

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК SiP И SiB₃, ПОЛУЧЕННЫХ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ P⁺ И B⁺ В Si(111)

Умирзаков Балтоходжа Ерматович¹, Турсунметова Зухра Абдурашитовна²,
Тураев Баходир Эргашевич³, Хужаниёзов Жуманазар Бобокулович⁴

¹Доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан. 100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2

²Самостоятельный соискатель кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан. 100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2

³Доктор технических наук, профессор кафедры компьютерная инженерия Ташкентского университета прикладных наук. г. Ташкент, Республика Узбекистан. 100149, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Гавхар 1.

⁴Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Республика Узбекистан. 100095, Республика Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2

¹E-mail: be.umirzakov@gmail.com, ¹ORCID: 0000-0002-9815-2111

²E-mail: risbayeva.z.a@mail.ru

³E-mail: bturaev2020@gmail.com, ³ORCID: 0000-0002-8472-0026

⁴E-mail: KhujaniyozovJB@mail.ru, ⁴ORCID: 0000-0001-6067-8196

Аннотация

В данной работе исследованы электронные и зонно-энергетические свойства тонких пленок SiP и SiB₃, сформированных на поверхности Si(111) методом высокочастотной имплантации ионов P⁺ и B⁺ с низкой энергией.

Установлено, что при имплантации происходит аморфизация приповерхностного слоя кремния, а последующий термический отжиг приводит к образованию монокристаллических силицидных пленок. На основе анализа фотоэлектронных и Оже-спектров выявлено сужение запрещенной зоны, изменение плотности электронных состояний, а также уменьшение энергий поверхностных и объемных плазменных колебаний. Полученные результаты демонстрируют возможность управления электронной структурой поверхности полупроводников методом ионной имплантации.

Ключевые слова: ионная имплантация, силицидные пленки, электронная структура, запрещенная зона, Оже-электронная спектроскопия, фотоэлектронная спектроскопия, плазмон.

Annotation

In this work, the electronic and band structure properties of SiP and SiB₃ thin films formed on Si(111) surface by high-dose low-energy implantation of P⁺ and B⁺ ions were investigated.

It was found that ion implantation leads to amorphization of the near-surface layer of silicon, while subsequent thermal annealing results in the formation of monocrystalline silicide films. Based on photoelectron and Auger spectroscopy analysis, a narrowing of the band gap, modification of the electronic density of states, and a decrease in both surface and bulk plasmon energies were observed. The results demonstrate the possibility of controlling the electronic structure of semiconductor surfaces via ion implantation.

Keywords: ion implantation, silicide films, electronic structure, band gap, Auger-electron spectroscopy, photoelectron spectroscopy, plasmon.

Annotatsiya

Ushbu ishda Si(111) sirtiga past energiyali P⁺ va B⁺ ionlarini yuqori dozalarda implantatsiya qilish orqali hosil qilingan SiP va SiB₃ yupqa plyonkalarining elektron va energetik xossalari o'rganildi.

Aniqlanishicha, implantatsiya natijasida kremniy sirtining amorflanishi va keyingi termik ishlov berish jarayonida monokristall silitsid plyonkalar hosil bo'ladi. Fotoelektron va Oje-spektroskopiya natijalari asosida taqiqlangan zonaning torayishi, elektron holatlar zichligining o'zgarishi hamda sirt va hajmiy plazmon energiyalarining kamayishi kuzatildi. Olingan natijalar ion implantatsiyasi orqali yarimo'tkazgich sirtining elektron strukturasini boshqarish mumkinligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: ion implantatsiya, silitsid plyonkalar, elektron struktura, taqiqlangan zona, Oje-elektron spektroskopiya, fotoelektron spektroskopiya, plazmon.

В последние годы для модификации свойств поверхности и синтеза новых материалов, обладающих в ряде случаев уникальными свойствами используется высокодозная ионная имплантация [1-2]. Так в работах [3-4] при имплантации ионов Р и В с энергией $E_0 = 80 \div 100$ кэВ и дозой $D = 10^{17} \div 10^{18}$ см⁻² в кремний и проведением последующего отжига при $T = 900-1100$ К в приповерхностной области Si были обнаружены выделения второй фазы, или так называемые преципитаты, идентифицированные авторами как соединения SiP и SiB_{2,5-6}. Однако исследовать электронную структуру и свойства этих образований авторам не удалось в связи с тем, что они имели островковый характер.

Вместе с тем, проведение высокодозной имплантации ионов с низкой энергией ($E_0 \leq 5$ кэВ) позволяет создавать сплошные плёнки силицидов [2].

Целью данной работы является исследование зонно-энергетической структуры тонких плёнок силицидов SiP и SiB₃, созданных имплантацией ионов P⁺ и B⁺ в Si(111).

Эксперименты проводились в приборе с анализатором типа “сферическое зеркало” с тормозящим полем при вакууме $\sim 10^{-8}$ Па с использованием методов спектроскопии упруго рассеянных электронов (СУРЭ), Оже-электронной спектроскопии (ОЭС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), дифракции медленных и быстрых электронов (ДМЭ и ДБЭ). Очистка поверхности образцов Si(111) и Si(100) проводилась ионным травлением и термическим прогревом в два этапа: длительно (в течении 1-2 часов) при температуре $T = 700-800$ К и кратковременно 1-2 мин при $T = 1500$ К. Контроль чистоты поверхности кремния осуществлялся по Оже-спектру и по картинам ДМЭ.

Исследованиями изменения состояния поверхности Si(111) – 1×1 методами ДМЭ и ДБЭ установлено, что имплантация ионов P⁺ и B⁺, начиная с некоторой дозы $D_{кр}$, значение которой зависит от энергии ионов, происходит аморфизация поверхностного слоя Si.

Таблица 1

Минимальные дозы аморфизации поверхности Si(111) при имплантации ионов P⁺ и B⁺

Энергия, кэВ	0,5	1,0	3,0	5,0	10	20	80
Тип иона							
P ⁺	$5 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$
B ⁺	$1 \cdot 10^{16}$	$9 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{14}$

В таблице 1 приведены минимальные дозы $D_{кр}$, приводящие к аморфизации поверхности Si(111). Как видно из таблицы 1, при одинаковых энергиях имплантируемых ионов $D_{кр}$ (в случае P⁺) < $D_{кр}$ (B⁺), что очевидно связано с различием в атомных массах P и B ($m_P > m_B$). При $D > D_{кр}$ в спектре ЭОС наблюдалась сильная деформация формы основного низкоэнергетического пика $Si_{L_{2,3}VV}$ при 92 эВ, который при больших дозах ионной имплантации $D > 10^{16}$ см⁻² превращался из синглетной формы в дублетную, т.е. при больших дозах ионной имплантации наблюдается образование химической связи между атомами кремния и внедренной примеси. Оценка концентрации внедренной примеси при послойном травливании ионно-имплантированного слоя Si показала, что при $E_0 = 1$ кэВ в приповерхностном слое толщиной 35-40Å преимущественно образуются соединения SiP и

SiB₃ с аморфной структурой. После проведения кратковременного термического отжига при $T = 700$ К на картинах ДБЭ от Si, имплантированных ионами P⁺ и B⁺ наблюдались диффузные кольца, характерные для поликристаллической фазы. Увеличение T до 900 К приводило к появлению, наряду с диффузными кольцами, отдельных рефлексов, характеризующих постепенный переход от поликристаллической фазы в монокристаллическую. После проведения кратковременного отжига при $T = 1200$ К на картинах ДБЭ устанавливались четкие рефлексы, характерные для монокристаллических пленок силицидов SiP и SiB₃, с поверхностной структурой Si(111) – 1×1 -P и Si(111) – $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ -B. В работе также обнаружен эффект уменьшения энергии плазменных колебаний ($\hbar\omega_v$) валентных электронов кремния, который в случае имплантации ионов B наблюдается до дозы насыщения, а в случае P – до $D = D_{кр}$ $\hbar\omega_v$ – уменьшается, при $D > D_{кр}$ наблюдается увеличение $\hbar\omega_v$ (рис. 1).

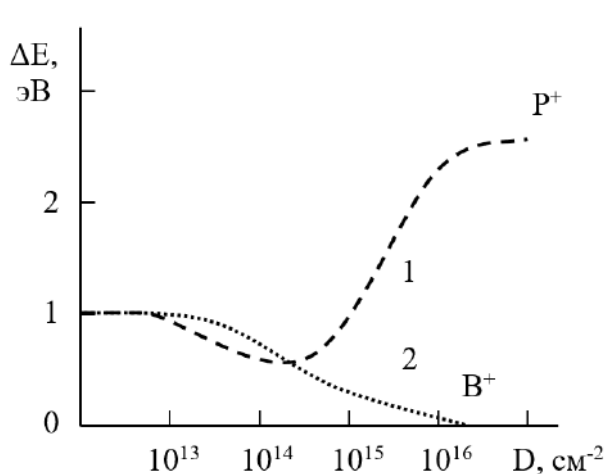


Рис. 1. Зависимости потерь энергии ΔE на возбуждение объемного плазмона Si от дозы облучения ионами P⁺ (кривая 1) и B⁺ (кривая 2).

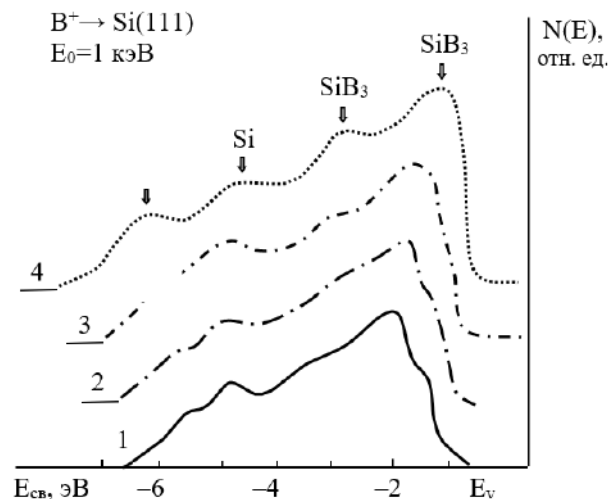


Рис. 2. Спектры ФЭС для чистого Si и имплантированного ионами B⁺ с $E_0 = 1$ кэВ с дозой D , см⁻²: $1 \cdot 10^{15}$ (2); $1 \cdot 10^{16}$ (3); $1 \cdot 10^{17}$ (4).

Данный эффект нами объясняется теоретический, на основе двухжидкостной модели электронного газа отличием диэлектрической проницаемости ионно-имплантированного слоя Si – $\epsilon_s(\omega)$ от диэлектрической проницаемости чистого Si – $\epsilon_0(\omega)$. Получены аналитические выражения для этих величин и из условия максимума возбуждения плазменных колебаний рассчитаны энергии плазмонов для слоев Si, имплантированных с различной дозой. На рис. 2. приведены фотоэлектронные спектры для чистого Si(111) (1) и Si, имплантированного ионами B⁺ с $E_0 = 1$ кэВ с различной дозой D , см⁻²: $1 \cdot 10^{15}$ (2), $1 \cdot 10^{16}$ (3) и $1 \cdot 10^{17}$ (4). Видно, что ионная имплантация приводит к существенному изменению формы кривой энергетического распределения фотоэлектронов, увеличивается ширина спектра. Спектры ФЭС сняты при

энергии фотонов $\hbar\omega=10,8$ эВ. На основе совместного анализа спектров СУРЭ и ФЭС нами построены энергетические диаграммы поверхности чистого Si(111) (рис. 3, а), Si, имплантированного ионами B^+ с $E_0 = 1\text{кэВ}$ и $D = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3, б) и пленки SiB_3 (рис. 3, в), полученной после отжига ионно-имплантированного Si при $T = 1200$ К. Аналогичные диаграммы построены также и для образцов Si, имплантированных ионами P и пленки SiP. Как видно из рис. 3 имплантация ионов B (а также P) приводит к сужению запрещенной зоны Si на 0,2 (и 0,3) эВ, что связано с перекрытием примесной подзоны, образующейся в запрещенной зоне Si при больших дозах облучения $D > 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, с валентной зоной (в случае имплантации ионов B) и с зоной проводимости (в случае имплантации ионов P). Образование примесных подзон связано с проявлением квантового эффекта уширения уровней. Отличие формы спектров $N(E)$ и положения максимумов плотности состояний валентных электронов ионно-имплантированного Si от чистого кремния, свидетельствует о том, что большая часть имплантированных ионов B^+ образует химическое соединение с атомами кремния. Монокристаллический силицид бора, с поверхностной структурой $Si(111) - (\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ -B имеет ширину запрещенной зоны $E_g = 1,3$ эВ, а максимумы плотности электронных состояний в валентной зоне и зоне проводимости локализованы при $E_{св}$: -5,1; -4,0; -2,0; -1,7; +2,1; +4,0 эВ.

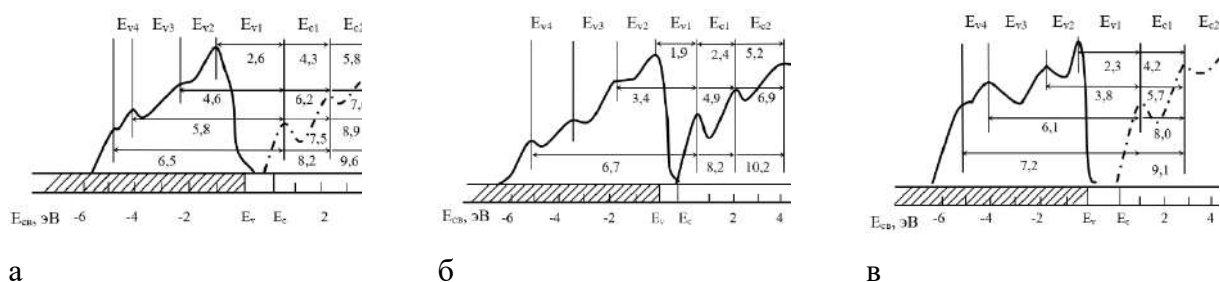


Рис. 3. Распределение плотности электронных состояний в Si (111) – а;
Si имплантированного ионами B^+ – б и SiB_3 – в.

Таблица 2.

Параметры энергетических зон Si(111) p - типа, легированного ионами P^+ и B^+ с $E_0=1\text{кэВ}$ и разной дозой

Параметры энергетических зон, эВ	Доза облучения D, см^{-2} (P^+/B^+)					
	0	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{17}$
Φ	5,1	5,0/5,1	4,7/4,9	4,2/4,4	3,9	3,8/3,9
ϵ_F	4,7	4,8	3,8/4,3	3,3/4,0	3,1/3,8	3,1
V_s	0,3	0,1/0,2	0/0,1	0	0	0
χ	4	3,9	3,7/3,8	3,3/3,4	3,0	3,0
E_g	1,1	1,1	1,0/1,1	0,9/1,0	0,9	0,8/0,9

Из построенных энергетических диаграмм нами определены основные зонно-энергетические параметры ионно-имплантированных образцов Si: Φ и $e\phi$, фото- и термоэлектронная работа выхода; χ – сродство к электрону; V_s – величина поверхностного загиба зон, E_g – ширина запрещенной зоны. В таблице 2 показано, как изменяются основные зонно-энергетические параметры Si (111) с увеличением дозы имплантации ионов Р и В.

Таким образом, имплантация ионов Р и В при $D > D_{кр}$, приводит к аморфизации поверхности Si и преимущественному образованию силицидов фосфора и бора. При этом наблюдается уменьшение энергии поверхностных и объемных плазменных колебаний валентных электронов Si, меняется форма спектра фотоэлектронов, наблюдается сужение запрещенной зоны. Последующий термический отжиг при $T = 1200$ К приводит к формированию тонких монокристаллических пленок SiP и SiB₃ с поверхностной структурной Si(111) – 1×1-Р и Si(111) – ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°-В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rysbaev A.S., Juraeva D.Sh., Khujaniyazov J.B. and et. al. Optimal technological modes of ion implantation and following annealing for forming thin nanosized films of silicides // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials Article. 2020, 4(1), p. 50-60, DOI: 10.29317/EJPFM.2020040106
- [2] Rysbaev A.S., Normurodov M.T., Khujaniyozov J.B., Rysbaev A.A., Normurodov D.A. On the Formation of Silicide Films of Metals (Li, Cs, Rb, and Ba) During Ion Implantation in Si and Subsequent Thermal Annealing // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2021, Vol. 15, No. 3, pp. 607–610. DOI: 10.1134/S1027451021030319
- [3] B.E. Umirzakov, I.R. Bekpulatov, Z.A. Tursunmetova. Influence of Various Impacts on the Composition and Structure of the Surface of Single-Crystal Si // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2023, Vol. 17, No. 1, pp. 317-320. Doi: 10.1134/S1027451022050391
- [4] А.А. Рисбаев, Т.А. Турмамбеков, И.Р. Бекпулатов, З.А. Турсунметова. Влияние ионной имплантации на структуру и элементный состав поверхности чистого кремния // Международная научно–практическая онлайн конференция **«Современные научные исследования: актуальные проблемы, достижения и инновации»**, Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауезова г. Шымкент и Международный казахско-турецкий университете г. Туркестан-2021 г. с. 34-38