

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Л А Р Ы

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
СЕРИЯСЫ**



**СЕРИЯ**

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ**



**PHYSICO-MATHEMATICAL  
SERIES**

**4 (302)**

**ШІЛДЕ – ТАМЫЗ 2015 ж.**

**ИЮЛЬ – АВГУСТ 2015 г.**

**JULY – AUGUST 2015**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА  
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ  
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД  
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА  
АЛМАТЫ, НАН РК  
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

**Мұтанов Г. М.**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчечков Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

**Г. М. Мутанов**

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

**G. M. Mutanov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**A.A. Ashimov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**I.N. Vishnievski**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

**News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.**  
**ISSN 1991-346X**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**NEWS****OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 4, Number 302 (2015), 261 – 269

**SYNTHESIS OF THIN SILICON CARBIDE FILMS  
BY ION IMPLANTATION TECHNIQUE****B. Zh. Seitov, I. K. Beisembetov, K. Kh. Nussupov, N. B. Beisenkhanov,  
B. K. Kenzhaliev, D. I. Bakranova**Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: seitov\_b85@mail.ru, rector@kbtu.kz, beisen@mail.ru**Key words:** silicon carbide, ion implantation, structure, crystallization.

**Abstract.** In paper, the synthesis of the amorphous silicon carbide layer by implantation of carbon ions with an energy of 2,5 keV and a dose of  $2,7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  into silicon wafers was carried out. The mathematical decomposition of the IR absorption spectrum of the film was made. It is shown that 18.6% of the total amount of Si-C-bonds is there at the surface and in the volume of silicon carbide nanocrystals, and an amorphous component of 81.4% is the amount of the shortened (17.0%) and elongated (64.4%) optically active Si-C-bonds in the Si-C-clusters. Changes in the composition and an increase of the layer density during of implantation leads to the transformation of the profile

shape of carbon atom distribution to a rectangular ones with an appearance of a sharp boundary "SiC film - Si substrate", allowing to use the X-ray reflectometry technique. By using X-ray reflectometry and Henke software, it was shown that the film density is  $2.71 \text{ g/cm}^3$ . By simulation using Release software, the main parameters of the multilayer system of 15.8 nm thickness, consisting of layers of  $\text{SiO}_2$  (0.8 nm),  $\text{SiC}_{0,8}$  (2,0 nm),  $\text{SiC}_{0,6}$  (13,0 nm) on silicon substrate were determined. The results can be used in nano- and micro-electronics as well as at the synthesis of anti-reflective coatings and silicon surface passivation at solar cell manufacturing.

УДК 537.311:322

## СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Б. Ж. Сейтов, И. К. Бейсембетов, К. Х. Нусупов,  
Н. Б. Бейсенханов, Б. К. Кенжалиев, Д. И. Бакранова

Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан

**Ключевые слова:** карбид кремния, ионная имплантация, структура, кристаллизация.

**Аннотация.** В работе осуществлен синтез аморфного слоя карбида кремния имплантацией в пластины кремния ионов углерода с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Выполнено математическое разложение ИК-спектра поглощения пленки. Показано, что 18,6% общего количества Si-C-связей находится в объеме и поверхности нанокристаллов карбида кремния, а аморфная составляющая 81,4% представляет собой сумму укороченных (17,0%) и удлиненных (64,4%) оптически активных Si-C-связей в составе Si-C-кластеров. Изменение состава и увеличение плотности слоя в процессе имплантации приводит к трансформации формы профиля распределения атомов углерода в прямоугольную с появлением резкой границы «пленка SiC – подложка Si», позволяющей использовать метод рентгеновской рефлектометрии. Методом рентгеновской рефлектометрии и с помощью программы Henke показано, что плотность пленки составляет  $2,71 \text{ г/см}^3$ . Моделированием с помощью программы Release определены основные параметры многослойной системы толщиной 15,8 нм, состоящей из слоев  $\text{SiO}_2$  (0,8 нм),  $\text{SiC}_{0,8}$  (2,0 нм),  $\text{SiC}_{0,6}$  (13,0 нм) на подложке кремния.

Результаты могут быть использованы в нано- и микроэлектронике, а также при синтезе просветляющих покрытий и пассивации поверхности кремния при производстве солнечных элементов.

**Введение.** Высокая подвижность электронов, большие величины напряженности электрического поля пробоя в сочетании с достаточно большой шириной запрещенной зоны ( $E_g = 2.3\text{--}3.5 \text{ эВ}$  в зависимости от политипа) и прекрасными термомеханическими характеристиками обуславливают огромный интерес к использованию карбида кремния для изготовления полупроводниковых приборов различного назначения [1-5]. Карбид кремния также используется в качестве жаростойких материалов, используемых для конструкций передней стенки термоядерных реакторов, в покрытиях корпуса космических кораблей типа «Спейс Шаттл» [6], а также при изготовлении буров и нарезных дисков из SiC и т.д.

Аморфные тонкопленочные слои на основе кремния ( $\text{SiO}_2$ , SiN, a-SiC:H, и так далее) для просветляющих покрытий, диффузионных барьеров и пассивации слоев широко изучены в производстве солнечных элементов. Пассивирующие слои  $\text{SiO}_2$  и SiN являются особо привлекательными для изготовления высокоэффективных кремниевых солнечных элементов. Тем не менее, они имеют негативные недостатки, такие как необходимость высокотемпературных процессов, трудности в процессе фотолитографии и низкую термическую стабильность [7-9]. Гидрогенизированный аморфный карбид кремния [a-SiC:H] была изучен в качестве пассивирующих слоев солнечных элементов благодаря широкой запрещенной зоне, замечательному коэффициенту теплового расширения, соответствующего кремниевым пластинам, высокой термической и механической стабильности, превосходной стоимости по сравнению с другими материалами и пр.

Использование ионно-лучевых методов синтеза позволяет посредством имплантации ионов углерода  $\text{C}^+$  в кремниевую подложку создавать слои SiC на заданной глубине в необходимой стехиометрии и с малым уровнем загрязнений [10-13]. В данной работе исследуются характеристики пленок SiC, синтезированных имплантацией ионов углерода с энергией 2,5 кэВ в пластины монокристаллического кремния.

**Эксперимент.** Имплантация углерода была произведена в монокристаллические пластины Si ориентации (100) размером  $7 \times 7 \times 0,3$  мм<sup>3</sup> и удельным сопротивлением 4–5 Ом·см [14, 15]. Для предотвращения разогрева образца (20–25°C) плотность ионного тока не превышала 3 мкА/см<sup>2</sup>. Осуществлен синтез пленок SiC путем имплантации ионов <sup>12</sup>C<sup>+</sup> с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup> в Si.

Состав и структура пленки карбида кремния были исследованы методом ИК-спектроскопии с использованием ИК-спектрометра Nicolet iS-50 (Thermo Scientific, USA). Параметры пленок также были исследованы методом рентгеновской рефлектометрии при малых углах скольжения  $\theta$  путем регистрации угловой зависимости коэффициента отражения с использованием двух спектральных линий CuK $\alpha$  (0,154 нм) и CuK $\beta$  (0,139 нм) на установке CompleXRay C6. Селекция спектральных линий CuK $\alpha$  и CuK $\beta$  из полихроматического спектра осуществлялась с помощью полупрозрачного и объемного монохроматоров из пиролитического графита с углом мозаичности 0,5° [16, 17].

Математическое моделирование данных рентгеновской рефлектометрии по определению параметров пленок карбида кремния осуществлено с помощью современной программы Release [18].

### Результаты

Предварительно проведен расчет профиля  $NC$  распределения атомов углерода по глубине подложки Si (рисунок 1), который является распределением Гаусса, построенным в соответствии с выражением:

$$N(x) = \frac{D}{\Delta R_p (2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right], \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние от поверхности, а величины  $R_p(E)$  и  $\Delta R_p(E)$  оценочно определены как 6,3 нм и 3,7 нм, соответственно, из данных [19].

Отношение концентраций атомов  $N_C/N_{Si}$  в пике распределений для ионов C<sup>+</sup> составляет величину  $N_C/N_{Si} = 5,9$ , которая в максимуме распределения выбрана большой, чтобы изучить возможность получения обогащенных углеродом поверхностных тонких слоев методом ионной имплантации. Однако получение столь высокой концентрации ионов углерода с энергией 2,5 кэВ при имплантации дозой  $2,7 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup> может оказаться невозможным вследствие интенсивных процессов распыления поверхности. Можно провести приблизительную оценку толщины слоя, подвергшегося распылению. В случае малых доз ионов, когда состав имплантируемого слоя

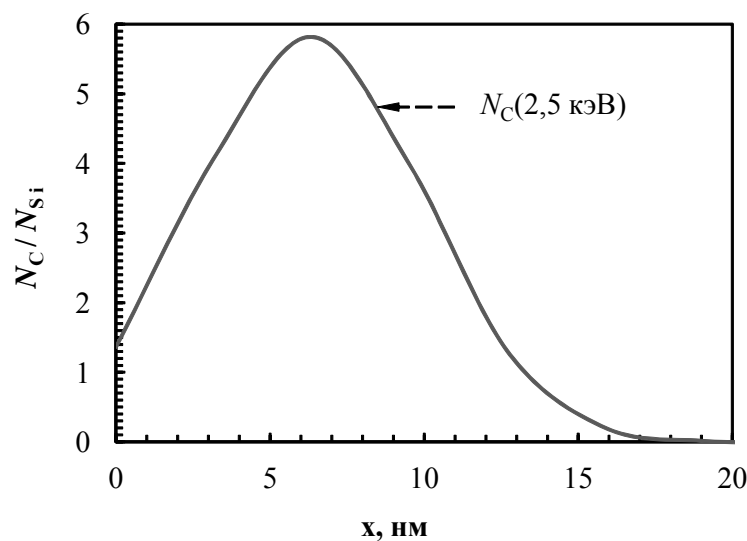


Рисунок 1 – Гауссов расчетный имплантационный профиль распределения в Si ионов <sup>12</sup>C с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>, построенный в соответствии с данными  $R_p(E)$  и  $\Delta R_p(E)$  по Gibbons et al. [19]

существенно не изменяется в процессе имплантации, можно использовать выражение для толщины распыленного слоя  $h = DK/N_0$ , где  $D$  – доза ионов ( $\text{м}^{-2}$ ),  $N_0$  – концентрация атомов в мишени ( $\text{м}^{-3}$ ),  $K$  – коэффициент распыления, или число атомов, выбиваемых одним падающим ионом. В этом случае коэффициент распыления определяется из выражения, приведенном в [20], согласно модели, описывающей механизм катодного распыления. Толщина распыленного слоя в случае имплантации ионов углерода с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  в кремний была определена аналогично как в [21] и составила 31,5 нм. Это существенно превосходит толщину слоя на рисунке 1 и сравнима с ней, если бы имплантация производилась в карбид кремния. Таким образом, концентрация углерода в слое  $N_C/N_{Si}$  должна быть существенно менее 5,9 и распределение атомов углерода имеет форму плато. Изменение состава и увеличение плотности слоя приводит к уменьшению проективного пробега  $R_p$  и страгглинга  $\Delta R_p$  и профиль распределения атомов углерода становится прямоугольным. Появление резкой границы «пленка SiC – подложка Si» позволяет предположить, что можно провести измерения толщины и плотности пленки  $\text{SiC}_{0,7}$  методом рентгеновской рефлектометрии и наблюдать осцилляции интенсивности рентгеновских отражений.

Действительно, были обнаружены осцилляции интенсивности, отнесенные к интерференции рентгеновских отражений в слое  $\text{SiC}_{0,43}$  (рисунок 2а). Первый минимум отражения с интенсивностью  $I_l = 304083$  импульсов наблюдается под углом  $2\theta = 0,420^\circ$ . Величина угла полного внешнего отражения была оценочно определена как угол, где интенсивность отражения приблизительно равна половине максимума  $I = I_l/2 = 152042$  импульса, то есть  $2\theta_c = 0,480^\circ$  (рисунок 2б, таблица 1), или  $\theta_c = 0,240^\circ = 4.189$  мрад. С помощью программы Henke [22] определено, что это значение  $\theta_c$  соответствует плотности пленки  $2,71 \text{ г/см}^3$ , занимающей промежуточное значение между плотностью Si ( $2,33 \text{ г/см}^3$ ) и SiC ( $3,21 \text{ г/см}^3$ ) и близко к плотности слоя  $\text{SiC}_{0,43}$ .

Приблизительная оценка толщин слоев проведена по формуле  $2d \cdot \sin \theta = \lambda$ , или, учитывая малые значения углов  $\theta$ ,  $d = \lambda/2\theta$  нм, где  $\lambda$  – длина волны  $\text{CuK}_\alpha$  (0,154 нм) или  $\text{CuK}_\beta$  (0,139 нм) излучения, а  $2\theta$  – расстояние между минимумами пика (таблица 2). Толщина полученного слоя  $\text{SiC}_{0,43}$  оказалась около 22 нм.

Моделированием с помощью программы Release [18] получена теоретическая кривая, близкая к экспериментальной (рисунок 3).

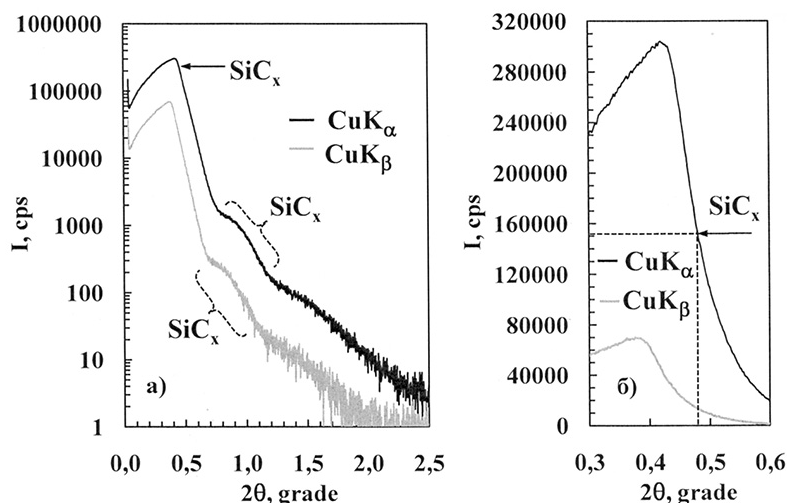


Рисунок 2 – Рентгеновская рефлектометрия с использованием двух спектральных линий  $\text{CuK}_\alpha$  (0,154 нм) и  $\text{CuK}_\beta$  (0,139 нм) параметров пленки  $\text{SiC}_{0,43}$ , синтезированной имплантацией в кремний ионов углерода с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$

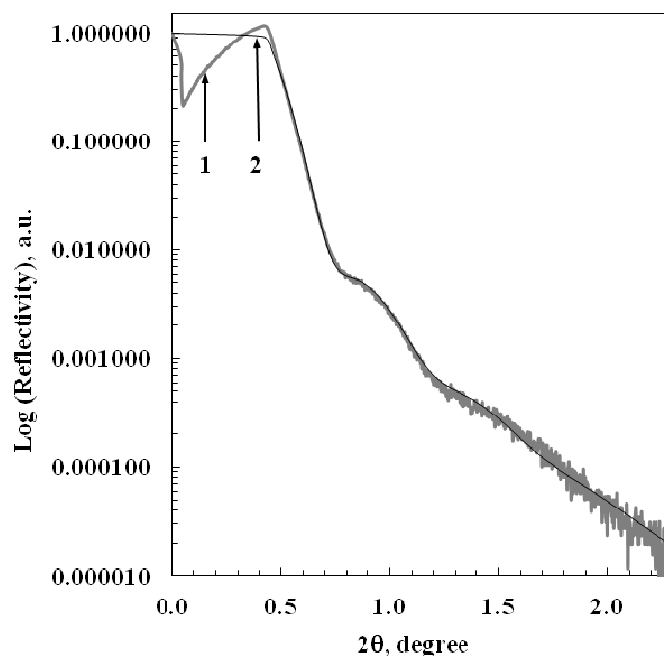
Таблица 1 – Определение плотности слоя SiC по программе Henke

| Пленка         | $I_{\text{max}}$ | $I_{\text{max}}/2$ | $2\theta_c$ | $\theta_c$ | $\theta_c$ | $\rho, \text{ г/см}^3$ |
|----------------|------------------|--------------------|-------------|------------|------------|------------------------|
| $\text{SiC}_x$ | 304083           | 152042             | 0.480       | 0.24       | 4.189      | 2.71                   |



Таблица 2 – Определение толщины слоя SiC<sub>x</sub> по формуле  $2d \cdot \sin\theta = \lambda$ , или  $d = \lambda / 2\theta$ 

| Пленка           | $(2\theta)_j$ | $(2\theta)_i$ | $j - i$ | $2\theta_{av} = [(2\theta)_j - (2\theta)_i] / (j - i)$ | $\lambda$ | $d = \lambda / 2\theta$ , nm |
|------------------|---------------|---------------|---------|--|-----------|------------------------------|
| SiC <sub>x</sub> | 1.166         | 0.776         | 1       | 0.39   | 0.15420   | 22.7                         |
| SiC <sub>x</sub> | 1.062         | 0.686         | 1       | 0.3760   | 0.13924   | 21.2                         |

Рисунок 3 – Моделирование с помощью программы Release [18] данных рентгеновской рефлектометрии параметров пленок SiC<sub>x</sub> после имплантации в кремний ионов углерода с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ 

Основные параметры многослойной системы, для которой получено приемлемое совпадение экспериментальной и расчетной кривых, были следующие:

- 1) слой SiO<sub>2</sub> (толщина  $d = 0.8$  нм, плотность  $\rho = 2.2 \text{ г/см}^3$ , шероховатость поверхности  $\sigma = 0.75$  нм);
- 2) слой SiC<sub>0.8</sub> ( $d = 2.0$  нм,  $\rho = 3.01 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 2.0$  нм);
- 4) слой SiC<sub>0.6</sub> ( $d = 13.0$  нм,  $\rho = 2.86 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 2.0$  нм);
- 5) подложка Si ( $\rho = 2.33 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 1.0$  нм).

Общая толщина слоя оказалась 15.8 нм, что сравнимо с расчетной. Плотность слоя SiC<sub>x</sub> и концентрация углерода оказалась выше, чем оценивалось из результатов рентгеновской рефлектометрии, а толщина меньше. Это может быть обусловлено приблизительными значениями критического угла полного внешнего отражения при оценках из эксперимента и более точными оценками при моделировании.

На рисунке 4 приведен ИК-спектр поглощения имплантированного ионами углерода (2,5 кэВ,  $2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) слоя кремния после имплантации. В спектре наблюдается широкий пик в области  $500 - 950 \text{ см}^{-1}$ , характерный для Si-C слоя. Выполнено математическое разложение ИК-спектра слоя карбида кремния, который представлен как сумма 9 компонент спектра. Определены положение, площадь и амплитуда каждой компоненты.

Сразу после имплантации отсутствие явно выраженной преобладающей компоненты при  $794 \text{ см}^{-1}$  указывает на некристаллическую природу слоя, хотя наличие компонент с максимумами на  $801,7$  и  $842,0 \text{ см}^{-1}$  указывает на присутствие тетраэдрических связей и мелкодисперсных нанокристаллов. Кроме того, наличие нескольких компонент с максимумами на  $928,3$ ,  $908,0$ ,  $764,0$ ,  $724,0$ ,  $679,8$  и  $644,6 \text{ см}^{-1}$  (таблица 3) явно указывают на аморфную природу имплантированного слоя и превалирование Si-C-связей нететраэдрической ориентации. Высокая концентрация углерода также предполагает значительное количество C-C-связей по сравнению с количеством

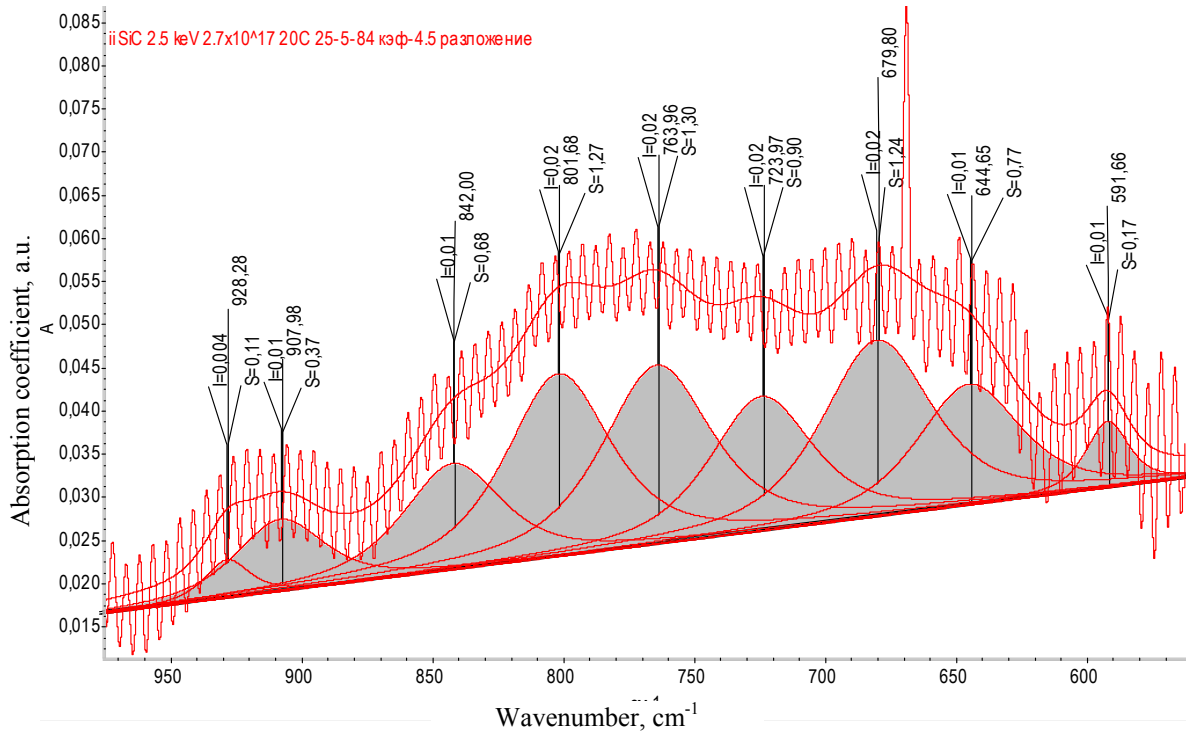


Рисунок 4 – Математическое разложение ИК-спектра поглощения слоя кремния имплантированного ионами углерода ( $E = 2.5$  кэВ,  $D = 2.7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ), полученного с применением эталонного образца

Si–C-связей. Кроме того, высокодозовая имплантация ( $E=2,5$  кэВ,  $D=2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) предполагает снижение количества атомов углерода в имплантированном слое за счет распыления поверхностного слоя, сравнимого по толщине с величиной  $R_p$  ионов углерода в кремнии.

Следует выделить следующие основные компоненты при: 764,0, 724,0, 679,8, 644,6 и 591,6  $\text{см}^{-1}$ , отражающие количество слабых удлинённых Si–C-связей аморфного карбида кремния, компоненты при 801,7, 842,0, 908,0 и 928,3  $\text{см}^{-1}$ , характерные для укороченных Si–C-связей, преобладающих на поверхности мелких нанокристаллов (менее 5 нм) [23] и в кластерах. Из отношения площади 1,27 отн.ед. компоненты при 801,7  $\text{см}^{-1}$  к общей площади SiC-пика 6,8 отн.ед. можно оценить, что около 18,6% общего количества Si–C-связей находится в объёме и поверхности нанокристаллов карбида кремния. Эта величина может отражать степень кристалличности слоя карбида кремния. Аморфная составляющая 81,4% представляет собой сумму укороченных (0,11; 0,37; 0,68 – 17,0%) и удлинённых (1,30; 0,90; 1,24; 0,77; 0,17 – 64,4%) оптически активных Si–C-связей в составе Si–C-кластеров. Таким образом, соотношение аморфной и кристаллической составляющих после имплантации можно считать как (81,4/18,6)%, или (5,53/1,27) отн.ед. Из этого следует, что среди образовавшихся во время имплантации Si–C-связей могут быть также связи, расстояния и углы между атомами которых в точности соответствуют расположению атомов в кристаллитах SiC. Полученные результаты не противоречат данным авторов [24], которые методом электронной дифракции обнаружили кристаллиты карбида кремния сразу после имплантации. Авторы обнаружили рефлексы слабоупорядоченных структур  $\beta$ -SiC и диффузные кольца аморфного углерода на электронограммах образцов до отжига.

Таблица 3 – Площади  $S$  и сумма девяти компонент SiC-пика при волновых числах  $w$  для ИК-спектров слоев кремния с гауссовым профилем распределения C в Si ( $E=2,5$  кэВ,  $D=2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ )

| Параметр             | Si-C- связи |       |       |       |       |       |       |       |       |            |
|----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| $w, \text{ см}^{-1}$ | 928,3       | 908,0 | 842,0 | 801,7 | 764,0 | 724,0 | 679,8 | 644,6 | 591,6 | $\Sigma S$ |
| $S, \text{ отн.ед.}$ | 0,11        | 0,37  | 0,68  | 1,27  | 1,30  | 0,90  | 1,24  | 0,77  | 0,17  | 6,8        |
| $S, \%$              | 1,6         | 5,4   | 10,0  | 18,6  | 19,1  | 13,2  | 18,2  | 11,3  | 2,5   | 100,0      |

### Заклучение

1. Проведены исследования структуры и состава тонкого аморфного слоя карбида кремния, синтезированного имплантацией в кремний ионов углерода с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ .

2. Выполнено математическое разложение ИК-спектра поглощения пленки. Основываясь на пропорциональности между площадью компоненты и количеством соответствующих Si–C-связей, определены площади  $S$  для 9 компонентов спектра. Показано, что 18,6% общего количества Si–C-связей находится в объеме и поверхности нанокристаллов карбида кремния, а аморфная составляющая 81,4% представляет собой сумму укороченных (17,0%) и удлиненных (64,4%) оптически активных Si–C-связей в составе Si–C-кластеров.

3. Показано, что достижение высокой расчетной концентрации атомов  $N_C/N_{Si}$  в пике распределения  $N_C/N_{Si} = 5,9$ , при имплантации ионов углерода с энергией 2,5 кэВ и дозой  $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  является невозможным вследствие интенсивных процессов распыления поверхности (31,5 нм). Изменение состава и увеличение плотности слоя в процессе имплантации приводит к трансформации формы профиля распределения атомов углерода в прямоугольную с появлением резкой границы «пленка SiC – подложка Si», позволяющей использовать метод рентгеновской рефлектометрии.

4. Методом рентгеновской рефлектометрии и с помощью программы Henke показано, что плотность пленки составляет  $2,71 \text{ г/см}^3$  и соответствует составу  $SiC_{0,43}$ . Моделированием с помощью программы Release получена теоретическая кривая, близкая к экспериментальной. При этом основные параметры многослойной системы толщиной 15,8 нм были следующие: 1) слой  $SiO_2$  (толщина  $d = 0,8 \text{ нм}$ , плотность  $\rho = 2,2 \text{ г/см}^3$ , шероховатость поверхности  $\sigma = 0,75 \text{ нм}$ ); 2) слой  $SiC_{0,8}$  ( $d = 2,0 \text{ нм}$ ,  $\rho = 3,01 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 2,0 \text{ нм}$ ); 3) слой  $SiC_{0,6}$  ( $d = 13,0 \text{ нм}$ ,  $\rho = 2,86 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 2,0 \text{ нм}$ ); 4) подложка Si ( $\rho = 2,33 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 1,0 \text{ нм}$ ).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. Wu, K.Zhou, C.Y. Yue, J. Wei, Y. Pan. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials // *Progress in Materials Science*. 72. 2015. P. 1–60.
- [2] Goldberg Y, Levinshtein ME, Romyantsev SL. Silicon carbide. In: Levinshtein ME, Romyantsev SL, Shur MS, editors. *Properties of advanced semiconductor materials GaN, AlN, SiC, BN, SiC, SiGe*. John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p. 93–148.
- [3] Presser R, Nickel KG. Silica on silicon carbide. *Crit Rev Solid State* 2008;33:1–99.
- [4] Silicon Carbide. A. Review of Fundamental Questions and Applications to Current Device Technology // Ed. by Choyke W.J., Matsunami H.M., Pensl G., Vol. I, II. Berlin: Akademie, 1998.
- [5] Kukushkin S.A., Osipov A.V., Gordeev S.K., Korchagina S.B. Nonequilibrium Heteroepitaxy of Silicon Carbide on Silicon // *Tech. Phys. Lett.* 2005. 31(10). P.859–861.
- [6] Oguri K., Sekigawa T. Heat resistant material and hot structure member both space shuttle, space shuttle, and method for producing heat resistant material for space shuttle. United State Patent. Sep.16, 2004. Pub. № US 2004/0180242 A1.
- [7] Kobayashi H., Imamura K., Kim W.B., Im S.S., Asuha. Nitric acid oxidation of Si (NAOS) method for low temperature fabrication of  $SiO_2/Si$  and  $SiO_2/SiC$  structures // *Appl. Surf. Sci.* 2010. 256. P.5744–5756.
- [8] Araki K., Yamaguchi M. An Si concentrator cell by single photolithography process // *Sol. Energ. Mat. Sol. C*. 2001. 65. P.437–443.
- [9] Lucovsky G: Atomic structure and thermal stability of silicon suboxides in bulk thin films and in transition regions at Si-SiO<sub>2</sub> interfaces // *J. Non. Cryst. Solids*. 1998. 227. P.1–14.
- [10] Liangdeng Y., Intarasiri S., Kamwanna T., Singkarat S. Ion beam synthesis and modification of silicon carbide. In book: *Ion beam applications in surface and bulk modification of insulators*. Austria, Vienna: IAEA-TECDOC-1607. 2008. P. 63–92.
- [11] Lindner J.K.N.. High-dose carbon implantations into silicon: fundamental studies for new technological tricks. *Appl.Phys. A*. 2003. Vol. 77. P. 27–38.
- [12] Borders J.A., Picraux S.T., Beezhold W. Formation of SiC in silicon by ion implantation. *Appl.Phys.Lett.* 1971. V. 18. 11. P. 509–511.
- [13] Bayazitov R.M., Haibullin I.B., Batalov R.I., Nurutdinov R.M., Antonova L.Kh., Aksenov V.P., Mikhailova G.N. Structure and photoluminescent properties of SiC layers on Si, synthesized by pulsed ion-beam treatment. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B*. 2003. V. 206. P. 984–988.
- [14] Nussupov K. Kh. and Beisenkhanov N.B. The Formation of Silicon Carbide in the SiC<sub>x</sub> Layers (x = 0.03–1.4) Formed by Multiple Implantation of C Ions in Si // In book: *Silicon Carbide - Materials, Processing and Applications in Electronic Devices*. Moumita Mukherjee (Ed.). Chapter 4. Rijeka, Croatia: *InTech*. 2011. P. 69–114.
- [15] Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Valitova I.V., Mit' K.A., Mukhamedshina D.M., Dmitrieva E.A. Structure properties of carbon implanted silicon layers // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2008. 19. P. 254–262.
- [16] Touryanski A.G., Vinogradov A.V., Pirshin I.V. X-ray reflectometer // Patent no. 6041098, US Cl. 378–70. Official Gazette March 21, 2000. P. 2960.

- [17] Турьянский А., Герасименко Н., Пиршин И., Сенков В. Многофункциональный рентгеновский рефлектометр для исследования наноструктур // *Наноиндустрия*. 2009. 5. С.40-45.
- [18] Апрелов С.А. Многоволновая рентгеновская рефлектометрия для анализа многокомпонентных пространственно упорядоченных структур. Автореф. канд. дисс. (2007). 23 с.
- [19] Gibbons J. F., Johnson W.S., and Mylroie S.W. *Projected Range Statistics: Semiconductors and Related Materials*. 2nd Ed. Stroudsburg, Penn: Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. 1975.
- [20] Смирнов В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств. Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 22 с.
- [21] K.Kh. Nussupov, N.B. Beisenkhanov, S.K. Zharikov, I.K. Beisembetov, B.K. Kenzhaliev, T.K. Akhmetov, and B.Zh. Seitov. Structure and Composition of Silicon Carbide Films Synthesized by Ion Implantation // *Physics of the Solid State*, 2014, Vol. 56, No. 11, pp. 2307–2321.
- [22] Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. – 1993. –Vol.54 (2). – P. 181. ([http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/)).
- [23] Бейсембетов И.К., Нусупов К.Х., Бейсенханов Н.Б., Жариков С.К., Кенжалиев Б.К., Ахметов Т.К., Сеитов Б.Ж. Распределение атомов углерода в кремнии после высокодозовой имплантации ионов  $C^+$  в Si // *Известия НАН РК. Серия физико-математическая*. – 2013. – № 6. – С. 50–59.
- [24] Kimura T., Kagiyama Sh. and Yugo Sh. Structure and annealing properties of silicon carbide thin layers formed by ion implantation of carbon ions in silicon. // *Thin Solid Films*. – 1981. – 81. – P. 319–327.

## REFERENCES

- [1] R. Wu, K.Zhou, C.Y. Yue, J. Wei, Y. Pan. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials // *Progress in Materials Science*. 72. 2015. P. 1–60.
- [2] Goldberg Y, Levinshtein ME, Romyantsev SL. Silicon carbide. In: Levinshtein ME, Romyantsev SL, Shur MS, editors. *Properties of advanced semiconductor materials GaN, AlN, SiC, BN, SiC, SiGe*. John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p. 93–148.
- [3] Presser R, Nickel KG. Silica on silicon carbide. *Crit Rev Solid State* 2008;33:1–99.
- [4] Silicon Carbide. A. Review of Fundamental Questions and Applications to Current Device Technology // Ed. by Choyke W.J., Matsunami H.M., Pensl G., Vol. I, II. Berlin: Akademie, 1998.
- [5] Kukushkin S.A., Osipov A.V., Gordeev S.K., Korchagina S.B. Nonequilibrium Heteroepitaxy of Silicon Carbide on Silicon // *Tech. Phys. Lett.* 2005. 31(10). P.859-861.
- [6] Oguri K., Sekigawa T. Heat resistant material and hot structure member both space shuttle, space shuttle, and method for producing heat resistant material for space shuttle. United State Patent. Sep.16, 2004. Pub. № US 2004/0180242 A1.
- [7] Kobayashi H., Imamura K., Kim W.B., Im S.S., Asuha. Nitric acid oxidation of Si (NAOS) method for low temperature fabrication of SiO<sub>2</sub>/Si and SiO<sub>2</sub>/SiC structures // *Appl. Surf. Sci.* 2010. 256. P.5744-5756.
- [8] Araki K., Yamaguchi M. An Si concentrator cell by single photolithography process // *Sol. Energ. Mat. Sol. C*. 2001. 65. P.437-443.
- [9] Lucovsky G: Atomic structure and thermal stability of silicon suboxides in bulk thin films and in transition regions at Si-SiO<sub>2</sub> interfaces // *J. Non. Cryst. Solids*. 1998. 227. P.1-14.
- [10] Liangdeng Y., Intarasiri S., Kamwanna T., Singkarat S. Ion beam synthesis and modification of silicon carbide. In book: *Ion beam applications in surface and bulk modification of insulators*. Austria, Vienna: IAEA-TECDOC-1607. 2008. P. 63–92.
- [11] Lindner J.K.N.. High-dose carbon implantations into silicon: fundamental studies for new technological tricks. *Appl.Phys. A*. 2003. Vol. 77. P. 27-38.
- [12] Borders J.A., Picraux S.T., Beezhold W. Formation of SiC in silicon by ion implantation. *Appl.Phys.Lett.* 1971. V. 18. 11. P. 509–511.
- [13] Bayazitov R.M., Haibullin I.B., Batalov R.I., Nurutdinov R.M., Antonova L.Kh., Aksenov V.P., Mikhailova G.N. Structure and photoluminescent properties of SiC layers on Si, synthesized by pulsed ion-beam treatment. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B*. 2003. V. 206. P. 984–988.
- [14] Nussupov K. Kh. and Beisenkhanov N.B. The Formation of Silicon Carbide in the SiC<sub>x</sub> Layers (x = 0.03–1.4) Formed by Multiple Implantation of C Ions in Si // In book: *Silicon Carbide - Materials, Processing and Applications in Electronic Devices*. Moumita Mukherjee (Ed.). Chapter 4. Rijeka, Croatia: *InTech*. 2011. P. 69–114.
- [15] Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Valitova I.V., Mit' K.A., Mukhamedshina D.M., Dmitrieva E.A. Structure properties of carbon implanted silicon layers // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2008. 19. P. 254–262.
- [16] Touryanski A.G., Vinogradov A.V., Pirshin I.V. X-ray reflectometer // Patent no. 6041098, US Cl. 378–70. Official Gazette March 21, 2000. P. 2960.
- [17] Touryanski A., Gerasimenko N., Pirshin I., Senkov V. Mnogofunktsionalnyii rentgenovskii reflektometr dlya issledovaniya nanostruktur. *Nanoindustriya*. 2009. 5. pp. 40-45. (In Russ).
- [18] Апрелов С.А. Многоволновая рентгеновская рефлектометрия для анализа многокомпонентных пространственно упорядоченных структур. Атореферат кандидатской диссертации. 2007. 23 с. (in Russ).
- [19] Gibbons J. F., Johnson W.S., and Mylroie S.W. *Projected Range Statistics: Semiconductors and Related Materials*. 2nd Ed. Stroudsburg, Penn: Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. 1975.
- [20] Smirnov V.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy tehnologii elektronnykh sredstv*. Ul'yanovsk: UIGTU. 2006. 22 s. (in Russ.).
- [21] K.Kh. Nussupov, N.B. Beisenkhanov, S.K. Zharikov, I.K. Beisembetov, B.K. Kenzhaliev, T.K. Akhmetov, and B.Zh. Seitov. Structure and Composition of Silicon Carbide Films Synthesized by Ion Implantation // *Physics of the Solid State*, 2014, Vol. 56, No. 11, pp. 2307–2321.
- [22] Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1993. Vol.54 (2). – P. 181. ([http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/)).

[23] Beisembetov I.K., Nussupov K.KH., Beisenkhanov N.B., Zharikov S.K., Kenzhaliev B.K., Akhmetov T.K., Seitov B.ZH. Raspređenje atomov ugleroda v kremnii posle visokodozovoi implantacii ionov  $C^+$  v Si// Izvestia NAN RK. Seria fiziko-matematičeskaja. 2013. № 6. S. 50–59.

[24] Kimura T., Kagiya Sh. and Yugo Sh. Structure and annealing properties of silicon carbide thin layers formed by ion implantation of carbon ions in silicon. // Thin Solid Films. 1981. 81. P. 319–327.

### ЖҰҚА КРЕМНИЙ КАРБИДІ ҚАБАТТАРЫН ИОНДЫҚ ИМПЛАНТАЦИЯ ӘДІСІМЕН СИНТЕЗДЕУ

**Б. Ж. Сейтов, И. Қ. Бейсембетов, К. Х. Нүсіпов, Н. Б. Бейсенханов,  
Б. К. Кенжалиев, Д. И. Бакранова**

Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

**Тірек сөздер:** кремний карбиді, иондық имплантация, құрылым, кристалдану.

**Аннотация.** Жұмыста, энергиясы 2,5 кэВ және дозасы  $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  көміртегі иондарын кремний пластиналарына имплантациялау арқылы аморфты кремний карбиді қабатын синтездеу жүзеге асырылған. Қабыршақтың жұту ИҚ-спектрін математикалық жіктеу жүзеге асырылған. Жалпы Si–C-байланыстардың 18,6% -ы кремний карбиді нанокристалы көлемінде және бетінде орналасқандығы, ал 81,4% аморфты бөлігі Si-C кластерлер құрамындағы қысқа (17%) және ұзын (64,4%) Si-C байланыстардың қосындысынан тұратындығы көрсетілген. Имплантация процесі кезінде қабат құрамының өзгеруі және тығыздығының артуы көміртегі атомдарының таралу профилінің тікбұрышты пішінге трансформациялануына алып келеді, яғни «SiC қабыршақ – Si матрица» қатаң шекарасы пайда болады, ал бұл, рефлектометрия әдісін қолдануға мүмкіндік береді. Рентгендік рефлектометрия әдісімен және Henke бағдарламасының көмегімен қабыршақ тығыздығы  $2,71 \text{ г/см}^3$  құрайтындығы көрсетілген. Release бағдарламасының көмегімен модельдеу арқылы кремний матрицасы бетіндегі  $\text{SiO}_2$  (0,8 нм),  $\text{SiC}_{0,8}$  (2,0 нм),  $\text{SiC}_{0,6}$  (13,0 нм) қабаттардан тұратын қалыңдығы 15,8 нм көпқабатты жүйенің негізгі параметрлері анықталған.

Жұмыстың нәтижелерін нано- және микроэлектроникада, сонымен қатар күн элементтерін өндіру барысында кремний бетін пассивтендіруге және антишашыратқыш жабындар синтездеуде пайдалануға болады.

*Поступила 07.07.2015 г.*

**Publication Ethics and Publication Malpractice  
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct ([http://publicationethics.org/files/u2/New\\_Code.pdf](http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf)). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://www.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*

Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 14.07.2015.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

17,25 п.л. Тираж 300. Заказ 4.