86 \quad (\text{gde je } N_D \text{ u } m^{-3})$$

dobija se sledeća jednačina

$$1.05 = 0.56 + 0.026 \cdot \ln N_D - 0.026 \cdot 36.86 + 5.02 \times 10^{-12} \sqrt{N_D} \sqrt{0.052 \cdot \ln N_D - 0.052 \cdot 36.86}$$

Grupisanjem članova sa nepoznatom N_D na levoj strani dobijamo

$$0.026 \cdot \ln N_D + 5.02 \times 10^{-12} \sqrt{N_D} \sqrt{0.052 \cdot \ln N_D - 1.917} = 1.448$$

Ova jednačina se može rešiti jedino iterativno: sa nekom pretpostavljenom vrednošću za N_D izračuna se leva strana jednačine (LSJ) i upoređuje se sa vrednošću na desnoj strani jednačine (DSJ) (1.448). Ovo upoređenje nam obezbedjuje nagoveštaj da li vrednost za N_D treba povećati ili smanjiti pre nego što se izvrši sledeća iteracija. Kada razlika između LSJ i DSJ postane prihvatljivo mala, vrednost za N_D se uzima kao rešenje jednačine. Verovatno se čini razumnim da se za početnu vrednost za N_D uzme koncentracija akceptora iz primera 2.7: $N_D = 7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} = 7 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$. Sledeća tabela ilustruje da je vrednost LSJ jednaka 2.569, što je veće od vrednosti DSJ od 1.448: prema tome, koncentraciju N_D treba smanjiti. Tabela takodje ilustruje da je sledeća pretpostavka za 10^{21} m^{-3} manja nego što treba da bude, dok je pretpostavka $2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ neznatno veća od prave koncentracije. Konačno, za $N_D = 1.8 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ nalazimo da daje sasvim prihvatljivu vrednost za LSJ (1.441 što je uporedivo sa traženom vrednošću 1.448). Prema tome, za rešenje se uzima $N_D = 1.8 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} = 1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

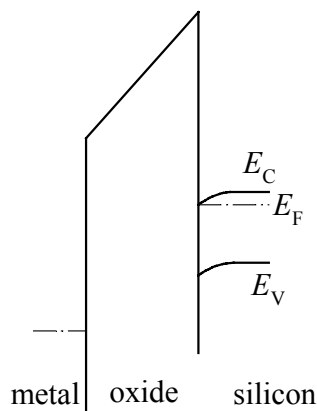
N_D (m^{-3})	LSJ
7×10^{22}	2.569
10^{21}	1.380
2×10^{21}	1.454
1.8×10^{21}	1.441

ZADACI ZA VEŽBU

2.19 Koja od sledećih tvrdjenja, koja se odnose na MOS kondenzator, su ispravna?

- Uslov nultog ukupnog naelektrisanja na pločama MOS kondenzatora se uzima kao uslov ravnih zona.
- U oksidu nema električnog polja kada je $V_{GS}=V_{FB}$.
- Ukupno naelektrisanje na pločama MOS kondenzatora treba da bude nula pri $V_{GS}=0$.
- Gustina naelektrisanja u inverznom sloju se može izraziti kao $Q_I=C_{ox}(V_{GS}=V_{FB})$.
- Površinski potencijal ϕ_s zavisi eksponencijalno od napona na gejtu u jakoj inverziji.
- Gustina naelektrisanja u inverznom sloju na početku jake inverzije je $Q_I = \gamma\sqrt{2\phi_F}$.
- Kapacitivnost u stanju osiromašenja ne zavisi od primenjenog napona na gejtu.
- Kapacitivnost inverznog sloja proporcionalna je ($V_{GS}=V_T$)

2.20 Koji režim rada MOS kondenzatora (akumulacija, osiromašenje ili jaka inverzija) je izražen dijagramom energetskih zona sa Sl. 2.22. Znajući da je širina zabranjene zone u silicijumu 1.12 eV, odrediti napon koji je primenjen između gejta i silicijumskog supstrata.

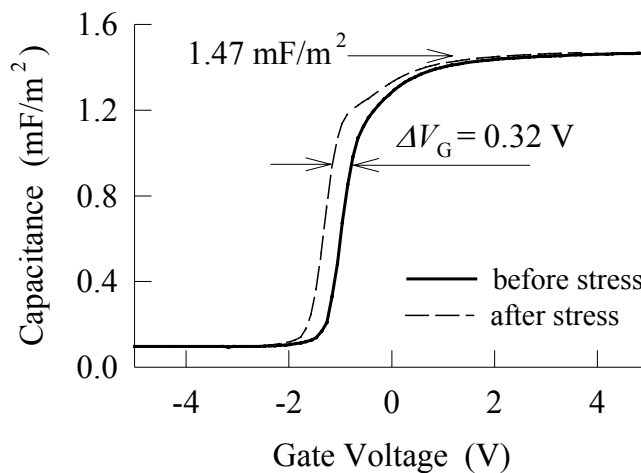


Sl. 2.22 Dijagram zona MOS kondenzatora

2.21 Napon ravnih zona MOS kondenzatora na supstratu N-tipa je $V_{FB}=-1V$. Ako je debljina oksida gejta 5nm, izračunati vrednost i odrediti smer (ili smerove) električnog polja u oksidu gejta i na površini poluprovodnika pri nultoj polarizaciji gejta ($V_G=0$).

2.22 Dva različita MOS kondenzatora, sa različitim debljinama oksida gejta (3 i 15nm) imaju istu gustinu pozitivnog naelektrisanja u oksidu ($N_{oc}=5 \times 10^{10} cm^{-2}$) u blizini medjupovršine oksid-poluprovodnik. Odrediti pomeraj napona ravnih zona usled ovog pozitivnog naelektrisanja za ova dva MOS kondenzatora. Kolike su promene napona praga?

- 2.23** C-V krive MOS kondenzatora pre i nakon napreznja oksida gejt prikazane su na Sl. 2.23. Odrediti gustinu naelektrisanja u oksidu gejta, N_{oc} , koje je formirano ovim napreznjem.



Sl. 2.23 C-V krive MOS kondenzatora pre i nakon napreznja oksida gejta

- 2.24** Koliko iznosi razlika izlaznih radova izmedju jako dopiranog polisilicijuma i silicijuma P-tipa koji je dopiran sa 10^{16} akceptorskih atoma po cm^3 , ako je jako dopirani polisilicijum
- P⁺ tipa
 - N⁺ tipa
- 2.25** (a) Napon ravnih zona MOS kondenzatora sa polisilicijumskim gejtom N⁺ tipa je $V_{FB} = -0.25\text{V}$. Pretpostavljajući da je naelektrisanje u oksidu nula, odrediti tip i nivo dopiranja supstrata.
- (b) Koliki bi bio napon ravnih zona ako bi se sa istim tipom i nivoom dopiranosti supstrata upotrebio polisilicijumski gejt P⁺ tipa
- 2.26** Napon praga MOS kondenzatora na silicijumskom supstratu P-tipa je $V_T = 1.0\text{V}$. Kog je tipa i koje je gustine (po jedinici površine) pokretno naelektrisanje na površini silicijuma ako je izmedju gejta i supstrata primenjen napon od 5V? Debljina oksida gejta je 15nm.
- 2.27** Napon praga MOS kondenzatora na silicijumskom supstratu P-tipa je $V_T = 0.25\text{V}$, a kapacitivnost oksida gejta je $C_{ox} = 6.5\text{mF/m}^2$. Koliko se elektrona može naći na površini kondenzatora $0.1 \times 0.1\ \mu\text{m}^2$ ako je napon na gejtu $V_G = 0.5\text{V}$?
- 2.28** Napon praga i napon ravnih zona MOS kondenzatora su $V_T = -1.0\text{V}$ i $V_{FB} = -0.5\text{V}$, respektivno. Da li je ovaj kondenzator formiran na poluprovodniku N-tipa ili P-tipa? Kolika je gustina manjinskih nosilaca (u C/m^2) na površini poluprovodnika kada je napon primenjen izmedju elektroda metala i poluprovodnika jednak $V_G = -0.75\text{V}$?
- 2.29** Napon ravnih zona i napon praga MOS kondenzatora su $V_{FB} = -3.0\text{V}$ i $V_T = -1.0\text{V}$, respektivno. Kapacitivnost oksida gejta je $C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_{ox} / t_{ox} = 3.45 \times 10^{-3}\text{F/m}^2$.
- da li je kondenzator realizovan na poluprovodniku P-tipa ili N-tipa? Objasniti odgovor.
 - Kolika je gustina manjinskih nosilaca (u C/m^2) na površini poluprovodnika kada je napon primenjen izmedju elektroda metala i poluprovodnika jednak $V_G = -2.0\text{V}$?
 - Kolika je gustina manjinskih nosilaca (u C/m^2) na površini poluprovodnika kada na kondenzator nije primenjen napon ($V_G = 0$)?

- 2.30** Izračunati napon praga MOS kondenzatora sa P⁺ polisilicijumskim gejtom koji je realizovan na supstratu N-tipa ($N_D=5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) ako je debljina oksida gejta 7 nm. Zanimariti naelektrisanja u oksidu gejta.
- 2.31** Debljina oksida MOS kondenzatora je 4 nm. Silicijumski supstrat je N-tipa (nivo dopiranja je $N_D=7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$), a gejt je jako dopirani polisilicijum N⁺ tipa. Pod pretpostavkom da je gustina naelektrisanja u oksidu nula, odrediti gustinu pokretnog naelektrisanja na površini poluprovodnika ako je primenjeni napon između gejta i supstrata jednak -1.5 V.
- 2.32** Izračunati visokofrekventnu i niskofrekventnu kapacitivnost po jedinici površine MOS kondenzatora u stanju jake inverzije, ako je debljina oksida gejta 50 nm, a supstrat P-tipa je dopiran sa $N_A=10^{15}$ atoma bora po cm^3 .
- 2.33** Kapacitivnosti MOS kondenzatora u akumulaciji i jakoj inverziji, merene visokofrekventnim signalom, iznose 9 i 3 mF/m^2 , respektivno. Ove kapacitivnosti su merene pri $V_G=-2\text{V}$ i $V_G=2\text{V}$, respektivno.
- da li je supstrat N ili P-tipa?
 - Odrediti debljinu oksida gejta.
 - Pretpostavljajući uniformno dopiran supstrat, izračunati koncentraciju primesa u supstratu.
- 2.34** MOS kondenzator sa N⁺ polisilicijumskim gejtom polarisan je u jakoj inverziji. Koliki je površinski potencijal ϕ_s ? Odrediti pad napona na oksidu ako je napon između gejta i supstrata 5V. Nivo dopiranja silicijumskog supstrata je $N_A=5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$.
- 2.35** Probojno električno polje u oksidu je 1 V/nm. Projektovati debljinu oksida MOS kondenzatora tako da probojni napon u jakoj inverziji bude 5V. Za gejt treba upotrebiti N⁺ polisilicijum, a dopiranost supstrata je $N_A=7.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. Koliki je probojni napon u akumulaciji, ako je površinski potencijal zanemarljiv u poredjenju sa veličinom probojnog napona?
- 2.36** Između električnih polja u oksidu i poluprovodniku i gustine naelektrisanja u oksidu u blizini međupovršine oksid-poluprovodnik može biti izvedena sledeća relacija iz integralnog oblika Gauss-ovog zakona
- $$\epsilon_{si} E_{si} - \epsilon_{ox} E_{ox} = qN_{oc}$$
- gde su E_{si} električno polje na površini poluprovodnika (E_{si}) i električno polje u oksidu (E_{ox}) usmereni prema supstratu. Izračunati E_{ox} i E_{si} za $V_G=V_{FB}$ i (a) $N_{oc}=0$; (b) $N_{oc}=5 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$.
- 2.37** MOS kondenzator ima P⁺ polisilicijumski gejt, koncentraciju primesa u supstratu $N_D=10^{16} \text{cm}^{-3}$ i debljinu oksida gejta $t_{ox}=80 \text{nm}$. Probojno električno polje u oksidu je 1 V/nm. Izračunati probojni napon u jakoj inverziji ako
- naelektrisanje u oksidu može biti zanemareno
 - kao rezultat izlaganja oksida jakom električnom polju, generisano je u oksidu u blizini međupovršine silicijum-oksid pozitivno naelektrisanje gustine $N_{oc}=5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$.
- 2.38** MOS tranzistor na supstratu P-tipa sa $\phi_{ms}=1.0 \text{V}$ polarisan je konstantnim naponom na gejtu $V_G=-7\text{V}$ da bi se testirala čvrstina oksida gejta debljine 10 nm. Ako ovakvo naprezanje svakog sata formira $N_{oc}=10^{10} \text{cm}^{-2}$ pozitivnog naelektrisanja u blizini međupovršine silicijum-oksid, koliko će biti potrebno vremena dok električno polje u oksidu ne postigne kritičnu vrednost od 1 V/nm?

2.39 Pet N-kanalnih MOSFET-ova sa polisilicijumskim gejtom, od kojih je svaki sa različitom debljinom oksida gejta t_{ox} (45, 47, 50, 53 i 55nm) realizovano je na silicijumskom supstratu P-tipa sa istom koncentracijom primesa $N_A=5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. Za naelektrisanje u oksidu gejta pretpostavlja se da je jednako kod svih MOSFET-ova, jer su procesirani u jednoj partiji silicijumskih pločica. Izvršena su merenja napona praga V_T i dala su sledeće rezultate: 1.10, 1.16, 1.25, 1.33 i 1.39V. Diskutovati oblik i nagib zavisnosti $V_T(t_{ox})$ i objasniti značenje presečne tačke $V_T(t_{ox}=0)$. Odrediti vrednost naelektrisanja u oksidu Q_{oc} i razliku izlaznih radova metal-poluprovodnik ϕ_{ms} .

PITANJA ZA VEŽBU I PROVERU ZNANJA

- R-2.7** Da li postoji naelektrisanje na oblogama MOS kondenzatora pri $V_G=0V$? Ako postoji, mora postojati i električno polje u oksidu gejta da bi držalo to naelektrisanje na oblogama kondenzatora. Kada nema napona na gejtju, odakle potiče to električno polje?
- R-2.8** Kako se naziva uslov kada je na oblogama MOS kondenzatora neelektrisanje nula? Da li postoji neko električno polje u oksidu ili supstratu? Da li postoji potencijalna razlika između površine i balka silicijumskog supstrata?
- R-2.9** Kako se napon ravnih zona izražava preko razlike izlaznih radova i naelektrisanja u oksidu?
- R-2.10** Koji se tip naelektrisanja pojavljuje na oblogama MOS kondenzatora kada je primenjen negativan efektivni napon na gejtju ($V_G-V_{FB}<0$)? Kako se takav režim rada MOS kondenzatora naziva? Pretpostaviti poluprovodnik P-tipa.
- R-2.11** Šta određuje kapacitivnost MOS strukture u stanju akumulacije? Da li ona zavisi od primenjenog napona?
- R-2.12** Koji se tip naelektrisanja pojavljuje na oblogama MOS kondenzatora kada je primenjen mali pozitivni efektivni napon na gejtju ($V_G-V_{FB}>0$)? Kako se ovaj režim rada naziva? Pretpostaviti P-tip poluprovodnika.
- R-2.13** Šta određuje kapacitivnost MOS strukture u stanju osiromašenja? Da li ona zavisi od primenjenog napona? Da li se površinski potencijal menja sa promenom napona na gejtju?
- R-2.14** Koji se tip naelektrisanja pojavljuje na oblogama MOS kondenzatora kada je primenjeni napon na gejtju veći od napona praga ($V_G>V_T$)? Kako se naziva ovaj režim rada? Pretpostaviti P-tip poluprovodnika.
- R-2.15** Napisati jednačinu kapacitivnost-napon-naelektrisanje ($Q=CV$) za MOS kondenzator u stanju jake inverzije da bi se pokazala veza između različitih vrsta naelektrisanja u silicijumskom supstratu i pada efektivnog napona sa gejta kroz oksid gejta.
- R-2.16** Da li površinski potencijal značajno zavisi od napona na gejtju u stanju jake inverzije?
- R-2.17** Šta određuje površinski potencijal u jakoj inverziji? Kako se to može izraziti?
- R-2.18** Kolika je gustina naelektrisanja u inverznom sloju (elektrona) na početku jake inverzije?
- R-2.19** Kako se naziva napon na gejtju koji dovodi MOS strukturu na početak jake inverzije?
- R-2.20** Izvesti jednačinu napona praga iz jednačine napisane u pitanju R-2.15.