UO‘K 538.9:621.315.5

KATTA DOZALI ION IMPLANTATSIYASI TA’SIRIDA Si(111) SIRT VA HAJM PLAZMA TEBRANISHLARINING NAZARIY TAHLILI

Abrayeva Sevara Toshtemirovna,
Termiz iqtisodiyot va servis universiteti,
fizika-matematika fanlari falsafa doktori (PhD)
ORCID: 0009-0003-9401-8905
sevara_abrayeva@tues.uz

Annotatsiya. *Ushbu maqolada Ba hamda ishqoriy element ionlarining katta dozali ($D > 10^{16}$ sm^{-2}) implantatsiyasi jarayonida Si(111) valent elektronlarining sirt va hajm plazma tebranishlari qo‘zg‘alish energiyasining kamayishi bo‘yicha tajriba yo‘li bilan aniqlangan effektning nazariy talqini keltirilgan. Elektron gazining ikki suyuqlikli modeliga asoslangan holda, Si(111) plazmon energiyasining pasayishi Si(111) kristall tuzilishining to‘liq amorflanishigacha bo‘lgan tartibsizlanishi natijasida valent elektronlar tebranishlarining kuchli so‘nishi bilan izohlanadi.*

Kalit so‘zlar: *Past energiyali ion implantatsiyasi, valent elektronlarning sirt va hajm plazma tebranishlari qo‘zg‘alish energiyasi, sirtning amorflanishi, elektronlarning plazma tebranishlarining so‘nishi, dielektrik singdiruvchanlik, elektron gazining ikki suyuqlikli modeli.*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ОБЪЁМНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ Si(111) ПРИ ВЫСОКОДОЗНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Аннотация. *В данной статье представлено теоретическое обоснование экспериментально установленного эффекта снижения энергии возбуждения поверхностных и объемных плазменных колебаний валентных электронов Si(111) при высокодозной ($D > 10^{16}$ $см^{-2}$) ионной имплантации бария и щелочных элементов. На основе двухжидкостной модели электронного газа снижение энергии плазмонов Si(111) объясняется сильным затуханием колебаний валентных электронов вследствие разупорядочения кристаллической структуры Si(111) вплоть до её полного аморфизирования.*

Ключевые слова: *низкоэнергетическая ионная имплантация, энергия возбуждения поверхностных и объемных плазменных колебаний валентных электронов, аморфизация поверхности, затухание электронных плазменных колебаний, диэлектрические свойства, модель двухжидкостного электронного газа.*

THEORETICAL ANALYSIS OF SURFACE AND BULK PLASMA OSCILLATIONS IN Si(111) UNDER HIGH-DOSE ION IMPLANTATION

Abstract. *This paper provides a theoretical interpretation of the experimentally observed effect of a decrease in the excitation energy of surface and bulk plasma oscillations of valence electrons in Si(111) during high-dose ($D > 10^{16}$ cm^{-2}) ion implantation of barium and alkali elements. Based on the two-fluid model of the electron gas, the reduction in Si(111) plasmon energy is attributed to the strong damping of valence electron oscillations resulting from the disordering of the Si(111) crystal structure, leading up to its complete amorphization.*

Keywords: *low-energy ion implantation, excitation energy of surface and bulk plasma oscillations of valence electrons, surface amorphization, damping of electron plasma oscillations, dielectric properties, two-fluid electron gas model.*

Kirish. So‘nggi yillarda ilmiy dunyoda nanomateriallarga bo‘lgan e’tiborning keskin ortishi bejiz emas. Nanokristallarning an’anaviy materiallardan farqli o‘laroq, noyob xossalarga egaligi bu yo‘nalishdagi tadqiqotlar o‘sish sur’atlarini eksponensial darajaga olib chiqdi. Nanosistemalardagi o‘lcham-kvantlash effektlari, xususan, kvant nuqtalarining hosil bo‘lishi, eksitonlar lokalizatsiyasi oqibatida energetik zona kengligining modifikatsiyasi va plazmon rezonansi kabi hodisalar nanomateriallarning fundamental tadqiqotlardagi o‘rnini yanada mustahkamlamoqda [1, 2].

Ushbu tadqiqot o‘rta energiyali elektronlarning modda bilan o‘zaro ta’siri jarayonida yuz beradigan xarakterli energiya yo‘qotishlarini nazariy asoslashga qaratilgan. Bu jarayon elektronlarning muhitdagi

sochuvchi markazlar bilan noelastik to‘qnashuvi, shuningdek, elektronlarning plasmonlar emissiyasi hodisasiga asoslanadi.

Biroq yuqoridagi yondashuv faqat elektronlarning tashilishi jarayonidagi barcha dissipativ (energiya tarqalishi bilan bog‘liq) hodisalarni e’tibordan chetda qoldirish mumkin bo‘lgan hollardagina o‘z kuchini saqlaydi. Aslida esa muhitda tez harakatlanayotgan elektron uchun energiya va impulsning tarqalishi bilan bog‘liq yutilish jarayonlari mavjud [6].

O‘rta energiyali elektronlar uchun ushbu mavhum potensial asosan energiya va impuls dissipatsiyasining uchta jarayoni bilan belgilanadi:

1. Elektronning plasmon emissiyasi natijasida qo‘zg‘algan holatga o‘tishi;
2. Elektron-kovak (teshik) juftliklarining uyg‘onishi natijasidagi energiya yo‘qotishlari;
3. Atomlarda kichik burchaklar ostida sochilish.

“Optik” teoremaga muvofiq [6], Γ mavhum potensiali atomlar konsentratsiyasi n va elektronning nol darajali burchak ostida sochilish amplitudasi $Im\ f(0)$ ning mavhum qismiga proporsionaldir. Elektronning $E \approx$100-300 eV o‘rta energiyalari uchun $\Gamma/\hbar\omega_p \approx$7-1.0 nisbat o‘rinlidir. Binobarin, elektronning har bir noelastik sochilish hodisasida saqlanish qonunlarining bajarilish shartlaridan plazma energiyasi $h\omega_p$ bilan mutanosib bo‘lgan Γ qiymatiga og‘ish mavjud bo‘ladi.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Eksperimental o‘lchovlar tormozlovchi (sekinlashtiruvchi) maydonli sferik ko‘zgu tipidagi analizator bilan jihozlangan qurilmada o‘tkazildi; bu qurilma qoldiq gazlar bosimi ko‘pi bilan 10^{-7} Pa bo‘lganda sirtni: Oje-spektroskopiyasi (OES), elastik sochilgan elektronlar spektroskopiyasi (ESES), fotoelektron spektroskopiya (FES), elektronlarning energiya yo‘qotishi spektroskopiyasi (EEYO‘S) va sekin elektronlar difraksiyasi (SED) usullari yordamida tadqiq qilish imkonini berdi [11].

Tadqiqot obyekti sifatida solishtirma qarshiligi 6000 Ω·sm bo‘lgan n- va p-turdagi Si (111) monokristallari tanlandi. Namunalar ikki bosqichli termik qizdirish (1200 K haroratda 60 daqiqa davomida va 1500 K haroratda 1 daqiqa davomida) orqali, shuningdek, [12] mualliflari tomonidan ishlab chiqilgan Si sirtini vakuumda tozalashning yangi usuli bilan tozalandi. Ushbu usul sirt yaqinidagi sohada past energiyali (5 keV gacha) Ba yoki ishqoriy element ionlari implantatsiyasi yordamida ichki getterlovchi (yutuvchi) qatlam hosil qilishni va keyinchalik ushbu qatlamni qisqa muddatli yuqori haroratli qizdirish orqali olib tashlashni o‘z ichiga oladi.

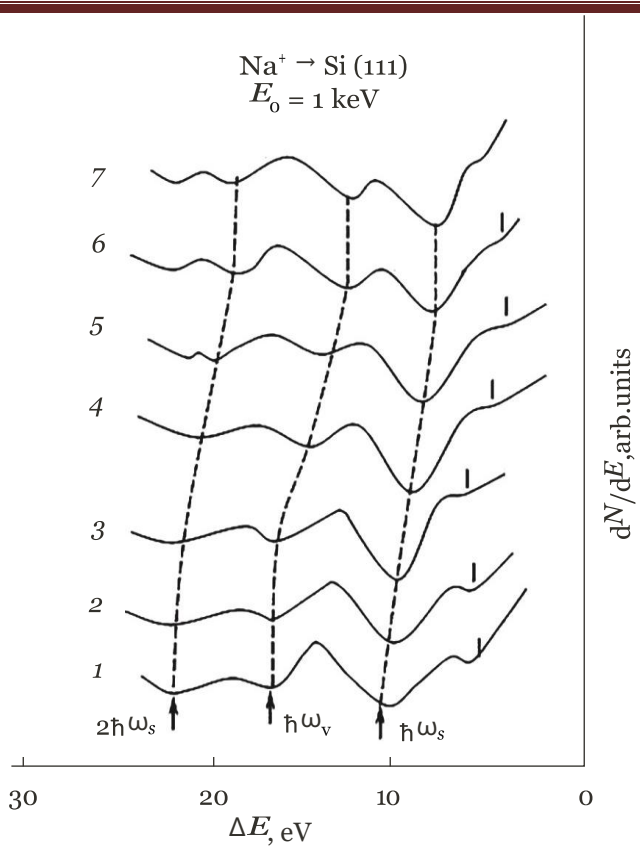
Eksperimental natijalar va muhokama. Maqolaning maqsadi – past energiyali Ba va ishqoriy ionlar implantatsiyasi jarayonida Si(111) va Si(100) da hajmiy va sirtqi plazma tebranishlari uyg‘onish energiyasining kamayishi bo‘yicha tajribada aniqlangan effektni nazariy jihatdan talqin qilishdan iborat.

1- va 2-rasmlarda Si(111) yuzasini Na^+ va Ba^+ ionlari bilan nurlatgandan so‘ng olingan elektron energiya yo‘qotish spektrlari (EEYO‘S) keltirilgan. Boshlang‘ich elektronlar energiyasi E_p = 100 eV ni, birlamchi ion nurlanish energiyasi esa E_0 = 1 keV ni tashkil qiladi. Nurlanish dozalari (D, sm^{-2}) quyidagicha: $5\cdot10^{13}$ (2-egri chiziq), $5\cdot10^{14}$ (3-egri chiziq), $7\cdot10^{15}$ (4-egri chiziq), $1\cdot10^{16}$ (5-egri chiziq), $8\cdot10^{16}$ (6-egri chiziq) va $2\cdot10^{17}$ (7-egri chiziq). Sof Si namunasining EEYO‘S spektrida (1-egri chiziq) 7, 11, 17 va 22 eV energiya qiymatlarida cho‘qqilar kuzatiladi. Ushbu cho‘qqilar quyidagi jarayonlar natijasidir: 7 eV: valent elektronlarning zonalararo o‘tishlari; 11 eV**:** sirt plazmonlarining qo‘zg‘alishi ($\hbar\omega_s$ = 11 eV); 17 eV: hajm plazmonlarining qo‘zg‘alishi ($\hbar\omega_s$ = 17 eV); 22 eV: sirt plazmonlarining ikkilamchi qo‘zg‘alishi ($2\hbar\omega_s$ = 22 eV).

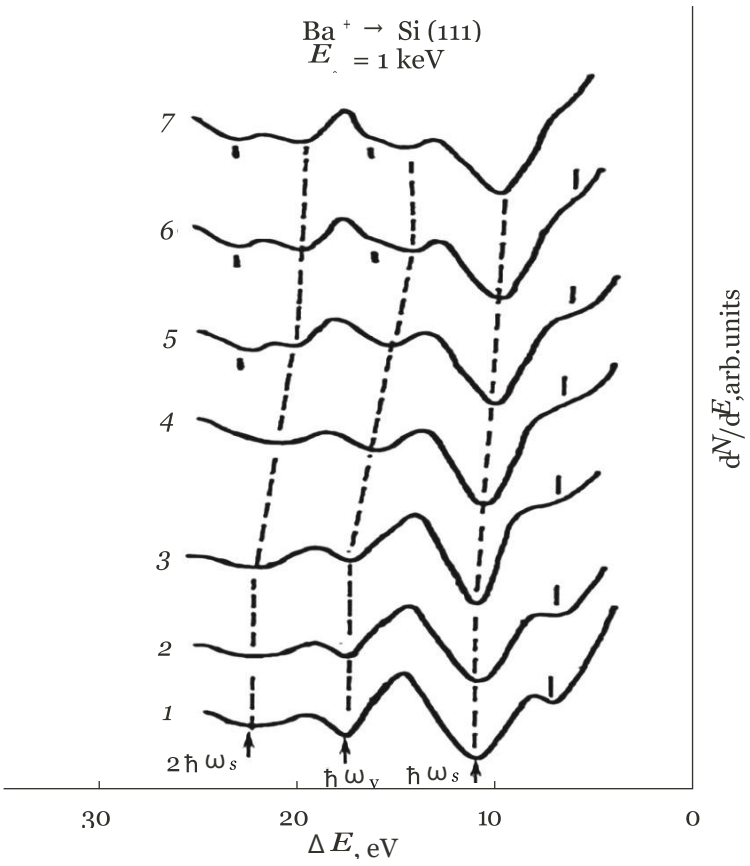
Sof Si(111) uchun eksperimental yo‘l bilan aniqlangan sirt va hajm plazma tebranishlari energiyalari Bohm-Pines nazariy formulasi asosida hisoblangan qiymatlar bilan yaxshi mos tushadi [7].

$D = 2\cdot10^{17}$ sm^{-2} doza bilan Na^+ ionlari implantatsiya qilingan Si uchun 7-spektrda 6; 9,2; 13,2; 18,5 va 25 eV energiyalarda EEYO‘ (elektronlarning energiya yo‘qotishi) piklari kuzatiladi. 6 eV dagi pik, ehtimol, NaSi valent zonasidan o‘tkazuvchanlik zonasiga elektronlarning zonalararo o‘tishining uyg‘onishi bilan bog‘liq.

E_p energiyasi 30 dan 300 eV gacha ortishi bilan 9,2 va 13,2 eV dagi piklar intensivligining o‘zgarish xarakteri, birinchi pik sirtqi plazmon uyg‘onishi, ikkinchisi esa ion-implantatsiya qilingan Si dagi hajmiy plazmon uyg‘onishi bilan bog‘liqligini taxmin qilish imkonini berdi. 1- va 2-rasmlarda keltirilgan EEYO‘ spektrlarining xarakterli xususiyati – implantatsiya qilingan Na va Ba ionlari dozasi ortishi bilan plazma elektron-energiya yo‘qotishlari piklarining mos ravishda past energiya sohasiga tomon siljishidir.



1-rasm. Toza Si (111) (1-egri chiziq) va E_0 = 1 keV energiyali Na^+ ionlari bilan turli D (sm^{-2}) dozalarda implantatsiya qilingan Si uchun EEYO‘ spektrlari: (2) $5\cdot10^{13}$, (3) $5\cdot10^{14}$, (4) $7\cdot10^{15}$, (5) $1\cdot10^{16}$, (6) $8\cdot10^{16}$ va (7) $2\cdot10^{17}sm^{-2}$.



2-rasm. Toza Si (111) (1-egri chiziq) va E_0 = 1 keV energiyali Ba^+ ionlari bilan turli D (sm^{-2}) dozalarda implantatsiya qilingan Si uchun EEYO‘ spektrlari: (2) $5\cdot10^{13}$, (3) $5\cdot10^{14}$, (4) $7\cdot10^{15}$, (5) $1\cdot10^{16}$, (6) $8\cdot10^{16}$ va (7) $2\cdot10^{17}sm^{-2}$.

Rasmlarda keltirilgan spektral xususiyatlar shuni ko‘rsatadiki, implantatsiya qilingan Na^+ va Ba^+ ionlarining dozasi ortishi bilan plazma elektronlarining energiya yo‘qotish cho‘qqilari past energiya sohasiga tomon siljiydi.

1-jadval.

1-keV energiyali Na^+ ionlari bilan nurlantirilganda Si kristalidagi hajmiy plazmon qo‘zg‘alish cho‘qqisi energiyasining bog‘liqligi

	D, sm^2	$C(z_{max})$	z_{max}, Å	$\varepsilon_s(z_{max})$	$\hbar\omega_{res}$, eV	
					exsperimental	hisoblangan
Na^+	0	-	-	0	17,0	17,1
	10^{14}	0,12	33	0,092	16,75	16,72
	10^{15}	0,18	27	0,079	16,0	16,4
	10^{16}	0,32	21	0,141	15,0	16,0
	10^{17}	0,42	20	0,234	14,0	14,1
Ba^+	0	-	-	0	17,0	17,1
	10^{14}	0,10	29	0,042	16,8	16,9
	10^{15}	0,16	25	0,84	16,6	16,7
	10^{16}	0,28	21	0,154	15,7	15,4
	10^{17}	0,45	21	0,273	13,8	13,4

Tajribada Si ning Na ionlari bilan nurlanish dozasi ortib borishi bilan hajmiy plazmon rezonansi cho‘qqisining energetik holati siljishini baholaymiz [15].

Shunday qilib, amorflangan qatlamdagi asosiy plazmon uchun EEL spektridagi xarakterli xususiyat valent elektronlari tizimida kuchli suspenziya sifatida namoyon bo‘ladi va u metall Ba, Na hamda sof Si dagi plazma chastotalarining nisbati bilan bir xil tartibda kuzatiladi.

Si ga Na ionlarini implantatsiya qilishda statsionar qutblanishga $L_{2,3}$ qobig‘ining to‘rtta elektroni ($Z_{L2,3}$ = 4, o‘tish energiyasi $\hbar\omega_{L2,3,s} \cong 31eV$) va L_1 qobig‘ining ikkita elektroni (Z_{L1} = 2, o‘tish energiyasi $\hbar\omega_{L1,s} \cong 62eV$) hissa qo‘shadi. $\varepsilon_s(z)$funksiyasini $\varepsilon_s(z) \cong 0{,}45C(z)$ ko‘rinishida yozish mumkin, bu yerda $C(z) = N_{imp}(z)/N_{Si}$ bo‘lib, N_{Si} — birlik katakchadagi Si atomlari konsentratsiyasi, ya'ni $N_{Si} = 5\cdot10^{22}sm^{-3}$. Si uchun dielektrik singdiruvchanlik $\varepsilon_0(\omega)$ ifodasi $\varepsilon_0(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pv}^2}{\omega^2-\omega_g^2}$ ko‘rinishida olingan, bu yerda $\hbar\omega_{pv} = 16{,}6\ eV$ va $\hbar\omega_g \cong 4\ eV$.

Hajmiy plazmon energiya cho‘qqisining Na - ionlari bilan nurlanish dozasiga bog‘liqligini hisoblash uchun $N_{imp}(z)$ taqsimotlarini tahlil qilish orqali $E_0 = 0{,}5\ keV$ ion energiyasida $Na^+ \to Si$ uchun olingan $C(z_{max})$ qiymatlari bo‘yicha eksperimental ma'lumotlardan foydalanildi. Ushbu $C(z_{max})$ qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadvalda $Na^+ \to Si$ va $Ba^+ \to Si$ strukturalarida elektronlar tomonidan hajmiy plazmonlarning uyg‘onishi natijasida kelib chiqadigan EEL spektrlarining cho‘qqi energiyalari bo‘yicha eksperimental va hisoblangan ma'lumotlar keltirilgan. Nurlanish dozasi ortishi bilan cho‘qqilarning siljishini solishtirganda, hisoblangan qiymatlar $10^{15}sm^{-2}$ doza uchun tajribada kuzatilgan hajmiy plazmon cho‘qqisi energiyalarining siljish qiymatlarining 99 foizini, $10^{16}sm^{-2}$ doza uchun esa 76 foizini tashkil etishi ko‘rinadi. Spektral cho‘qqilar siljishining hisoblangan va eksperimental qiymatlari o‘rtasidagi nomuvofiqlik sababi aralashma ionlarini implantatsiya qilish jarayonida panjara doimiysining ortishi bo‘lishi mumkin, bu esa, o‘z navbatida, valent elektronlarning plazma tebranishlari energiyasining kamayishiga olib keladi. Biroq, bunday effektni nazariy baholash murakkab muammo hisoblanadi.

Xulosa. Shunday qilib, taqdim etilgan nazariy model Ba va ishqoriy element ionlarining katta dozalari implantatsiya qilinganda Si plazmonlarining $\hbar\omega_V$ va $\hbar\omega_S$ energiyalari pasayishi bo‘yicha tajribada kuzatilgan effektni yetarlicha yaxshi izohlab berdi. Bu pasayish Si(111) kristall strukturasining to‘liq amorf holatga kelguniga qadar buzilishi natijasida valent elektronlar tebranishlarining kuchli so‘nishi bilan bog‘liqdir. Shu bilan birga, mazkur ish natijalari shuni ko‘rsatdiki, aralashma ionlarining ichki qobiq elektronlari statsionar qutblanishining ta’siri ion bilan legirlangan yarimo‘tkazgichda plazmonlarni

uyg‘otishga sarflanadigan yo‘qotish cho‘qqilari energiyalarining siljishiga sezilarli darajada ta’sir qilishi aniqlandi.

ADABIYOTLAR:

1. A.S.Rysbaev, J.B. Khujaniyozov, and S.T.Abraerva Theoretical Explanation of the Effect of a Decrease in the Si(111) Plasmon Energy during the Implantation of Ions with a Large Dose ISSN 1027-4510, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, No. 4, pp. 816–822.

2. A.A. Eliiseev and A.V. Lukashin, Functional Nanomaterials, Ed. by Yu. D. Tret’yakov (Fizmatilt, A.Moscow, 2010) [in Russian].

3. И. П. Суздалев. Нанотехнология: физическая химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – Москва: Комкнига, 2006.

4. A. S. Rysbaev, S. S. Nasriddinov, M. T. Normuradov. Uzbek Physical Journal, 2(1), 33 (2000).

5. А. С. Рысбаев. Тонкие наноразмерные силицидные пленки: синтез и свойства. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2013.

6. Ж. Б. Хужаниезов, А. С. Рысбаев, И. Р. Бекпулатов. Особенности возбуждения электронных плазменных колебаний в неупорядоченных полупроводниках: монография. – Ташкент: Infinity Group, 2014.

7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Курс теоретической физики. Том 3: Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – Москва: Физматлит, 1963; Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 1991.

8. D. Pines. Elemental Excitations in Solids. – New York: Benjamin, 1963.

9. В. Д. Горбаченко, М. В. Жарников, Е. Г. Максимов, С. Н. Рашкеев. Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ), 1985, т. 88, № 2, с. 677.

10. В. Д. Горбаченко, М. В. Жарников, Е. Г. Максимов, К. А. Молдосанов. Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ), 1984, т. 86, № 2, с. 597.

11. M. Strum. Advances in Physics, 1982, t. 31, № 1, s. 64.

12. M. T. Normuradov, D. S. Rumi, A. S. Rysbaev. Izv. Akad. Nauk UzSSR, Ser. Fiz.-Mat. Nauk, 1986, № 4, s. 70.

13. A. S. Rysbaev, Zh. B. Khuzhaniyozov, A. M. Rakhimov, and I. R. Bekpulatov, Uzbekistan Patent No. IAP 05720, 30 November 2018.

14. N. Libenson and V. V. Rumyantsev, Sov. Phys. JETP, 59, 999 (1984).

15. V. V. Rumyantsev and B. N. Libenson, Sov. Phys. JETP 56 (1), 135 (1982).

16. A. S. Rysbaev, M. T. Normuradov, Zh. B. Khuzhaniyazov, I. R. Bekpulatov, and A. M. Rakhimov, in Proc.XXIV International Conf. on Radiation Physics of Solids (Sevastopol, 7–11 July 2014).