(11). Shukurov Z., Navruzov K., Turaev M., Abdikarimov N. Laminar unsteady flow of a viscoelastic liquid in a flat channel. E3S Web of Conferences 587, 01014 (2024), p. 1–10.
(12). Urbanowiz K., Tijsseling A.S. Ten years of Passion: I.S.Gromeka's contribution to Science. Fluids, 2024. 9.57, p. 1–18.
(13). Чернышов А.Д. Нестационарное течение вязкой жидкости в трубе треугольного сечения. МЖГ, 1998, № 5, с. 199–203.
(14). Navruzov K., Rajabov S., Abdikarimov N., Turdimurodov O., Nasrulloev. R, Study of non-stationary flow of viscoelastic incompressible fluid in a flat channel. E3S Web of Conferences 587, 01012 (2024), p. 1–13.
(15). Громека И.С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубах. Казань, издание университетской типографии, 1882, с. 41–72.
(16). Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М., Гостехиздат, 1956, 520 с.
(17). Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. М., Гостехиздат, 1954, 420 с.
(18). Чарный И.А. Неустановившееся течение в реальной жидкости в трубах. М., "Недра", 1975, с. 296.
(19). Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидромеханика. М.," Наука",1986, с. 736.
(20). Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М., "Машиностроение", 1982, 424 с.
(21). Лойцянский Л.Г. МЖГ, Дорфа, М., 2003, 786 с.

Jabborova Mahfuza Sohib qizi (O'zbekiston Milliy universiteti magistranti;
e-mail: mahfuzasohibovana@gmail.com)

PAST ENERGIYALI MOLIBDEN IONLARI KIRITILGAN KREMNIY SIRTINING FOTOEMISSION XUSUSIYATLARI

Annotatsiya. *Kremniy asosidagi qurilmalarning emissiv xossalarini optimallashtirish optoelektronikadagi dolzarb vazifalardan biri bo'lib kelmoqda. Ushbu maqsadda, yuqori vakuum sharoitida n-tur Si (111) sirtiga past energiyali (3 keV) molibden ionlari kiritildi va modifikatsiyalangan sirt UFES usulida tahlil qilindi. Fauler–Keyn nazariyasi asosida o'tkazilgan o'lchovlar shuni ko'rsatdiki, sirtda hosil bo'lgan yangi gibridlangan sathlar hisobiga chiqish ishi 4,11 eVdan 4,03 eVgacha pasaydi. Sirt potensial to'sig'ini bunday maqsadli pasaytirish yuqori samarali quyosh elementlari va sezgir fotodetektorlar yaratishda yordamchi nazariy-texnologik asos bo'lib xizmat qiladi.*

Kalit so'zlar: *kremniy, molibden, implantatsiya, fotoelektron emissiya, kvant chiqishi, chiqish ishi, Fauler–Keyn nazariyasi.*

Жабборова Махфуза Сохиб кизи (Национальный университет Узбекистана, магистрант;
e-mail: mahfuzasohibovana@gmail.com)

ФОТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ МОЛИБДЕНА

Аннотация. *Оптимизация эмиссионных свойств кремниевых приборов остается одной из актуальных задач оптоэлектроники. С этой целью в условиях высокого вакуума была проведена имплантация низкоэнергетических (3 кэВ) ионов молибдена в поверхность Si(111) n-типа, а модифицированная поверхность исследована методом УФЭС. Измерения, проведенные на основе теории Фаулера-Кейна, показали, что за счет образования новых гибридизированных уровней на поверхности работа выхода снизилась с 4,11 эВ до 4,03 эВ. Такое целенаправленное снижение поверхностного потенциального барьера служит вспомогательной теоретико-технологической основой для создания высокоэффективных солнечных элементов и чувствительных фотодетекторов.*

Ключевые слова: *кремний, молибден, имплантация, фотоэлектронная эмиссия, квантовый выход, работа выхода, теория Фаулера-Кейна.*

Jabborova Makhfuza Sohib qizi (National University of Uzbekistan, Master's student;
e-mail: mahfuzasohibovana@gmail.com)

PHOTOEMISSION PROPERTIES OF SILICON SURFACE IMPLANTED WITH LOW-ENERGY MOLYBDENUM IONS

Annotation. *Optimizing the emissive properties of silicon-based devices remains a pressing task in modern optoelectronics. For this purpose, low-energy (3 keV) molybdenum ions were implanted into an n-type Si(111) surface under high vacuum conditions, and the modified surface was analyzed using the UPS method. Measurements based on the Fowler-Kane theory demonstrated that the work function decreased from 4.11 eV to 4.03 eV due to the formation of new hybridized levels at the surface. Such a targeted reduction of the surface potential barrier serves as a supporting theoretical and technological foundation for the development of high-efficiency solar cells and sensitive photodetectors.*

Keywords: *silicon, molybdenum, implantation, photoelectron emission, quantum yield, work function, Fowler-Kane theory.*

Kirish. Zamonaviy optoelektronikada kremniy asosidagi qurilmalarning emissiv ko'rsatkichlarini optimallashtirish dolzarb ahamiyatga ega. Sirt xossalarini boshqarishda an'anaviy yuqori energiyali ion implantatsiyasi moddaning chuqur amorfizatsiyasiga va elektron xususiyatlarning yomonlashuviga olib kelishi sohadagi ochiq ilmiy muammo hisoblanadi.

Tadqiqotning maqsadi o'ta yuqori vakuum sharoitida toza Si sirtiga past energiyali molibden ionlarini kiritish orqali yuz beradigan elektrofizik o'zgarishlarni o'rganishdir. Tadqiqot obyekti sifatida n-tur Si(111) sirti, predmeti sifatida esa uning modifikatsiyalangan fotoemission xususiyatlari olindi.

Ishning ilmiy yangiligi shundan iboratki, past energiyali ionlar ta'sirida kremniyning hajmiy tuzilishi saqlangan holda, sirtqi qatlamda hosil bo'luvchi yangi gibridlangan energetik sathlar hisobiga chiqish ishining pasayish mexanizmi ilmiy isbotlandi. Olingan natijalar sirt potensial to'sig'ini maqsadli boshqarish orqali yuqori samarali fotodetektorlar va quyosh elementlarini yaratishda muhim amaliy ahamiyat kasb etadi.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. Qattiq jismlarda fotoemissiyaning kvant chiqishi yorug'lik energiyasiga bog'liqligi $Y = A(h\nu - \varphi)^n$ Fauler tenglamasi orqali o'rganiladi[2]. Bu yerdagi n daraja electronlarning zona ichidagi optik o'tish turiga chambarchas bog'liq. Garchi bu nazariya erkin elektronlar gazi modeli asosida metallar uchun yaratilgan bo'lsa-da, sirtidan elektron emissiyasi kuzatiladigan ayrim yarim-o'tkazgich tizimlarida ham uni moslashtirilgan holda qo'llash Fauler-Keyn nazariyasiga asoslandi.

Ma'lumki, kremniy noto'g'ri zonali yarimo'tkazgich hisoblanadi [3]. E.Keyn nazariyasiga muvofiq, bunday materiallarda fotoelektronlarning optik o'tishi fononlar ishtirokida, ya'ni, elektron impulsining o'zgarishi bilan kechgani sababli, elektronlarning vakuumga chiqish ehtimolligi xuddi metallardagi kabi parabolik $Y = A(h\nu - \varphi)^2$ qonuniyatiga qat'iy bo'ysunadi, ya'ni n=2 [1,2].

Bundan tashqari, sirtga qiyin eruvchan molibden ionlari implantatsiya qilinganda, sirtqi qatlamda amorfizatsiya yuzaga kelishi, nuqsonlar va yangi gibridlangan sathlar paydo bo'lishi hisobiga sirt o'ziga xos tarzda metallashadi.

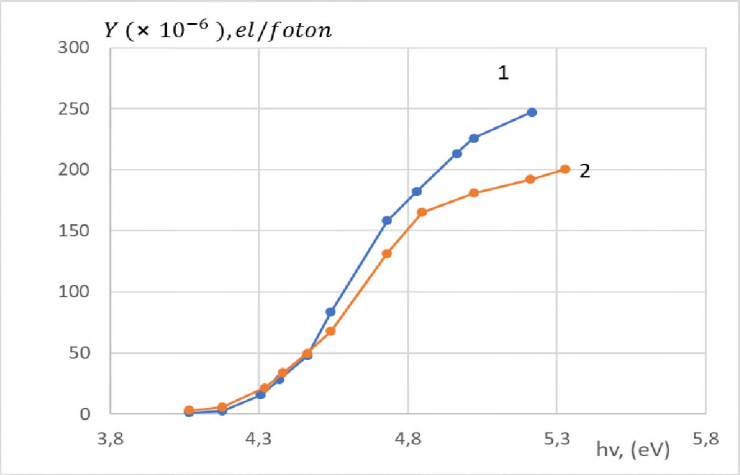
Tadqiqot metodikasi. Tadqiqot obyekti sifatida qalinligi 2 mm va diametri 8 mm bo'lgan KEF-2 markali kremniy Si (111) monokristall namunasi tanlab olindi. Dastlab, namuna mexanik va kimyoviy tozalash bosqichlaridan o'tkazilib ishlov berildi. O'lchovlar va implantatsiya jarayonlari o'ta yuqori vacuumli ko'p funksiyali eksperimental qurilmada amalga oshirildi. Qurilmaning ishchi kamerasidagi asosiy vakuum bosimi $10^{-8} - 10^{-9}$Torrni tashkil etdi. Vakuum kamerasiga kiritilgandan so'ng, kremniy sirtini atomar darajada tozalash maqsadida namunalar 1300–1350 K haroratgacha qizdirildi.

Kremniy sirtiga qiyin eruvchan molibden (Mo) ionlarini kiritish qattiq jismli implanter yordamida amalga oshirildi. Implanterning ishlash prinsipi molibden monokristallini elektron nuri bilan qizdirish orqali parlatish va hosil bo'lgan atomlarni elektronlar bilan bombardimon qilib ionlashtirishga asoslangan. Aralashma ionlarini ajratib olish va faqat bir zaryadli Mo^+ ionlarini namunaga yo'naltirish uchun elektromagnit mass-separatordan foydalanildi.

Implantatsiya jarayoni quyidagi optimal parametrlarda bajarildi: ionlarning kinetik energiyasi $E_k = 3keV$, tok zichligi $j \approx 10^{11} ion/(sm^2 \cdot s)$, va sirtga yuborilgan ion dozasi $D = (2-3) \cdot 10^{14} ion/sm^2$. Ushbu energiya ionlarning kremniy sirtiga, taxminan, 1–3 nm chuqurlikkacha kirib borishini va materialning asosiy hajm tuzilishini buzmasligini ta'minladi.

Kremniy sirti tozaligi va ion implantatsiyasidan so'ng sirtning elementar tarkibi va kiritilgan ionlar konsentratsiyasi 120° burchakli to'rt to'rli Oje-elektron analizator (OES) yordamida nazorat qilindi [6]. Birlamchi elektronlar dastasining energiyasi $E_p = 1500\ eV$ ni, analizatorning energiya bo'yicha ajratish qobiliyati esa 0,2%ni tashkil etdi. Sirtda kiritilgan ionlar chuqurlik profili bo'yicha turli konsentratsiyada bo'ladi, shu sabab argon ionli po'shka yordamida sirtni atom qatlamlarini olib tashladik. Oje analizatori kremniyda molibden 1%li konsentratsiyasini tanlab oldik va o'lchash ishlarini shu sirtda bajardik.

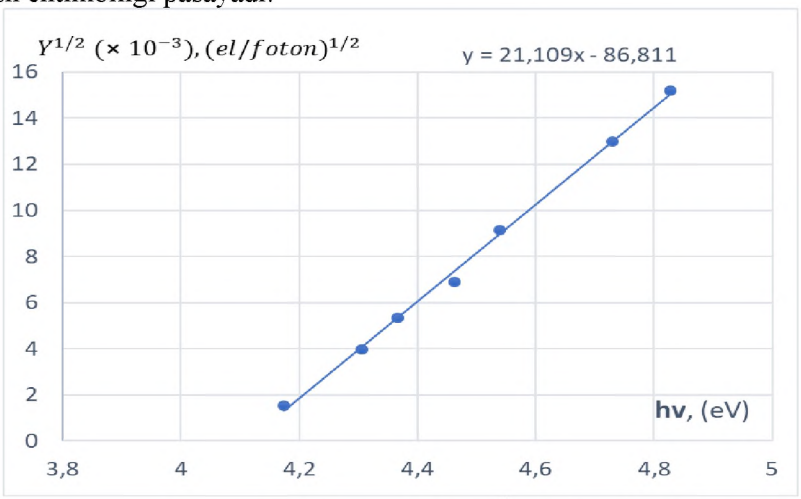
Natijalar va ularning tahlili. Sirtning fotoemission xarakteristikalari, xususan, kvant chiqishining spektral taqsimoti va sirt chiqish ishini o'lchash uchun ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi (UFES) usuli qo'llanildi [1]. Foton manbai sifatida 232–350 nm spektral diapazonda ishlovchi PRK kvarsli simob lampasi va MDR-12M monoxromatoridan foydalanildi. Tajribada ishlari 3,8–5.3 eV energiyali UB nurlar yordamida namuna sirtida hosil bo'lgan I_f fototokni o'lchash amalga oshirildi. Kvant chiqish ishi $Y = \frac{I_f}{eN_f}$ formula orqali hisoblandi. N_f tushayotgan fotonlar soni tushayotgan to'lqin uzunligiga moslab kalibrovka qilingan.



1-rasm. 1-implantatsiyadan oldingi, 2-implantatsiyadan keyingi kremniy sirti kvant chiqishini spectral bog‘lanishi.

1-rasmda keltirilgan kvant chiqishining spektral bog‘lanishida o‘ziga xos kesishish effekti kuzatiladi. Kichik foton energiyalari sohasida (fotoeffekt ostonasi atrofida) implantatsiyadan keyingi kvant chiqishi toza Si sirtiga nisbatan biroz yuqoriroq ekanligi qayd etildi. Bu holat kiritilgan ionlar hisobiga sirt potensial to‘sig‘ining (chiqish ishining) pasaygani bilan izohlanadi. Biroq foton energiyasi ortib borishi bilan ya’ni hν≥4,5 eVdan keyin toza kremniy namunasi uchun kvant chiqishining qiymati ortib, modifikatsiyalangan namunadan o‘zib ketadi.

Implantatsiyadan so‘ng yuqori energiyalar sohasida Y ning bunday pasayishi ion bombardimoni natijasida sirtga yaqin qatlamlarda yuzaga keladigan qisman amorfizatsiya va kristall panjara nuqsonlari bilan bog‘liq. Radiatsion nuqsonlar hamda kirishma atom (Mo) markazlarining paydo bo‘lishi fotoelektronlarning noelastik sochilish ehtimolligini oshiradi va ularning erkin yugurish uzunligini kamaytiradi. Natijada, nisbatan chuqurroq qatlamlarda yutilgan fotonlar tomonidan uyg‘otilgan elektronlarning vakuumga sirt orqali emissiya bo‘lish ehtimolligi pasayadi.

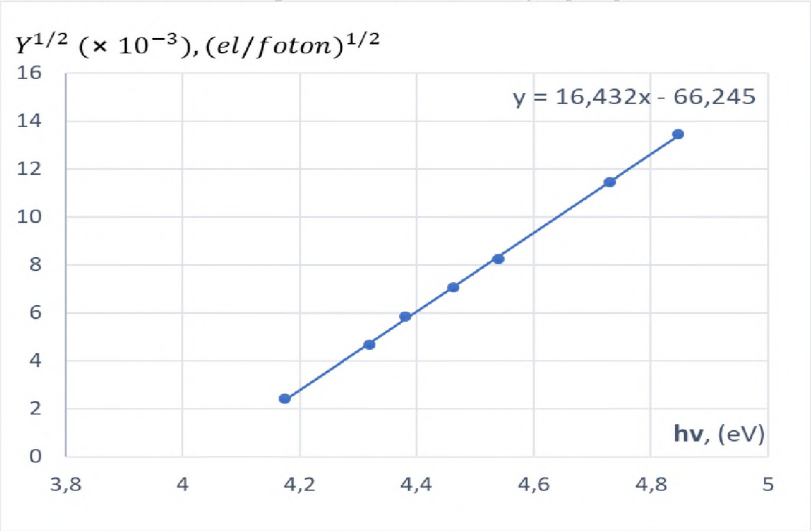


2-rasm. Toza kremniy sirti $Y^{\frac{1}{2}}(h\nu)$ bog‘lanishi.

Tajriba natijalaridan chiqish ishini (φ) yuqori aniqlikda hisoblab topish uchun parabolik bog‘lanishdan chiziqli bog‘lanishga o‘tiladi. Bu uchun tenglamaning har ikki tomonidan kvadrat ildiz olib, $Y^{1/2} = (h\nu - \varphi)$ ifodadan foydalaniladi. $Y^{1/2}$ning $h\nu$ ga bog‘liqlik grafigi chizilib, uning chiziqli o‘sish sohasi uchun $y = kx + b$ to‘g‘ri chiziq tenglamasi aniqlanadi. Fotoeffekt ostonasida kvant chiqishi nolga teng $Y^{1/2} = 0$ bo‘lish shartidan kelib chiqib, to‘g‘ri chiziqning absissa (hν) o‘qi bilan kesishish nuqtasi ekstrapolyatsiya qilinadi va $h\nu = \varphi$ shartiga ko‘ra sirtning chiqish ishi qiymati topiladi.

Tajribalar natijasida toza Si (111) sirtining chiqish ishi 4.11 eV ga teng ekanligi topildi (2-rasm). Sirt qatlamiga molibden ionlari implantatsiya qilingandan so‘ng, fotoeffekt ostonasi sezilarli darajada kichik energiyalar sohasiga siljishi kuzatildi. Ekstrapolyatsiya natijalariga ko‘ra, modifikatsiyalangan sirtning chiqish ishi 4.03 eV gacha pasaydi (3-rasm).

Chiqish ishining pasayishini quyidagi fizik mexanizmlar bilan tushuntirishimiz mumkin: o‘lchashlarda kremniy sirtida molibdenning konsentratsiyasi 1% bo‘lgan holda amalga oshirilgani kvant chiqishidagi o‘zgarishlarning mikromexanizmini aniqlashda muhim ahamiyatga ega.



3-rasm. Implantatsiyadan keyin kremniy sirti $Y^{\frac{1}{2}}(h\nu)$ bog‘lanishi.

Ionlar konsentratsiyasi nisbatan kichik bo‘lishiga qaramay, Mo atomlari kremniy panjarasi bilan o‘zaro ta’sirlashib, lokal darajada silitsidga o‘xshash (Mo-Si) fazalarni hosil qiladi. Konsentratsiyaning 1% bo‘lishiga qaramay, bu mahalliy Mo-Si bog‘lanishlari sirt dipol momentini samarali o‘zgartirish va sirt potensial to‘sig‘ini pasaytirish uchun yetarli hisoblanadi [6]. Bu esa, o‘z navbatida, elektronlarning vakuumga chiqishi uchun yengib o‘tishi kerak bo‘lgan potensial to‘siq balandligini kamaytiradi. Xususan, past energiyali ion bombardimoni sirtning ichki hajmiy tuzilishini buzmaydi, biroq kiritilgan Mo atomlari Si panjarasi bilan reaksiyaga kirishib, sirtqi dipol momentini o‘zgartiruvchi silitsidga o‘xshash fazalarni hosil qiladi. Shu bilan birga, ionli ta’sir natijasida kristall panjarada donor tipidagi yangi gibridlangan sathlarning yuzaga kelishi Fermi sathining o‘tkazuvchanlik zonasi tomon siljishiga olib keladi. Aynan shu energetik qayta taqsimlanish va sirtning qisman metallashuvi elektronlarning foton yutib vakuumga chiqishi uchun yengib o‘tilishi kerak bo‘lgan potensial to‘siqni samarali kamaytiradi.

Xulosa. O‘ta yuqori vakuum sharoitida n-tur Si(111) monokristali sirtiga past energiyali (3 keV) molibden ionlarini implantatsiya qilish orqali sirtning fotoemission parametrlarini maqsadli boshqarish mexanizmlari tadqiq etildi. Fauler-Keyn nazariyasiga asoslangan fotoemission o‘lchovlar natijasiga ko‘ra, toza Si sirtining chiqish ishi qiyin eruvchan molibden ionlari kiritilgandan so‘ng 0,07 eV farq bilan pasayishi qayd etildi. Garchi hajmiy molibdenning chiqish ishi n tur kremniynikidan yuqori bo‘lsa-da, modifikatsiyalangan Si-Mo chegarasidagi chiqish ishini nafaqat kamayishi balki o‘zgarishsiz qolishi ham energetikasi qurilmalarida zaryad tashuvchilarni yo‘qotishlarsiz saralovchi kontakt qatlamlar texnologiyasini rivojlantirish uchun xizmat qilishi mumkin.

Ushbu natija zamonaviy qattiq jismlar elektronikasi, optoelektronikada sirt chiqish ishining maqsadli boshqarish, fotodetektorlar hamda zamonaviy vakuum elektronikasida samarali qo‘llanilishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, ionli implantatsiya usuli yordamida kremniy sirtining emissiv parametrlarini va dreyf maydonlarini muvaffaqiyatli modifikatsiya qilish kelajakda yuqori samaradorlikka ega yangi avlod quyosh elementlari, sensorlar va yarimo‘tkazgichli fotodetektorlar yaratishda ishonchli va istiqbolli texnologik yechim bo‘lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Hüfner S. Photoelectron Spectroscopy: Principles and Applications. Berlin, Springer, 2003.
(2). Rahmonov G‘.T., Nurmatov N.A. Elektronlar va ionlar emissiyasi. Toshkent, “Ma’rifat”, 2024.
(3). Neamen D.A. Semiconductor Physics and Devices. New York, McGraw-Hill, 2012.
(4). Briggs D., Grant J.T. Surface Analysis by Auger and XPS. IM Publications, 2003.
(5). Ziegler J.F. Ion Implantation Science. Nuclear Instruments, 2004.
(6). Buribaev I., Nurmatov N.A. Photoelectron emission of Nb and alloys. Izvestiya RAN. Moscow, 2001.