



Abrorbek A. ABDULXAYEV,
Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori, PhD
Odiļjon O. MAMATKARIMOV,
Fizika-matematika fanlari doktori, professor
Salohiddin B.FAZLIDDINOV,
Assistent, Namangan davlat texnika universiteti, Namangan, O'zbekiston
E-mail:abdulxayev2308@gmail.com

NamDPI dotsenti, PhD O'ktamaliyev taqrizi asosida

INTERFACE STATES AND CHARGE FORMATION MECHANISMS IN TiO₂-BASED MIS STRUCTURES WITH A SiO₂ INTERFACIAL LAYER

Annotation

Due to the continuous scaling down of semiconductor devices, the need for materials with high dielectric permittivity is increasing. Titanium dioxide (TiO₂) is considered a promising material due to its high dielectric constant; however, its direct contact with a silicon (Si) substrate leads to problems associated with a high density of interface states (D_{it}), enhanced charge trapping processes, and increased leakage current density. In this work, the effect of a thin silicon dioxide (SiO₂) interfacial layer on improving the interface properties in Si/TiO₂ structures is investigated. Within the framework of the study, capacitance–voltage (C–V) and current density–voltage (J–V) characteristics of the Al/TiO₂/SiO₂/Si multilayer MIS structure were analyzed, and the interface state density (D_{it}) as well as leakage current mechanisms were evaluated.

Keywords. TiO₂, SiO₂ interfacial layer, interface engineering, interface states (D_{it}), charge trapping, leakage current, conductance method, interface states, atomic layer deposition (ALD), C–V characteristics, J–V characteristics, high-k materials.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАРЯДА В МДП-СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ TiO₂ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СЛОЕМ SiO₂

Аннотация

В связи с постоянным уменьшением размеров полупроводниковых приборов возрастает необходимость использования материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Диоксид титана (TiO₂) является перспективным материалом благодаря высокой диэлектрической постоянной, однако его непосредственный контакт с кремниевой (Si) подложкой приводит к проблемам, связанным с высокой плотностью поверхностных состояний на границе раздела (D_{it}), усилением процессов захвата заряда и увеличением плотности тока утечки. В данной работе исследовано влияние тонкого межслойного слоя диоксида кремния (SiO₂) на улучшение свойств интерфейса в структурах Si/TiO₂. В рамках исследования были проанализированы вольт-фарадные (C–V) и вольт-амперные (J–V) характеристики многослойной МДП-структуры Al/TiO₂/SiO₂/Si, а также оценены плотности состояний на границе раздела (D_{it}) и механизмы тока утечки.

Ключевые слова. TiO₂, межслойный слой SiO₂, интерфейсная инженерия, состояния на границе раздела (D_{it}), захват заряда, ток утечки, метод проводимости, интерфейсные состояния, атомно-слоевое осаждение (ALD), C–V характеристики, J–V характеристики, материалы с высокой диэлектрической проницаемостью.

SiO₂ ORALIQ QATLAM ORQALI TiO₂ ASOSIDAGI MDY TUZILMALARDA CHEGARA SIRT HOLATLARI VA ZARYAD HOSIL BO'LIŞH MEKANIZMLARI

Annotatsiya

Yarimo'tkazgich qurilmalarining o'lchamlari muntazam ravishda kichrayib borayotgani sababli, yuqori dielektrik singdiruvchanlikka ega materiallardan foydalanish zarurati ortib bormoqda. Titan dioksidi (TiO₂) yuqori dielektrik doimiysi tufayli istiqbolli material hisoblanadi, biroq uning kremniy (Si) asos bilan bevosita tutashuvi yuqori zichlikdagi chegara sirt holatlari (D_{it}), zaryad tutish jarayonlarining kuchayishi hamda oqish toki zichligining ortishi bilan bog'liq muammolarni keltirib chiqaradi. Ushbu ishda Si/TiO₂ tuzilmalarda interfeys xossalari yaxshilash maqsadida yupqa kremniy dioksidi (SiO₂) oraliq qatlamining ta'siri o'rganildi. Tadqiqot doirasida Al/TiO₂/SiO₂/Si ko'p qatlamli MDY tuzilma uchun sig'im–kuchlanish (C–V) va tok–kuchlanish (J–V) xarakteristikalari tahlil qilinib, chegara sirt holatlari zichligi (D_{it}) hamda oqish toki mexanizmlari baholandi.

Kalit sozlar. TiO₂, SiO₂ oraliq qatlam, interfeys muhandisligi, chegara sirt holatlari (D_{it}), zaryad tutish, oqish toki, conductance usuli, interfeys holatlari, atom qatlamli cho'ktirish (ALD), C–V xarakteristika, J–V xarakteristika, yuqori dielektrik materiallar.

Kirish. Nanoelektronika sohasining jadal rivojlanishi yarimo'tkazgich qurilmalarining o'lchamlarini keskin kichraytirish bilan birga ularning ishlash samaradorligini saqlab qolish va oshirish zaruratini yuzaga keltirmoqda. Ayniqsa, metall–dielektrik–yarimo'tkazgich tuzilmalarda qo'llaniladigan dielektrik qatlamlar xossalari qo'yiladigan talablar tobora ortib bormoqda [1,2,5]. An'anaviy kremniy dioksidi (SiO₂) yuqori sifatli interfeys hosil qilishi bilan ajralib tursada, uning dielektrik singdiruvchanlik qiymatining pastligi (~3.9) sababli ushbu material asosida qurilmalarni yanada kichraytirish imkoniyati cheklanmoqda.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. So'nggi yillarda yuqori dielektrik singdiruvchanlikka ega materiallar, xususan titan dioksidi (TiO₂), MDY tuzilmalarda muqobil dielektrik sifatida keng o'rganilmoqda. TiO₂ yuqori dielektrik doimiysi, keng

taqiqlangan energiya zonasi hamda zamonaviy texnologiyalar bilan mosligi tufayli istiqbolli material hisoblanadi[1,7]. Biroq, TiO₂ ning kremniy asos bilan bevosita tutashuvi jiddiy muammolarni yuzaga keltiradi. Xususan, TiO₂/Si interfeysida yuqori zichlikdagi chegara sirt holatlari (D_{it}) hosil bo'lib, ular zaryad tashuvchilarning tutib qolinishiga va kechikib bo'shatilishiga sabab bo'ladi[3,7,8]. Natijada sig'im–kuchlanish (C–V) xarakteristikalarida cho'zilis va gisterezis hodisasi kuzatiladi[3,8], shuningdek, oqish toki zichligi sezilarli darajada ortadi[4,9]. Bu esa qurilmalarning elektr barqarorligi va ishonchligini pasaytiradi.

Tadqiqot materiallari va metodlari. Mazkur tadqiqotda metall–dielektrik–yarimo'tkazgich (MDY) tuzilma sifatida Al/TiO₂/SiO₂/Si ko'p qatlamli tizimi ko'rib chiqildi. Yarimo'tkazgich asos sifatida n-tip legirlangan kremniy (Si) plastina tanlandi, chunki u elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lib, MDY tuzilmalarda zaryad tashuvchilarning taqsimlanishini samarali modellashtirish imkonini beradi. Dielektrik tizim ikki qatlamdan iborat bo'lib, ular funksional jihatdan farqlanadi:

- TiO₂ - asosiy yuqori dielektrik qatlam bo'lib, yuqori sig'imni ta'minlaydi;
- SiO₂ - interfeysni passivatsiyalovchi oraliq qatlam bo'lib, sirt nuqsonlarini kamaytirishga xizmat qiladi.

TiO₂ qatlamining qalinligi 10–25 nm oraliqda tanlandi, bu yuqori sig'imni ta'minlash bilan birga tunnellanishni cheklash uchun yetarli hisoblanadi. SiO₂ qatlamining qalinligi 0,5–2 nm oralig'ida tanlanib, bu qiymatlar interfeys passivatsiyasi va sig'im o'rtasidagi muvozanatni ta'minlash uchun muhimdir.

MDY tuzilma bir necha ketma-ket texnologik bosqichlar orqali shakllantirildi. Dastlab kremniy plastina yuzasi organik va noorganik iflosliklardan standart kimyoviy tozalash jarayonlari orqali tozalandi. Keyin tabiiy oksid qatlamini olib tashlash uchun HF eritmasi bilan ishlov berildi, bu esa interfeysda qo'shimcha nuqsonlar hosil bo'lishining oldini oladi. Keyingi bosqichda kremniy yuzasida ultrayupqa SiO₂ oraliq qatlam hosil qilindi. Ushbu qatlam kremniy yuzasidagi erkin bog'lanishlarni passivatsiyalash orqali interfeys nuqsonlari zichligini kamaytiradi. Qatlamning qalinligi nanometr darajasida nazorat qilinib, uning optimal qiymati qurilma ishlashiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. SiO₂ qatlam ustiga TiO₂ dielektrik qatlam atom qatlamli cho'ktirish (ALD) texnologiyasi yordamida o'stirildi[5,6]. ALD usuli yuqori aniqlik, bir jinslilik va mukammal interfeys hosil qilish imkonini beradi, bu esa dielektrik kirituvchanlikka ega materiallar uchun muhim hisoblanadi. Metall elektrod sifatida alyuminiy (Al) PVD usuli yordamida yotqizildi. Ushbu elektrod tashqi kuchlanishni uzatish va tuzilma ichida elektr maydon hosil qilish vazifasini bajaradi. Yakuniy bosqichda tuzilma 300–400 °C haroratda azot muhitida termik qayta ishlovdan o'tkazildi. Bu jarayon interfeysdagi nuqsonlarni kamaytirish va dielektrik qatlamning elektr xossalarini barqarorlashtirishga xizmat qiladi.

Chegara sirt nuqsonlari zichligi D_{it} dielektrik–yarimo'tkazgich interfeys sifatini tavsiflovchi asosiy parametr bo'lib, interfeys holatlarida zaryad tashuvchilarning ushlanishi va emissiyasi bilan bog'liq yo'qotish mexanizmini ifodalaydi. Conductance usuli ushbu yo'qotishlarni kichik amplitudali AC signal ta'sirida o'lchangan parallel o'tkazuvchanlik orqali aniqlashga asoslanadi[3]. Interfeys holatlari ekvivalent sxemada C_{it} va R_{it} elementlari bilan ifodalanadi, bunda ularning vaqt doimiyi τ_{it}=R_{it}C_{it} ga teng. Bir sathli ideal model uchun parallel sig'im va parallel o'tkazuvchanlik mos ravishda

$$C_p = C_s + \frac{C_{it}}{1 + (\omega\tau_{it})^2}, \quad \frac{G_p}{\omega} = \frac{qD_{it}\omega\tau_{it}}{1 + (\omega\tau_{it})^2}$$

ko'rinishda yoziladi. Real interfeyslarda interfeys holatlari energiya bo'yicha uzluksiz taqsimlanganligi sababli amaliy hisoblashlarda quyidagi ifoda qo'llanadi:

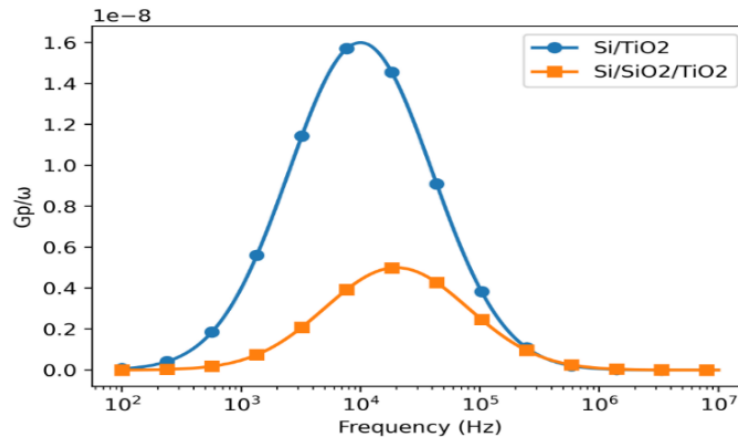
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qD_{it}}{2\omega\tau_{it}} \ln [1 + (\omega\tau_{it})^2]$$

Mazkur funksiya maksimumga ega bo'lib, undan interfeys holatlari zichligi va vaqt doimiyi

$$D_{it} \approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}, \quad \tau_{it} \approx \frac{2}{\omega_{peak}}$$

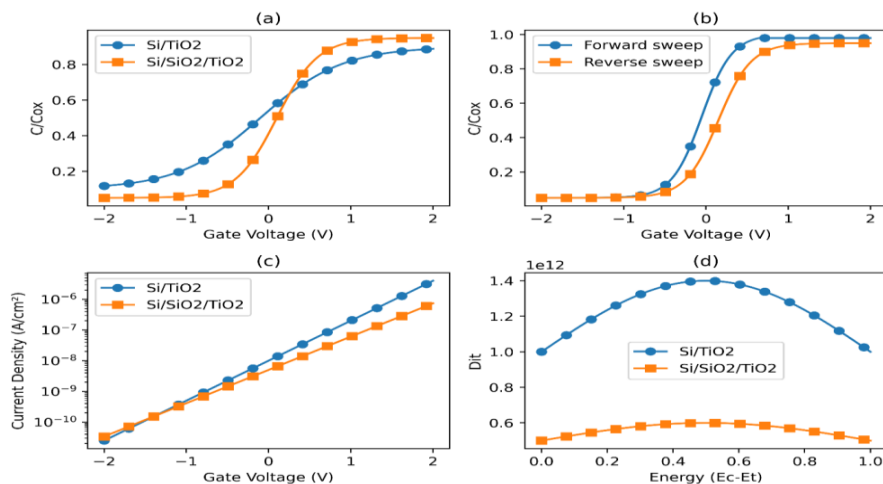
munosabatlar orqali aniqlanadi. Bu yerda ω_{peak} - (G_p/ω) maksimum kuzatilgan burchak chastotadir. Tajribada bevosita o'lchangan G_m va C_m qiymatlari parallel ekvivalent parametrlarga keltirilib, so'ng G_p/ω - f bog'lanishidan D_{it} ekstraksiya qilinadi. Agar ketma-ket qarshilik mavjud bo'lsa, hisoblashdan oldin unga tegishli tuzatish kiritiladi, chunki bu omil D_{it} qiymatiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Natijalar va muhokama. Taklif etilayotgan tuzilmaning muhim xususiyati - SiO₂ oraliq qatlamining mavjudligi bo'lib, u TiO₂ va kremniy orasidagi to'g'ridan-to'g'ri kontakti bartaraf etadi va chegara sirt nuqsonlarini kamaytiradi. Interfeys holatlari zichligini yanada aniq baholash maqsadida conductance usuli qo'llanildi. 1-rasmda G_p/ω ning chastotaga bog'liqligi keltirilgan bo'lib, ushbu usul interfeysdagi nuqson markazlar zichligini aniqlashda keng qo'llaniladi. 1-rasmdan ko'rinadiki, Si/TiO₂ tuzilma uchun G_p/ω grafigida aniq maksimum (cho'qqi) kuzatiladi. Ushbu maksimumning katta qiymati interfeysda nuqson markazlar zichligi yuqori ekanligini bildiradi. Fizik jihatdan bu shuni anglatadiki, zaryad tashuvchilar interfeys holatlarida ushlanib qoladi va ular orqali qo'shimcha o'tkazuvchanlik kanallari hosil bo'ladi. SiO₂ oraliq qatlam kiritilgan tuzilma uchun esa maksimum qiymat sezilarli darajada kichraygan. Bu interfeys holatlari zichligining kamayganini ko'rsatadi. Ushbu natija SiO₂ qatlamning kremniy yuzasini samarali passivatsiyalashini va erkin bog'lanishlarni kamaytirishini tasdiqlaydi. 2(d)-rasmda keltirilgan D_{it} ning energiya bo'yicha taqsimoti bilan to'liq mos keladi. Ya'ni, conductance usuli orqali olingan past G_p/ω maksimumi interfeys holatlari zichligining kamayganini yana bir bor tasdiqlaydi.



1-rasm. Tadqiq etilayotgan tuzilma uchun conductance usuli asosida olingan G_p/ω ning chastotaga bog'liqligi.

Shuningdek, ushbu natijalar $C-V$ xarakteristikalaridagi gisterezisning kamayishi va $J-V$ grafigidagi oqish tokning pasayishi bilan uzviy bog'liqdir. Demak, SiO_2 oraliq qatlam kiritilishi interfeys sifatini yaxshilash orqali nafaqat statik (D_{it}), balki dinamik (zaryad almashinuvi) xossalarni ham sezilarli darajada yaxshilaydi. 2(a)-rasmida normallashtirilgan $C-V$ xarakteristikalar keltirilgan. Ushbu grafik Si/TiO_2 va $Si/SiO_2/TiO_2$ tuzilmalarining sig'im hususiyati orasidagi asosiy farqni ko'rsatadi. Si/TiO_2 tuzilma uchun egri chiziqning cho'zilganligi va ideal MDY xarakteristikasidan og'ishi interfeysda yuqori zichlikdagi chegara sirt holatlari mavjudligini bildiradi. Bunday holatda qo'yilgan kuchlanishning ma'lum qismi faqat fazoviy zaryad qatlamini boshqarishga emas, balki interfeys holatlarini zaryadlash va bo'shatishga ham sarflanadi. Natijada $C-V$ egri chiziq'i tik emas, balki "cho'zilgan" ko'rinishga ega bo'ladi. SiO_2 oraliq qatlamli tuzilmada esa 2(a)-rasmidan ko'rinadiki, egri chiziq ancha tiklashadi va ideal holatga yaqinlashadi. Bu juda muhim natija, chunki u SiO_2 qatlamning interfeys passivatsiyasi samarali ekanini bevosita ko'rsatadi. Ya'ni, SiO_2 faqat qo'shimcha dielektrik emas, balki interfeysdagi nuqson markazlarini kamaytiruvchi funksional qatlam sifatida ishlayotganda.



2-rasm. Tadqiq etilgan MDY tuzilmalarining elektr xossalari. (a) normallashtirilgan sig'im-kuchlanish ($C-V$) xarakteristikalar, (b) oldinga va orqaga kuchlanish berilgandagi gisterezis hodisasi, (c) tok zichligi-kuchlanish ($J-V$) xarakteristikalar (logarifmik masshtabda), (d) interfeys holatlari zichligining (D_{it}) energiya bo'yicha taqsimoti.

Bu natijani 2(b)-rasmidagi gisterezis bilan birga ko'rish ayniqsa muhim. Gisterezisning mavjudligi shuni anglatadiki, oldinga va orqaga kuchlanish berilganda tizim bir xil holatga darhol qaytmaydi; buning sababi zaryadlarning interfeys yoki dielektrikdagi hosil bo'ladigan zaryad markazlarida vaqtinchalik ushlanib qolishidir. Si/TiO_2 tuzilma uchun gisterezis oynasining katta bo'lishi zaryad markazlar soni ko'pligini va zaryad almashinuvi sekin kechishini ko'rsatadi. SiO_2 oraliq qatlam kiritilganda esa gisterezisning sezilarli kamayishi kuzatiladi. Bu natija ikki jihatdan muhim: birinchisi, interfeys sifatining yaxshilanganini ko'rsatadi; ikkinchisi, qurilmaning elektr barqarorligi oshganini bildiradi. Gisterezisning kamayishini quyidagi ifoda bilan ham izohlash mumkin:

$$\Delta V_{FB} = \frac{Q_{ot}}{C_{ox}}$$

bu yerda Q_{ot} - tutib qolingani zaryad miqdori. Agar SiO_2 qatlam natijasida nuqson markazlar soni kamaygan bo'lsa, Q_{ot} kamayadi va shu bilan gisterezis oynasi ham kichrayadi. Demak, 2(a) va 2(b)-rasmlar o'zaro bir-birini to'ldiradi: birinchisi interfeys sifati yaxshilanganini, ikkinchisi esa shu yaxshilanishning dinamik natijasini ko'rsatadi.

2(c)-rasmida tok zichligining kuchlanishga bog'liqligi keltirilgan bo'lib, bu grafik MDY tuzilmaning ishonchligi nuqtai nazaridan eng muhim natijalardan biridir. Si/TiO_2 tuzilma uchun oqish toki zichligi yuqoriroq ekanligi aniq ko'rinadi. Bu holat bir nechta fizik omillar bilan tushuntiriladi: birinchidan, TiO_2/Si interfeysida nuqson markazlar ko'pligi tufayli zaryad tashuvchilar

uchun qo'shimcha o'tkazuvchanlik kanallari paydo bo'ladi; ikkinchidan, energetik to'siq nisbatan past bo'lgani uchun tashuvchilarning injeksiyasi osonlashadi; uchinchidan, kuchli elektr maydon ta'sirida tunnellanish jarayonlari kuchayadi.

SiO₂ oraliq qatlam mavjud bo'lgan tuzilmada esa oqish tok sezilarli darajada kamayadi. 2(c)-rasmdagi bu pasayish SiO₂ interfeys nuqsonlarini kamaytirgani uchun nuqson holatlari orqali zaryad tashuvchilarning o'tishi susayishi bilan izohlash mumkin. Shu bilan birga, u yuqoriroq barrier hosil qilib, elektron injeksiyasini cheklaydi. Elektr maydonning dielektrik qatlamlar orasida qayta taqsimlanishi ham oqish tokni kamaytirishda muhim rol o'ynaydi. Bu yerda eng muhim jihat shundan iboratki, oqish tokning kamayishi biror bitta effekt emas, balki bir nechta mexanizmlarning birgalikdagi natijasidir. Ya'ni, SiO₂ qatlam bir vaqtning o'zida ham interfeysni passivatsiyalaydi, ham energetik to'siqni oshiradi, ham nuqson markazlar orqali o'tish yo'llarini qisqartiradi.

2(d)-rasmda interfeys holatlari zichligining energiya bo'yicha taqsimoti ko'rsatilgan. Bu grafik barcha oldingi natijalarni umumlashtiruvchi asosiy ko'rsatkich sifatida qaralishi mumkin. Si/TiO₂ tuzilma uchun D_{it} yuqori bo'lgani, interfeysda ko'plab nuqsonlar mavjudligini bildiradi. Aynan mana shu nuqsonlar C-V cho'zilishi, gisterezis, oqish tokning ortishiga sabab bo'ladi. SiO₂ oraliq qatlam kiritilganda esa D_{it} butun energiya diapazonida pasayadi. Bu juda muhim, chunki D_{it} kamayishi faqat bitta parametrlarning yaxshilangan emas, balki barcha elektr xarakteristikalar yaxshilanishining ildiz sababidir.

Olingan natijalar SiO₂ oraliq qatlamning mavjudligi foydali ekanini ko'rsatadi, biroq uning qalinligi ham muhim omil hisoblanadi. Juda yupqa qatlam interfeysni yetarlicha passivatsiyalay olmaydi va D_{it} sezilarli darajada kamaymasligi mumkin. Juda qalin qatlam esa umumiy dielektrik qalinlikni oshirib, sig'imni kamaytiradi va qurilmaning tezkorligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli 1–2 nm oraliq optimal deb qaraladi. Bu diapazonda interfeys passivatsiyasi yetarli bo'ladi, biroq sig'imning sezilarli yo'qotilishi kuzatilmaydi.

Xulosa. TiO₂ asosidagi MDY tuzilmalarda yupqa SiO₂ oraliq qatlamning interfeys xossalari va oqish toki mexanizmlariga ta'siri kompleks tarzda o'rganildi. Olingan natijalar SiO₂ qatlamning nafaqat qo'shimcha dielektrik sifatida, balki interfeys elementi sifatida muhim rol o'ynashini ko'rsatdi. C-V xarakteristikalar tahlili Si/TiO₂ tuzilma holatida sezilarli cho'zilish va katta gisterezis mavjudligini ko'rsatdi, bu interfeysda yuqori zichlikdagi nuqson holatlari mavjudligi bilan izohlanadi. SiO₂ oraliq qatlam kiritilganda esa C-V egri chizig'i ideal holatga yaqinlashdi va gisterezis sezilarli darajada kamaydi, bu esa interfeys passivatsiyasining samaradorligini ko'rsatadi.

J-V xarakteristikalar natijalari SiO₂ qatlam mavjud bo'lganda oqish toki zichligi keskin kamayishini ko'rsatdi. Bu natija energiya zonalar diagrammasi bilan mos keladi, ya'ni SiO₂ qatlamning yuqori energetik to'siq hosil qilishi elektron injeksiyasini cheklaydi. Interfeys holatlari zichligi (D_{it}) tahlili barcha kuzatilgan natijalarni umumlashtirib, SiO₂ qatlam kiritilishi natijasida nuqson markazlar soni sezilarli darajada kamayishini ko'rsatdi. D_{it} ning kamayishi C-V xarakteristikaning yaxshilanishi, gisterezisning qisqarishi va oqish tokning pasayishi bilan to'g'ridan-to'g'ri bog'liq ekanligi aniqlandi.

Umuman olganda, SiO₂ oraliq qatlamning TiO₂ asosidagi MDY tuzilmalarda interfeys sifatini yaxshilash, zaryad tutish jarayonlarini kamaytirish va oqish tok mexanizmlarini nazorat qilishda samarali vosita ekanligini ko'rsatdi. Olingan natijalar yuqori dielektrik asosidagi nanoelektron qurilmalarni loyihalash va optimallashtirish uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR

1. Robertson J. High dielectric constant oxides // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2004.
2. Taur Y., Ning T.H. *Fundamentals of Modern VLSI Devices*. – Cambridge, 2013.
3. Nicollian E.H., Brews J.R. *MOS Physics and Technology*. – Wiley, 1982.
4. Sze S.M., Ng K.K. *Physics of Semiconductor Devices*. – Wiley, 2007.
5. Mackus A.J.M. et al. Atomic layer deposition for nanotechnology // *Nature Reviews Materials*, 2019.
6. Knoops H.C.M. et al. Status and prospects of ALD // *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2020.
7. Chen Y. et al. Interface engineering of high-k dielectrics on Si // *Applied Surface Science*, 2020.
8. Wang Z. et al. Charge trapping and hysteresis in MOS structures // *IEEE TED*, 2020.
9. Zhang L. et al. SiO₂ interfacial layer effects in high-k stacks // *Thin Solid Films*, 2021.