Abdulxayev Abrorbek Abdulloxon o‘g‘li (Namangan davlat texnika universiteti, fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD),
Mamatkarimov Odiljon Oxundedaevich (Namangan davlat texnika universiteti, fizika-matematika fanlari doktori, professor),
Nosirdinov Islomiddin Qutpiddin o‘g‘li (mustqil tadiqqotchi, Namangan davlat texnika universiteti),
Quchqarov Behzod Hoshimjonovich (Impuls tibbiyoti instituti, fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent)

MEXANIK BOSIM VA ULTRATOVUSHNING BIRGALIKDAGI TA’SIRI OSTIDA METALL–SHISHA–YARIMO‘TKAZGICH STRUKTURALARDA ZARYAD RELAKSATSIYASI VA SIRT HOLATLARI DINAMIKASI

Annotatsiya. *Metall–shisha–yarimo‘tkazgich strukturalarning elektrofizik xossalari interfeysdagi sirt holatlari va zaryad tashuvchilar dinamikasi bilan belgilanadi. Ushbu ishda mexanik bosim va ultratovushning alohida hamda kombinatsiyalangan ta’siri yuqori chastotali volt–farad xarakteristikalari va sig‘im relaksatsiyasi usullari orqali tadqiq etildi. Kombinatsiyalangan ta’sir sirt holatlari zichligini kamaytirib, zaryad relaksatsiyasini tezlashtirishi aniqlandi. Ushbu natijalarni izohlash uchun atomlararo bog‘larning qayta konfiguratsiyalanishiga asoslangan fizik model va chegara sohasining holatini baholovchi dinamik barqarorlik koeffitsiyenti taklif qilindi. Natijalar MSHY strukturalarning interfeys xossalarini mexanik va akustik ta’sirlar orqali boshqarish mumkinligini ko‘rsatdi.*

Kalit so‘zlar*: metall–shisha–yarimo‘tkazgich strukturalar, mexanik bosim, ultratovush, sirt holatlari zichligi, zaryad relaksatsiyasi, volt–farad xarakteristikalar, sig‘im relaksatsiyasi, sinergetik effekt.*

Абдулхаев Аборбек Абдуллохон угли (Наманганский государственный технический университет, доктор философии (PhD) по физико-математическим наукам),
Маматкаримов Одилжон Охундедаевич (Наманганский государственный технический университет, доктор физико-математических наук, профессор),
Носирдинов Исломиддин Кутпиддин угли (Независимый исследователь, Наманганский государственный технический университет),
Кучкаров Бехзод Хошимжонович ([2]Институт импульсной медицины, доктор философии (PhD) по физико-математическим наукам, доцент)

РЕЛАКСАЦИЯ ЗАРЯДА И ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ–СТЕКЛО–ПОЛУПРОВОДНИК ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И УЛЬТРАЗВУКА

Аннотация. *Металл–диэлектрик–полупроводниковые структуры характеризуются электрофизическими свойствами, определяемыми состояниями поверхности на границе раздела и динамикой носителей заряда. В данной работе отдельное и комбинированное воздействие механического давления и ультразвука исследовано с использованием высокочастотных вольт–фарадных характеристик и методов релаксации ёмкости. Установлено, что комбинированное воздействие приводит к снижению плотности поверхностных состояний и ускорению релаксации заряда. Для интерпретации полученных результатов предложена физическая модель, основанная на реконфигурации межатомных связей, а также введён коэффициент динамической стабильности, характеризующий состояние пограничной области. Полученные результаты показывают возможность управления интерфейсными свойствами МДП-структур посредством механических и акустических воздействий.*

Ключевые слова: *металл–диэлектрик–полупроводниковые структуры, механическое давление, ультразвук, плотность поверхностных состояний, релаксация заряда, вольт–фарадные характеристики, релаксация ёмкости, синергетический эффект.*

Abdulkhayev Abrorbek Abdullokhon ugli (Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical Sciences),
Mamatkarimov Odiljon Okhundedaevich (Independent Researcher Namangan State Technical, University Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor),
Nosirdinov Islomiddin Khutpiddin ugli (Independent Researcher Namangan State Technical University),
Quchqarov Behzod Hoshimjonovich (Institute of Impulse Medicine, Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor)

CHARGE RELAXATION AND SURFACE-STATE DYNAMICS IN METAL–GLASS–SEMICONDUCTOR STRUCTURES UNDER THE COMBINED ACTION OF MECHANICAL PRESSURE AND ULTRASOUND

Annotation. *The electrophysical properties of metal–dielectric–semiconductor structures are determined by the surface states at the interface and the dynamics of charge carriers [5–11]. In this work,*

the individual and combined effects of mechanical pressure and ultrasound were investigated using high-frequency capacitance–voltage characteristics and capacitance relaxation methods. It was found that the combined effect reduces the density of surface states and accelerates charge relaxation. To interpret these results, a physical model based on the reconfiguration of interatomic bonds and a dynamic stability coefficient for assessing the state of the interfacial region were proposed. The results demonstrate the possibility of controlling the interface properties of MDS structures through mechanical and acoustic effects.

Keywords: *metal–dielectric–semiconductor structures, mechanical pressure, ultrasound; surface state density, charge relaxation, capacitance–voltage characteristics, capacitance relaxation, synergistic effect.*

Kirish. Zamonaviy mikroelektronika va sensor texnologiyalarida metall–dielektrik–yarimo‘tkazgich hamda metall–shisha–yarimo‘tkazgich strukturalarning ishonchliligi va tashqi ta’sirlarga barqarorligi muhim ahamiyatga ega. Ularning elektrofizik xossalari yarimo‘tkazgich–dielektrik chegara sohasidagi sirt holatlari, fazoviy zaryad va zaryad tashuvchilar dinamikasi bilan belgilanadi [5;11-b.]. Mexanik bosim va ultratovushning ushbu strukturalarga ta’siri bo‘yicha tadqiqotlarda interfeys xususiyatlari, elektr parameterlar va zaryad jarayonlarining o‘zgarishi aniqlangan [1;5-b.]. Biroq mazkur ta’sirlar, asosan, alohida o‘rganilgan bo‘lib, ularning birgalikdagi ta’sirida yuzaga keladigan sinergetik effektlar yetarli darajada tadqiq etilmagan. Shu sababli metall–shisha–yarimo‘tkazgich strukturalarda mexanik bosim va ultratovushning kombinatsiyalangan ta’siri ostida sirt holatlari zichligi hamda zaryad tashuvchilar relaksatsiyasining o‘zgarish qonuniyatlarini aniqlash dolzarb ilmiy masala hisoblanadi. Olingan natijalar interfeys jarayonlarini boshqarish va mikroelektron qurilmalarning elektrofizik parametrlarini optimallashtirish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi [5;11-b.].

Tajriba usullari. Tadqiqot obyekti sifatida metall–shisha–yarimo‘tkazgich (MSHYa) strukturalar tanlandi. Yarimo‘tkazgich sifatida n-turdagi, <100> yo‘nalishli kremniy plastinalar, dielektrik qatlam sifatida qo‘rg‘oshin–bor–silikatli shisha, metall elektrod sifatida vakuumda bug‘lantirish usulida hosil qilingan alyuminiy qo‘llanildi [1,3]. Mexanik ta’sir bosqichma-bosqich statik bosim berish, ultratovushli ta’sir esa maxsus generator yordamida megagers diapazonidagi chastotalarda amalga oshirildi. Tajribalar uch rejimda: 1) mexanik bosim; 2) ultratovush; 3) mexanik bosim va ultratovushning birgalikdagi ta’sirida olib borildi. MSHYa strukturalarning elektrofizik xossalari yuqori chastotali volt–farad (C–V) xarakteristikalar va sig‘im relaksatsiyasi usullari yordamida tadqiq etildi. C–V o‘lchovlari orqali fazoviy zaryad sohasi parametrlari va sirt holatlari zichligi aniqlandi [5–11]. Fazoviy zaryad sohasi kengligi klassik ifoda yordamida hisoblandi:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V - V_{fb})}{qN}}$$

bu yerda: ε_s –dielektrik singdiruvchanligi; V – qo‘llangan kuchlanish; V_{fb} –zonalar kuchlanishi; q – zaryad; N– legirlash konsentratsiyasi.

Chegara sohasidagi sirt holatlari zichligi yuqori chastotali C–V xarakteristikalar asosida quyidagi ifoda orqali aniqlandi [5–7,9–11]:

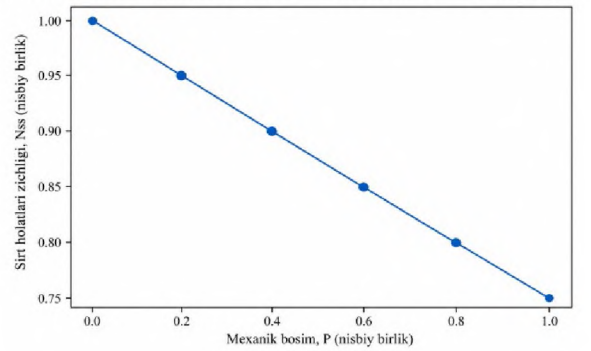
$$N_{ss} = \frac{C_{ox}}{q}\left(\frac{dV}{d\psi_s} - 1\right)$$

bu yerda: C_{ox} – dielektrik qatlam sig‘imi; $d\psi_s$ – sirt potensiali.

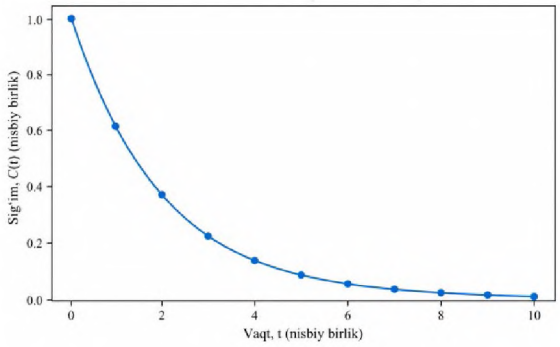
Sig‘im relaksatsiyasi usuli yordamida vaqt bo‘yicha sig‘imning o‘zgarishi tahlil qilinib, zaryad tashuvchilar relaksatsiyasi jarayonlarining xarakterli vaqt konstantalari baholandi [1,2,6,9]. Olingan tajriba natijalari standart matematik va grafik tahlil usullari yordamida qayta ishlanib, sirt holatlari zichligi hamda relaksatsiya parametrlari mexanik bosim va ultratovush amplitudasiga bog‘liq holda aniqlandi [1;11-b.]. Mexanik bosim va ultratovushning birgalikdagi ta’siri natijalari alohida ta’sirlar bilan taqqoslanib, sinergetik effekt mavjudligi baholandi.

Natijalar va muhokama. Mexanik bosim va ultratovushning metall–shisha–yarimo‘tkazgich strukturalar chegara sohasidagi fizik jarayonlarga ta’siri volt–farad xarakteristikalari va sig‘im relaksatsiyasi o‘lchovlari asosida tadqiq etildi. Natijalar sirt holatlari zichligi hamda zaryad relaksatsiyasi jarayonlarining

tashqi ta’sirlarga yuqori sezgirligini ko‘rsatdi [1;5-b.,7;11-b.]. Mexanik bosim ta’sirida sirt holatlari zichligining o‘zgarishi 1-rasmda keltirilgan. Bosim ortishi bilan sirt holatlari zichligi N_s ning monoton kamayishi kuzatildi. Mazkur o‘zgarish mexanik bosimning chegara sohasidagi defektlar va atomlararo bog‘lanishlar holatiga ta’siri bilan izohlanishi mumkin [3–5].

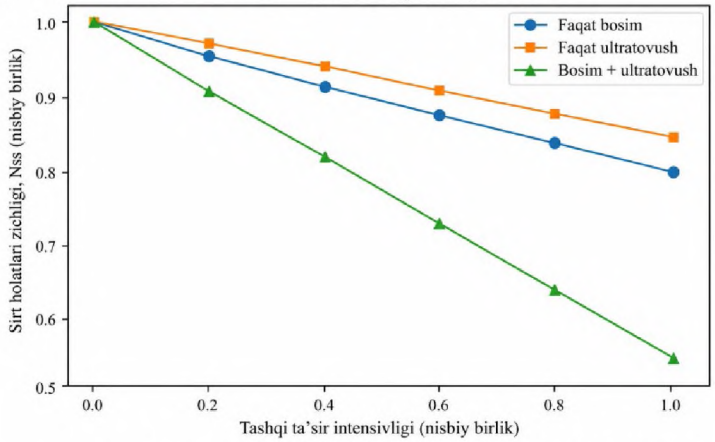


1-rasm. Mexanik bosimning sirt holatlari zichligiga ta’sir.



2-rasm. Ultratovush ta’sirida sig‘im relaksatsiyasi.

Bosimning ortishi yarimo‘tkazgich–shisha chegara sohasidagi bog‘lanishlar va defektlar konfiguratsiyasining qayta tashkil topishiga olib kelishi mumkin [3;5-b.]. Interfeys holatlari va traplar strukturaning elektrofizik parametrlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi [5;11-b.]. Ayrim sirt holatlarining deaktivatsiyalanishi yoki neytrallanishi N_s ning kamayishi va fazoviy zaryad sohasi parametrlarining o‘zgarishiga sabab bo‘lishi mumkin. 1-rasmda kuzatilgan N_s ning kamayishi mexanik bosimning interfeys jarayonlariga ta’sirini ko‘rsatadi. Natijalar avvalgi tadqiqotlar bilan mos keladi [3;5-b.]. Ultratovushli ishlov berishda zaryad relaksatsiyasi 2-rasmdagi sig‘imning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi orqali tahlil qilindi. Sig‘imning eksponensial kamayishi ultratovush ta’sirida relaksatsiya tezlashishi va xarakterli vaqt konstantasining qisqarishini ko‘rsatadi [1,2]. Bu jarayon interfeys traplarining qayta tashkil topishi va zaryad tutqichlarining bo‘shashish tezligi ortishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin [5;11-b.]. Ultratovush ta’sirida hosil bo‘ladigan akustik tebranishlar chegara sohasidagi defektlar holati va taqsimotiga ta’sir qilishi mumkin [1,2]. Mexanik bosim va ultratovushning kombinatsiyalangan ta’siri natijalari 3-rasmda keltirilgan. Unda mexanik bosim, ultratovush hamda ularning birgalikdagi ta’siri uchun N_s ning o‘zgarishi taqqoslangan.



3-rasm. Bosim va ultratovushning sinergetik ta’siri.

Mexanik bosim va ultratovushning birgalikdagi ta’siri \(N_s\) ning eng katta kamayishiga olib kelishi aniqlandi. Kombinatsiyalangan ta’sirdagi o‘zgarishlarning alohida ta’sirlardagidan kattaligi sinergetik effektni ko‘rsatadi. Ushbu effekt mexanik deformatsiya va akustik tebranishlar natijasida interfeysdagi bog‘lanishlar va defektlarning qayta tashkil topishi bilan izohlanishi mumkin [1;5-b.;7;11-b.]. Interfeys traplari va defektlarining qayta konfiguratsiyalanishi sirt holatlari zichligi hamda zaryad tashuvchilar dinamikasini o‘zgartirib, relaksatsiya jarayonlarini tezlashtiradi [5;11-b.]. Natijalar MSHYa strukturalarning elektrofizik xossalarini tashqi mexanik va akustik ta’sirlar yordamida boshqarish mumkinligini ko‘rsatadi [1,2,5;11-b.]. Kombinatsiyalangan tashqi ta’sirlar ostida chegara sohasining holatini miqdoriy baholash uchun quyidagi dinamik barqarorlik koeffitsienti taklif etildi:

$$K_d = \frac{\Delta N_{ss}}{\Delta P \cdot A_{US}}$$

Mazkur koeffitsient mexanik bosim va ultratovush ta'siri ostida sirt holatlari zichligining o'zgarish darajasini tavsiflaydi. Tajriba natijalari K_d ning o'zgarishi sirt holatlari zichligining pasayishi va zaryad relaksatsiyasi jarayonlarining barqarorlashuvi bilan bog'liqligini ko'rsatdi. Bu koeffitsiyent ushbu tadqiqot doirasida taklif etilgan yangi parametr bo'lganligi sababli uning o'ziga [1;11-b.] havolasini qo'yish kerak emas. Aksincha, formuladan keyin uning fizik ma'nosini o'zingizning natijalaringiz asosida tushuntirish to'g'ri.

Xulosa. Mazkur ishda metall–shisha–yarimo'tkazgich strukturalarda mexanik bosim va ultratovushning alohida hamda birgalikdagi ta'siri ostida sirt holatlari zichligi va zaryad tashuvchilar relaksatsiyasi tajribaviy tadqiq etildi. Natijalar mexanik bosim ortishi bilan sirt holatlari zichligi kamayishi, ultratovush ta'sirida esa zaryad relaksatsiyasi tezlashib, xarakterli vaqt konstantalari qisqarishini ko'rsatdi. Mexanik bosim va ultratovushning birgalikdagi ta'sirida sirt holatlari zichligining alohida ta'sirlarga nisbatan kuchliroq kamayishi kuzatilib, sinergetik effekt aniqlandi. Bu hodisa interfeysdagi atomlararo bog'lanishlar va defektlarning qayta konfiguratsiyalanishi bilan izohlanadi. Chegara sohasi holatini miqdoriy baholash uchun dinamik barqarorlik koeffitsiyenti taklif etildi. U sirt holatlari zichligi va tashqi ta'sir intensivligi o'rtasidagi bog'lanishni ifodalaydi. Olingan natijalar MSHY strukturalarning elektrofizik xossalarini mexanik va akustik ta'sirlar yordamida boshqarish mumkinligini ko'rsatdi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

[1]. B.Kuchkarov, O.Mamatkarimov, A.Abdulkhayev. "Influence of the ultrasonic irradiation on characteristic of the structures metal-glass-semiconductor". IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 614, 012027, 2020.

[2]. A.Gorb, O.A.Korotchenkov, O.Y.Olikh, A.O.Podolian, R.G.Chupryna. "Influence of γ-irradiation and ultrasound treatment on current mechanism in Au-SiO_2-Si structure," Solid-State Electron., vol. 165, 107712, 2020.

[3]. S.Z.Zainabidinov, S.I.Vlasov, D.E.Nazirov. "Influence of Pressure on the Properties of Metal-Glass-Semiconductor Structures Based on Silicon Doped with Gadolinium," Science and World, vol. I, № 12(88), 2020.

[4]. W.Rzodkiewicz, K.Roman. "The physical parameters of MOS structures in the presence of local mechanical stress." Measurement, vol. 235, 115009, 2024.

[5]. M.Chaturvedi, S.Dimitrijev, D.Haasmann, H.Amini Moghadam, P.Pande, U.Jadli. "Quantified density of performance-degrading near-interface traps in SiC MOSFETs." Sci. Rep., vol. 12, 4076, 2022.

[6]. Z Wang, Z.Lin, M.Si, P.D.Ye. "Characterization of Interface and Bulk Traps in Ultrathin Atomic Layer-Deposited Oxide Semiconductor MOS Capacitors with HfO_2/In_2O_3 Gate Stack by C-V and Conductance Method." Front. Mater., vol. 9, 850451, 2022.

[7]. Y.Yan, V.Kilchytska, D.Flandre, J.-P.Raskin. "Investigation and optimization of traps properties in Al_2O_3/SiO_2 dielectric stacks using conductance method." Solid-State Electron., vol. 194, 108347, 2022.

[8]. Y.Yan, V.Kilchytska, D.Flandre, J.-P.Raskin. "Analysis of trap distribution and NBTI degradation in Al_2O_3/SiO_2 dielectric stack." Solid-State Electron., vol. 207, 108675, 2023.

[9]. L.Wu, J.Liang, M.Zhang, M.Liu, T.Zhang, G.Yang, X.Song. "An approach for extracting the SiC/SiO_2 SiC MOSFET interface trap distribution and study during short circuit." Mater. Sci. Semicond. Process., vol. 163, 107581, 2023.

[10]. Y.Raffel, R.O.Revello Olivo, M.Simon, L.Vieler, R.Hoffmann, S.De, T.Kämpfe, K.Seidel, M.W. Lederer. "Importance of temperature dependence of interface traps in high-k metal gate stacks for silicon spin-qubit development." Appl. Phys. Lett., vol. 123, 034002, 2023.

[11]. E.Brzozowski, M.Kaminski, A.Taube, O.Sadowski, K.Krol, M.Guziewicz. "Carrier Trap Density Reduction at SiO_2/4H-Silicon Carbide Interface with Annealing Processes in Phosphoryl Chloride and Nitride Oxide Atmospheres." Materials, vol. 16, 4381, 2023.

Матякубов Зокирбек Кадамбевич (доцент кафедры «Математический анализ» Ургенчского государственного университета имени Абу Райхана Беруни, ORCID iDs: https://orcid.org/0009-0003-2310-1410; E-mail: zokirbekmatyakubov@gmail.com)

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТИПА КАРЛЕМАНА В МАТРИЧНЫХ ПОЛИКРУГАХ

Аннотация. *В данной статье доказана интегральная формула типа Карлемана для матричного поликруга, состоящего из декартова произведения классических областей III типа. На основе свойств ядра Коши–Сегё и автоморфизмов областей изучена задача голоморфного продолжения для матриц четной и нечетной размерности. Полученные формулы служат для решения некорректных задач Коши для эллиптических систем в пространстве кососимметрических матриц.*