

**INTERFEYS ZARYAD HOLATLARINING QAYTA KONFIGURATSIYASI
VA UNING METALL–DIELEKTRIK–YARIMO‘TKAZGICH TUZILMALARINING
ELEKTROFIZIK HUSUSIYATLARIGA TA’SIRI**

Mamatkarimov Odiljon Oxundedayevich – fizika-matematika fanlari doktori, professor
Abdulxayev Abrorbek Abdulloxon o‘g‘li – fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori
abdulxayev2308@gmail.com

Fazliddinov Salohiddin Bahriddin o‘g‘li – assistent o‘qituvchi
Namangan davlat texnika universiteti

Quchqarov Behzod Hoshimjonovich – fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, dotsent
Impuls tibbiyot instituti

**РЕКОНФИГУРАЦИЯ ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ НА ИНТЕРФЕЙСНЫХ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ
НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР МЕТАЛЛ–ДИЭЛЕКТРИК–
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

Маматкаримов Одилжон Охундаев – доктор физико-математических наук, профессор
Абдулхаев Аброрбек Абдуллохонович – доктор философии по физико-математическим наукам

Фазлиддинов Салохиддин Бахриддинович – ассистент преподаватель
Наманганский государственный технический университет

Кучкаров Бехзод Хошимжонович – доктор философии по физико-математическим наукам, доцент
Институт импульсной медицины

**RECONFIGURATION OF INTERFACE CHARGE STATES AND ITS EFFECT ON THE
ELECTRO-PHYSICAL PROPERTIES OF METAL–DIELECTRIC–SEMICONDUCTOR STRUCTURES**

Mamatkarimov Odiljon Oxundedayevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Abdulkhayev Abrorbek Abdulloxonovich – Doctor of Philosophy in Physical and Mathematical Sciences

Fazliddinov Salokhiddin Bakhriddinovich – Assistant teacher
Namangan State Technical University

Quchqarov Behzod Hoshimjonovich – Doctor of Philosophy in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Institute of Impulse Medicine

Tayanch so‘zlar: metall–dielektrik–yarimo‘tkazgich tuzilmalari, interfeys holatlari, zaryad tutib qoluvchi holatlar, sig‘im–kuchlanish gisterезisi, tekis-tasma kuchlanishi, zaryad relaksatsiyasi, aktivatsiya energiyasi, zaryad almashinuvi kinetikasi, lokal potentsial relyef, interfeys holatlarining qayta konfiguratsiyasi.

Rezyume. Mazkur ishda metall–dielektrik–yarimo‘tkazgich (MDYa) tuzilmalarida yuzaga keladigan noideal elektr hodisalarining fizik mexanizmlari tahlil qilindi. Tadqiqot interfeys va interfeysga yaqin dielektrik qatlamdagi zaryad holatlarining kinetik xossalariga asoslanadi. Tashqi ta’sirlar interfeys yaqinidagi lokal potentsial relyefni o‘zgartirishi va zaryad almashinuvi jarayonlarini qayta taqsimlashi ko‘rsatildi. Natijada MDYa tuzilmalarining elektr javobi interfeys zaryad holatlarining ichki kinetik dinamikasi bilan aniqlanishi asoslab berildi.

Ключевые слова: структуры металл–диэлектрик–полупроводник, интерфейсные состояния, ловушки заряда, гистерезис ёмкость–напряжение, напряжение плоских зон, релаксация заряда, энергия активации, кинетика обмена зарядом, локальный потенциальный рельеф, реконфигурация интерфейсных состояний.

Резюме. В работе проанализированы физические механизмы неидеальных электрических явлений в структурах металл–диэлектрик–полупроводник (МДП). Исследование основано на кинетических свойствах зарядовых состояний на границе раздела и в приповерхностном слое диэлектрика. Показано, что внешние воздействия модифицируют локальный потенциальный рельеф вблизи интерфейса и перераспределяют кинетику зарядообмена без образования новых дефектов. Установлено, что электрический отклик МДП-структур определяется внутренней кинетической динамикой интерфейсных состояний.

Key words: metal-dielectric–semiconductor structures, interface states, charge trapping states, capacitance–voltage hysteresis, flat-band voltage, charge relaxation, activation energy, charge exchange kinetics, local potential landscape, reconfiguration of interface states.

Summary. This work analyzes the physical mechanisms responsible for non-ideal electrical effects in metal–dielectric–semiconductor (MDS) structures. The study is based on the kinetic properties of charge states located at the interface and in the near-interface dielectric layer. It is shown that external influences modify the local potential landscape near the interface and redistribute charge-exchange kinetics without generating new defects. As a result, the electrical response of MDS structures is governed by the intrinsic kinetic dynamics of interface states.

Kirish. So‘nggi yillarda metall–dielektrik–yarimo‘tkazgich (MDYa) tuzilmalar mikro va nanoelektron qurilmalarning asosiy elementi sifatida keng qo‘llanilmoqda. Qurilmalar o‘lchamining kichrayishi dielektrik–yarimo‘tkazgich interfeysida kechadigan fizik jarayonlarning ahamiyatini sezilarli darajada oshirdi. Natijada interfeys nuqsonlari faqat texnologik kamchilik emas, balki qurilmaning elektr xatti-harakatini belgilovchi

asosiy omil sifatida qaralmoqda. Klassik MOS nazariyasida interfeys holatlari ko‘pincha statsionar parametrlar sifatida tasvirlanadi [1]. Biroq real MDYa tizimlarida interfeys holatlari dinamik bo‘lib, ularning zaryad almashinuvi vaqtga bog‘liq holda kechadi. Aynan shu kinetik jarayonlar sig‘im–kuchlanish gisterезisi va sekin zaryad relaksatsiyasi kabi noideal hodisalarining yuzaga kelishiga sabab bo‘ladi. Shu munosabat bilan ushbu ishda interfeys zaryad tutib

qoluvchi holatlarining tashqi ta'sirlar ostida qayta konfiguratsiyalanishi konsepsiyasi asosida MDYa tuzilmalarining elektr xossalari tahlil qilindi.

Tadqiqot usullari. Interfeys va chegara holatlarida saqlanadigan umumiy zaryad miqdori energiya bo'yicha taqsimlangan zaryad tutib qoluvchi holatlari zichligi orqali quyidagi integral ifoda bilan aniqlanadi:

$$Q_{it} = q \int D_{it}(E) f(E, E_F, T) dE \quad (1)$$

Bu yerda $D_{it}(E)$ interfeys holatlarining energiya bo'yicha zichligi, $f(E, E_F, T)$ esa Fermi–Dirak taqsimot funksiyasidir. Ushbu ifoda interfeysda saqlanadigan zaryad miqdori tashqi kuchlanish, temperatura va interfeys holatlarining energetik spektriga bog'liq ekanini ko'rsatadi [2]. Aynan shu bog'lanish keyingi boblarda tahlil qilinadigan tekis-tasma kuchlanishining siljishi va gisterezis hodisasining fizik asosini tashkil etadi. Interfeys zaryadining o'zgarishi metall–yarimo'tkazgich tizimidagi elektrostatik muvozanatni buzadi va tekis-tasma kuchlanishining siljishiga olib keladi:

$$\Delta V_{FB} = \frac{Q_{it}}{C_{ox}} \quad (2)$$

Bu munosabat interfeys zaryadi bilan elektr sezuvchanlik o'rtasidagi to'g'ridan-to'g'ri bog'lanishni ifodalaydi. Muhim jihat shundaki, dielektrik sig'imi o'zgarmagan holda kuzatilgan ΔV_{FB} siljishlari interfeys zaryadining qayta taqsimlanishini anglatadi, ya'ni hodisaning kelib chiqishi hajmiy emas, balki interfeysga xos ekanini ko'rsatadi. Interfeys zaryad tutib qoluvchi holatlaridan zaryad chiqarilishi Shockley–Read–Hall mexanizmi bilan tavsiflanadi. Biroq real dielektrik tizimlarda zaryad tashuvchilarning fononlar bilan kuchli o'zaro ta'siri tufayli ushbu jarayon non-radiative multiphonon modeli bilan to'ldirildi [3]. Natijada zaryad chiqarilish tezligi quyidagi ko'rinishga ega bo'ldi:

$$e(E_a, F) = e_0 \exp\left(-\frac{E_a - \gamma F}{kT}\right) \quad (3)$$

Bu ifoda zaryad chiqarilish ehtimoli aktivatsiya energiyasiga eksponensial bog'liq ekanini va tashqi elektr maydon yoki bosim orqali samarali to'siq balandligi kamaytirilishi mumkinligini ko'rsatadi. Muhim jihat shundaki, tashqi ta'sirlar aktivatsiya energiyasining o'zini o'zgartirmaydi, balki zaryad almashinuvi ehtimolini modifikatsiyalaydi. Real interfeys tizimlarida zaryad tutib qoluvchi holatlari yagona aktivatsiya energiyasiga ega emas. Aksincha, ular keng energetik diapazonda taqsimlangan bo'ladi. Shu sababli zaryad relaksatsiyasi bitta vaqt konstantasi bilan emas, balki vaqt konstantalarining uzluksiz spektri bilan tavsiflanadi. Bu holat quyidagi integral ifoda orqali ifodalandi:

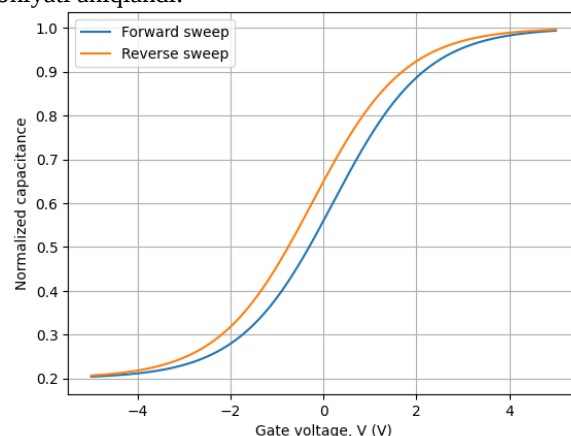
$$Q(t) = \int g(E_a) \exp[-t/\tau(E_a)] dE_a \quad (4)$$

$$\tau(E_a) = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (5)$$

Mazkur integralning mavjudligi zaryad relaksatsiyasining oddiy eksponenta qonuniga bo'ysunmasligini, balki cho'zilgan eksponenta xatti-harakati bilan tavsiflanishini tushuntiradi. Ushbu matematik natija eksperimental relaksatsiya egri chiziqlari bilan

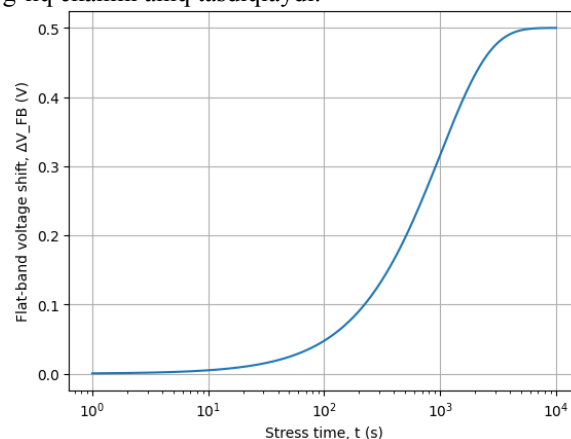
bevosita solishtirildi va interfeys hamda chegara zaryad tutib qoluvchi holatlarining fizik rolini aniqlashda asosiy vosita bo'lib xizmat qildi. Ushbu holatda ishlab chiqilgan energetik va kinetik model metall–dielektrik–yarimo'tkazgich interfeysida sodir bo'ladigan barcha asosiy jarayonlarni yagona fizik doirada tavsiflash imkonini beradi.

Muhokama va tadqiqot natijalari. Ishlab chiqilgan energetik va kinetik model eksperimental natijalar asosida tekshirildi va aniqlashtirildi. Sig'im–kuchlanish xarakteristikalarini, tekis-tasma kuchlanishining vaqt bo'yicha o'zgarishi hamda zaryad relaksatsiyasi natijalari interfeys va chegara zaryad tutib qoluvchi holatlarining zaryad almashinuvi jarayonlarini turli vaqt masshtablarida ochib berdi [4]. Har bir eksperimental kuzatuv nazariy model bilan bevosita bog'lanib, ularning umumiy fizik mohiyati aniqlandi.



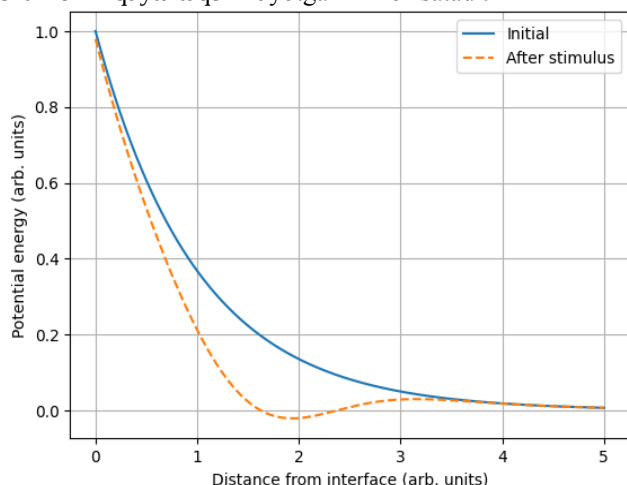
1-rasm. C – V gisterezisi

Sig'im–kuchlanish o'lchovlarida kuzatilgan gisterezis interfeys zaryad tutib qoluvchi holatlarining kinetik xususiyatlarini tavsiflovchi eng sezgir ko'rsatkichlardan biri hisoblanadi. 1-rasmida ko'rsatilgan C – V xarakteristikalarining oldinga va orqaga kuchlanish grafiklari orasida aniq farq mavjudligini namoyon qiladi. Ushbu farq interfeys holatlarida zaryadning kuchlanish o'zgarishiga nisbatan kechikib chiqarilishi bilan bog'liq. Muhim jihat shundaki, gisterezis mavjud bo'lishiga qaramay, maksimal va minimal sig'im qiymatlarining deyarli o'zgarmasligi dielektrik qatlam yoki yarimo'tkazgichning hajmiy xossalari o'zgarmaganini ko'rsatadi. Bu natija gisterezisning kelib chiqishi hajmiy nuqsonlar bilan emas, balki interfeysga xos zaryad almashinuvi jarayonlari bilan bog'liq ekanini aniq tasdiqlaydi.



2-rasm. ΔV_{FB} ning tashqi ta'sir davomiyligiga bog'liqligi

C–V gisterezisi bilan bevosita bog‘liq holda tekis-tasma kuchlanishining vaqt bo‘yicha grafigi orqali ham muhim kuzatish mumkin. 2-rasmda ko‘rsatilganidek, tekis-tasma kuchlanishi tashqi ta’sir davomiyligi oshishi bilan ortadi va ma’lum vaqt oralig‘ida to‘yinganlik xatti-harakatini namoyon qiladi. Ushbu to‘yinganlik interfeys holatlarining cheklangan energetik va fazoviy diapazonga ega ekanini ko‘rsatadi. Agar tashqi ta’sirlar yangi nuqsonlar hosil qilayotgan bo‘lsa, tekis-tasma kuchlanishining siljishi vaqt o‘tishi bilan davomli ravishda ortib borishi kutilardi. Biroq kuzatilgan to‘yinganlik hodisasi tashqi ta’sirlar mavjud interfeys holatlarining zaryad almashinuvida ishtirok etish ehtimolini qayta taqsimlayotganini ko‘rsatadi.



3-rasm. Interfeys yaqinidagi potentsial relyef modifikatsiyasi

Yuqoridagi barcha eksperimental kuzatuvlar interfeys yaqinidagi lokal potentsial relyef tushunchasi orqali yagona fizik mexanizm doirasida tushuntiriladi. 3-rasmda ko‘rsatilganidek, tashqi ta’sirlar interfeys yaqinidagi potentsial relyefni modifikatsiyalaydi. Ushbu modifikatsiya zaryad tutib qoluvchi holatlarining energetik chuqurligini o‘zgartirmaydi, biroq zaryad tashuvchilar uchun samarali tunnel va emissiya yo‘llarini qayta tashkil etadi [5]. Natijada ayrim interfeys va chegara holatlari zaryad almashinuvida faolroq ishtirok eta boshlaydi, boshqalari esa vaqtinchalik passiv holatga o‘tadi. Shu tarzda, C–V gisterezisi, tekis-tasma kuchlanishining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi va zaryad relaksatsiyasi bir-biridan mustaqil hodisalar emas, balki interfeys zaryad tutib qoluvchi holatlarining tashqi ta’sirlar ostida qayta konfiguratsiyalanishining turli vaqt masshtablaridagi namoyon bo‘lishidir. Keltirilgan eksperimental natijalar va ularning fizik talqini oldingi ishlab chiqilgan nazariy modelning to‘g‘riligini tasdiqlaydi va keyingi

umumlashtiriladigan yagona fizik konsepsiya uchun mustahkam asos yaratdi.

Keltirilgan nazariy yondashuv va eksperimental natijalar metall–dielektrik–yarimo‘tkazgich tuzilmalarida kuzatiladigan sig‘im–kuchlanish gisterezisi hamda zaryad relaksatsiyasi hodisalari o‘zaro mustaqil jarayonlar emasligini ko‘rsatadi. Aksincha, ushbu hodisalar interfeys va interfeysga yaqin dielektrik qatlamda joylashgan chegara zaryad tutib qoluvchi holatlarining tashqi ta’sirlar ostida qayta konfiguratsiyalanishining turli vaqt masshtablarida namoyon bo‘lishi sifatida qaralishi mumkin [6]. Shu nuqtayi nazardan, olingan barcha natijalar yagona fizik konsepsiya doirasida umumlashtirildi. Avvalgi muhokama qilingan C–V gisterezisi interfeys zaryad tutib qoluvchi holatlarining zaryad almashinuvida kinetik cheklovlar mavjudligini aniq namoyon etadi. Oldinga va orqaga kuchlanish skanerlari orasidagi farq interfeys holatlarining zaryadni o‘lchov vaqt masshtabida muvozanatga keltira olmasligi bilan bog‘liq. Muhim jihat shundaki, gisterezis mavjud bo‘lishiga qaramay, maksimal va minimal sig‘im qiymatlarining deyarli o‘zgarmasligi dielektrik yoki yarimo‘tkazgichning hajmiy xossalari saqlanib qolganini ko‘rsatadi. Bu esa kuzatilgan effektning hajmiy nuqsonlar bilan emas, balki interfeysga xos kinetik jarayonlar bilan bog‘liq ekanini tasdiqlaydi.

Xulosa. Mazkur ishda metall–dielektrik–yarimo‘tkazgich tuzilmalarida interfeys va interfeysga yaqin dielektrik qatlamda joylashgan zaryad tutib qoluvchi holatlarning elektr xatti-harakatga ta’siri chuqur fizik nuqtayi nazardan tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari sig‘im–kuchlanish gisterezisi, tekis-tasma kuchlanishining vaqt bo‘yicha evolyutsiyasi va zaryad relaksatsiyasi kabi noideal hodisalar o‘zaro bog‘liq bo‘lib, interfeys zaryad tutib qoluvchi holatlarining yagona fizik mexanizmi bilan izohlanishini ko‘rsatdi. Eksperimental natijalar sig‘im–kuchlanish gisterezisi hajmiy nuqsonlar yoki dielektrik degradatsiyasi bilan emas, balki interfeys holatlarida zaryad almashinuvi muvozanatga ulgurmasligi bilan bog‘liq ekanligini ko‘rsatdi. Tekis-tasma kuchlanishining vaqt bo‘yicha to‘yinganlik xatti-harakati esa tashqi ta’sirlar yangi nuqsonlar hosil qilmasdan, mavjud interfeys holatlarining qayta taqsimlanishiga olib kelishini tasdiqlaydi. Ushbu ishda taklif etilgan interfeys holatlarining qayta konfiguratsiyasi konsepsiyasi interfeys yaqinidagi lokal potentsial relyefning modifikatsiyasi orqali zaryad almashinuvi jarayonlarini yagona fizik mexanizm doirasida tushuntiradi. Ushbu yondashuv interfeys jarayonlarini nafaqat nuqsonlar zichligi, balki ularning kinetik va fazoviy xossalari orqali tavsiflash zarurligini ko‘rsatadi.

Adabiyotlar

1. Fleetwood D.M. Border traps in MOS devices. // IEEE Transactions on Nuclear Science, 62(4), 2015. –P. 1462-1486.
2. Grasser T., et al. The universality of charge trapping in oxides. // Microelectronics Reliability, 52(1), 2012. –P. 39-70
3. Kuchkarov B., Mamatkarimov O., and Abdulkhayev A. Influence of the ultrasonic irradiation on characteristics of metal–glass–semiconductor structures. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 614, Art. №012027, 2020.
4. Mamatkarimov O.O., Kuchkarov B.H., Sharibaev N.Yu., Abdulkhayev A. A. Influence of the ultrasonic irradiation on characteristic of the structures metal–glass–semiconductor. // European Journal of Molecular and Clinical Medicine, vol. 8, no. 1, 2021.
5. Kuchkarov B.K., Mamatkarimov O.O., Abdulkhayev A.A. Relaxation dependence of the capacity of a three-layer structure in the process of charge formation of an inversion layer. // Scientific Bulletin of Namangan State University, vol. 1, №6, 2019. – P. 26-33.
6. Kuchkarov B., Abdulkhayev A. Factors providing the efficiency of semiconductor lasers. // Scientific Bulletin of Namangan State University, vol. 3, №5, 2021. – P. 48-52.