

**ОРБИТАСЫ НЕГІЗГІ ЖАЗЫҚТЫҚА АЗ ҚӨЛБЕУДЕГІ РЕЗОНАНСТЫҚ
ЖЖС $\alpha_4 < w < \alpha_3$ ИНТЕРВАЛЫНДАҒЫ ЭЛЛИПС ТИПТІ ҚОЗГАЛЫСЫ**

М. Д. Шыныбаев¹, А. А. Беков¹, Ж. С. Қекеев², Т. Д. Бердалиева²,
А. К. Жәмединова², Б. Н. Рахимжанов³

¹«Ұлттық Фарыштық Зерттеулер мен Технологиялар Орталығы» АҚ, Алматы, Қазақстан;

²«Сыр-Дария университеті», Жетісай, Қазақстан;

³«Ш. Уалиханов атындағы Көкшетау мемлекеттік университеті», Көкшетау, Қазақстан

Тірек сөздер: резонанс, орбита, кіші бөлгіш, тартылыс өрісі, күш функциясы, Жер серігі, полярлық координаттар.

Аннотация. Жерцентрлік координаттарда жазылған дифференциалдық теңдеулерді Фурье қатарына, немесе Тейлор қатарына, немесе Пуассон қатарына жіктел интегралдасақ шешімдерде кіші бөлгіш $m\omega_1 + n\omega_2 \approx 0$ пайда болады. Мұнда m, n – бүтін сандар, ω_1, ω_2 – бұрыштық жылдамдықтар. Осы «кіші бөлгіштер» қатар мүшелеріне кіреді. Бұл жағдайда шешімдердің бар болуы, басқада түрлі қасиеттері m, n сандарының арифметикалық қасиеттеріне байланысты болады [1].

Проблема әлі шешілмеген, ол ЖЖС қозғалысында да, сзызықтық емес дифференциал-дық теңдеулер теориясында да, және резонанстық теорияда да өзекті.

Жасанды жер серіктерінің атқаратын жұмыстарының түрлеріне байланысты түрлі резонанстық қозғалыстарды зерттеу өзекті болып тұр [2]. Өсіреле резонанстық және резонанстық емес аумактарда бірдей орынды болатын айнымалылар өте қажет [3].

«Резонанстар» және «кіші бөлгіштер» еki аспекттен тұрады «академиялық» және «инженерлік». Біріншісі орнықтылықты тексерумен орындалса, екіншісі стабилизациямен байланысты. Екіншісі нақты шешілуі үшін біріншісі шешілуі қажет.

Айтылғандарға байланысты мақаладағы зерттеулер өзекті болып табылады.

Поступила 07.07.2015 г.

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 g/cm³. By simulation using Release software, the main parameters of the multilayer system of 15.8 nm thickness, consisting of layers of SiO₂ (0.8 nm), SiC_{0.8} (2.0 nm), 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. Байсенханов, 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 $2,7 \times 10^{17}$ 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 г/см³. Моделированием с помощью программы Release определены основные параметры многослойной системы толщиной 15,8 нм, состоящей из слоев SiO₂ (0,8 нм), SiC_{0,8} (2,0 нм), SiC_{0,6} (13,0 нм) на подложке кремния.

Результаты могут быть использованы вnano- 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 ($E_g = 2.3\text{--}3.5$ эВ в зависимости от политипа) и прекрасными термомеханическими характеристиками обусловливают 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 (SiO₂, SiN, a-SiC:H, и так далее) для просветляющих покрытий, диффузионных барьеров и пассивации слоев широко изучены в производстве солнечных элементов. Пассивирующие слои SiO₂ 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, соответствующему 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 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 $7 \times 7 \times 0,3$ мм³ и удельным сопротивлением 4–5 Ом·см [14, 15]. Для предотвращения разогрева образца (20–25°C) плотность ионного тока не превышала 3 мА/см². Осуществлен синтез пленок SiC путем имплантации ионов $^{12}\text{C}^+$ с энергией 2,5 кэВ и дозой $2,7 \times 10^{17}$ см⁻² 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 рефлексометрии при малых углах скольжения θ путем регистрации угловой зависимости коэффициента отражения с использованием двух спектральных линий CuK α (0,154 нм) и CuK β (0,139 нм) на установке ComplExRay C6. Селекция спектральных линий CuK α и CuK β из полихроматического спектра осуществлялась с помощью полупрозрачного и объемного монохроматоров из пиролитического графита с углом мозаичности 0,5° [16, 17].

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

Результаты

Предварительно проведен расчет профиля $N(x)$ 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 $N_{\text{C}}/N_{\text{Si}}$ в пике распределений для ионов C^+ составляет величину $N_{\text{C}}/N_{\text{Si}} = 5,9$, 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⁻² 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

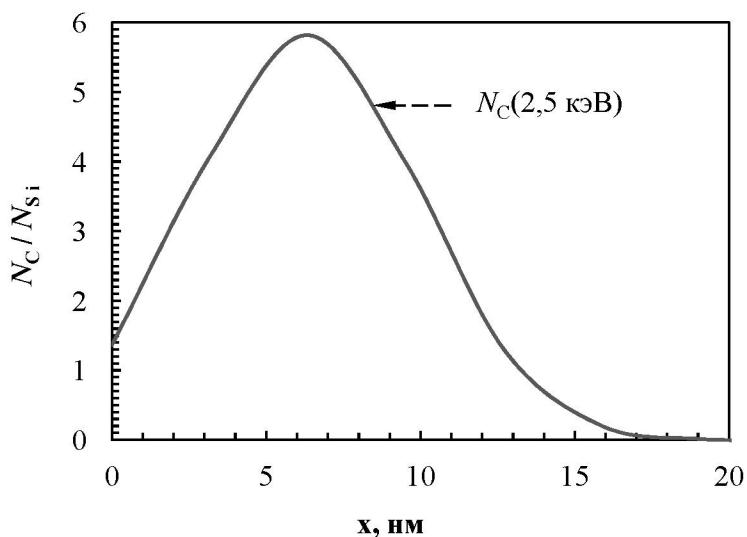


Рисунок 1 – Гауссов расчетный имплантационный профиль распределения в Si ионов ^{12}C с энергией 2,5 кэВ и дозой $2,7 \times 10^{17}$ см⁻², построенный в соответствии с данными $R_p(E)$ и $\Delta R_p(E)$ по Gibbons et al. [19]

существенно не изменяется в процессе имплантации, можно использовать выражение для толщины распыленного слоя $h = DK/N_0$, где D – доза ионов (м^{-2}), N_0 – концентрация атомов в мишени (м^{-3}), K – коэффициент распыления, или число атомов, выбиваемых одним падающим ионом. В этом случае коэффициент распыления определяется из выражения, приведенного 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 $N_{\text{C}}/N_{\text{Si}}$ 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 ΔR_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 $I_1 = 304083$ 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 $I = I_1/2 = 152042$ 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 θ_c соответствует плотности пленки 2,71 г/см³, занимающей промежуточное значение между плотностью Si (2,33 г/см³) и SiC (3,21 г/см³) 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 θ , $d = \lambda/2\theta$ нм, где λ – длина волны CuK_α (0,154 нм) или CuK_β (0,139 нм) излучения, а 2θ – 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).

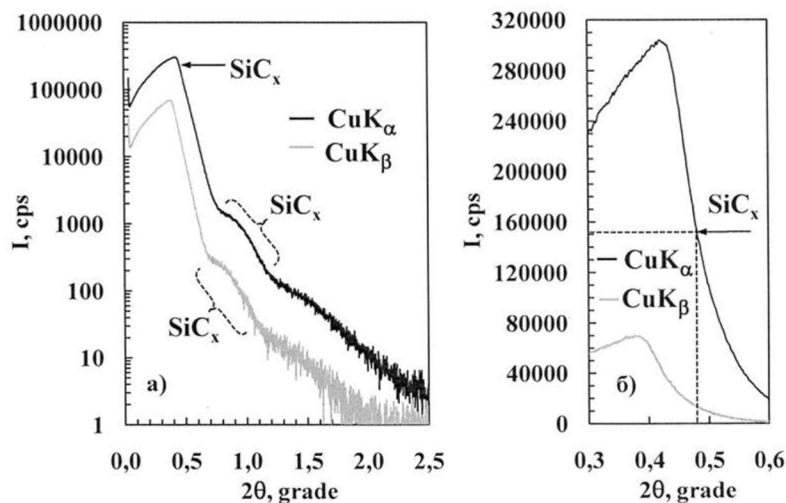


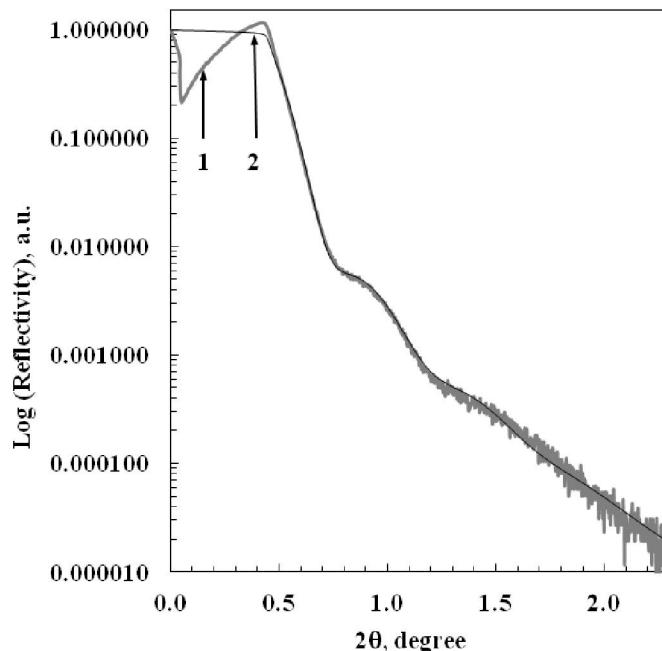
Рисунок 2 – Рентгеновская рефлектометрия с использованием двух спектральных линий CuK_α (0,154 нм) и CuK_β (0,139 нм) параметров пленки $\text{SiC}_{0,43}$, синтезированной имплантацией в кремний ионов углерода с энергией 2,5 кэВ и дозой $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Таблица 1 – Определение плотности слоя SiCx по программе Henke

Пленка	I_{max}	$I_{\text{max}}/2$	$2\theta_c$	θ_c	θ_c	$\rho, \text{g/cm}^3$
SiC_x	304083	152042	0.480	0.24	4.189	2.71

Таблица 2 – Определение толщины слоя SiCx по формуле $2d \cdot \sin\theta = \lambda$, или $d = \lambda / 2\theta$

Пленка	$(2\theta)_j$	$(2\theta)_i$	$j - i$	$2\theta_{av} = [(2\theta)_j - (2\theta)_i]/(j-i)$	λ	$d = \lambda/2\theta, \text{ nm}$
SiCx	1.166	0.776	1	0.39	0.15420	22.7
SiCx	1.062	0.686	1	0.3760	0.13924	21.2

Рисунок 3 – Моделирование с помощью программы Release [18] данных рентгеновской рефлектометрии параметров пленок SiCx 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_2 (толщина $d = 0.8 \text{ нм}$, плотность $\rho = 2.2 \text{ г/см}^3$, шероховатость поверхности $\sigma = 0.75 \text{ нм}$);
- 2) слой $\text{SiC}_{0.8}$ ($d = 2.0 \text{ нм}$, $\rho = 3.01 \text{ г/см}^3$, $\sigma = 2.0 \text{ нм}$);
- 3) слой $\text{SiC}0.6$ ($d = 13.0 \text{ нм}$, $\rho = 2.86 \text{ г/см}^3$, $\sigma = 2.0 \text{ нм}$);
- 5) подложка Si ($\rho = 2.33 \text{ г/см}^3$, $\sigma = 1.0 \text{ нм}$).

Общая толщина слоя оказалась 15.8 нм, что сравнимо с расчетной. Плотность слоя SiCx 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, $2,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$) 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 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

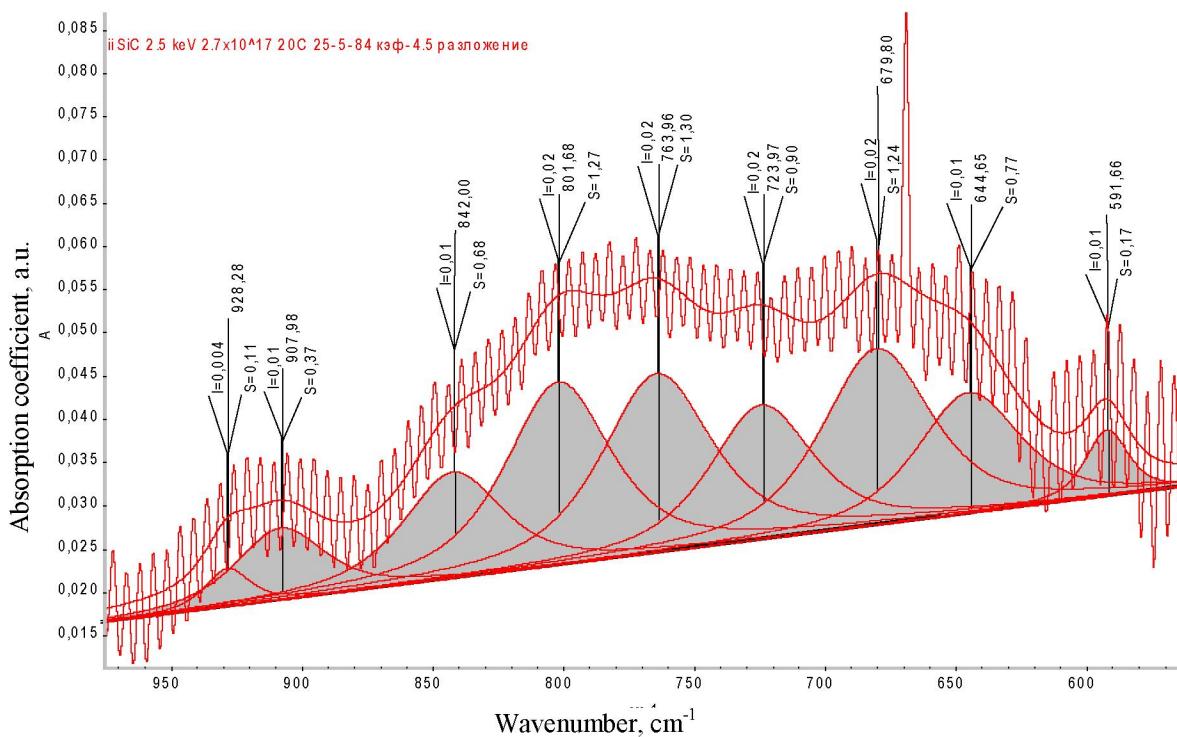


Рисунок 4 – Математическое разложение ИК-спектра поглощения слоя кремния имплантированного ионами углерода ($E = 2.5$ кэВ, $D = 2.7 \times 10^{17}$ см $^{-2}$), полученного с применением эталонного образца

Si–C-связей. Кроме того, высокодозовая имплантация ($E=2,5$ кэВ, $D=2,7 \times 10^{17}$ 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 см $^{-1}$, отражающие количество слабых удлиненных Si–C-связей аморфного карбида кремния, компоненты при 801,7, 842,0, 908,0 и 928,3 см $^{-1}$, характерные для укороченных Si–C-связей, превалирующих на поверхности мелких нанокристаллов (менее 5 нм) [23] и в кластерах. Из отношения площади 1,27 отн.ед. компоненты при 801,7 см $^{-1}$ к общей площади SiC-пика 6,8 отн.ед. можно оценить, что около 18,6% общего количества Si–C-связей находится в объеме 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 удлиненных (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 β -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 С в Si ($E=2,5$ кэВ, $D=2,7 \times 10^{17}$ см $^{-2}$)

Параметр	Si-C-связи										
	w , см $^{-1}$	928,3	908,0	842,0	801,7	764,0	724,0	679,8	644,6	591,6	ΣS
S , 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	

Заключение

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 $N_{\text{C}}/N_{\text{Si}}$ в пике распределения $N_{\text{C}}/N_{\text{Si}} = 5,9$, 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 рефлексии.

4. Методом рентгеновской рефлексии и с помощью программы Henke показано, что плотность пленки составляет $2,71 \text{ г/см}^3$ и соответствует составу $\text{SiC}_{0,43}$. 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 $\text{SiC}_{0,8}$ ($d = 2,0 \text{ нм}$, $\rho = 3,01 \text{ г/см}^3$, $\sigma = 2,0 \text{ нм}$); 3) слой $\text{SiC}_{0,6}$ ($d = 13,0 \text{ нм}$, $\rho = 2,86 \text{ г/см}^3$, $\sigma = 2,0 \text{ нм}$); 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, Levenshtein ME, Rumyantsev SL. Silicon carbide. In: Levenshtein ME, Rumyantsev 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-SiO₂ 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 SiCx 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] Tourianski 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 исследованияnanoструктур // 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. Kenzhaliев, 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/).
- [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 С⁺ в Si // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. – 2013. – № 6. – С. 50–59.
- [24] Kimura T., Kagiama 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, Levinstein ME, Rumyantsev SL. Silicon carbide. In: Levinstein ME, Rumyantsev 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, Immura K., Kim W.B., Im S.S., Asuha. Nitric acid oxidation of Si (NAOS) method for low temperature fabrication of SiO₂/Si and SiO₂/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-SiO₂ 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 SiCx 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. Mnogofunktionalnyii rentgenovskii reflektometr dlya issledovaniya nanostruktur. Nanoindustriya. 2009. 5. pp. 40-45. (In Russ.).
- [18] Aprelov S.A. Mnogovolnovaya rentgenovskaya reflektometriya dlya analiza mnogokomponentnykh prostranstvenno uporyadochenykh struktur. Aftoreferat kandidatskoi dissertation. 2007. 23 s. (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. Kenzhaliев, 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/).

[23] Beisembetov I.K., Nussupov K.KH., Beisenhanov N.B., Zharikov S.K., Kenzhaliev B.K., Akhmetov T.K., Seitov B.ZH. Raspredelenie atomov ugleroda v kremni posle visokodozovoi implantacii ionov C⁺ v Si// Izvestia NAN RK. Seria fiziko-matematicheskaya. 2013. № 6. S. 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.

ЖҰҚА КРЕМНИЙ КАРБИДІ ҚАБАТТАРЫН ИОНДЫҚ ИМПЛАНТАЦИЯ ӘДІСІМЕН СИНТЕЗДЕУ

**Б. Ж. Сейтов, И. Қ. Бейсембетов, К. Х. Нұсипов, 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 $2,7 \times 10^{17}$ см⁻² көміртегі иондарын кремний пластиналарына имплантациялау арқылы аморфты кремний карбиді қабатын синтездеу жүзеге асырылған. Қабыршақтың жұту ИК-спектрін математикалық жіктеу жүзеге асырылған. Жалпы Si-C-байланыстардың 18,6% -ы кремний карбиді нанокристалы көлеміндегі және бетіндегі орналасқандығы, ал 81,4% аморфты бөлігі Si-C кластерлер құрамындағы қыска (17%) және ұзын (64,4%) Si-C байланыстардың қосындысынан тұратындығы көрсетілген. Имплантация процесі кезінде қабат құрамының өзгеруі және тығыздығының артуы көміртегі атомдарының тарапу профилінің тікбұрышты пішінге трансформациялануына алып келеді, яғни «SiC қабыршақ – Si матрица» катан шекарасы пайда болады, ал бұл, рефлектометрия әдісін қолдануға мүмкіндік береді. Рентгендік рефлектометрия әдісімен және Henke бағдарламасының көмегімен қабыршақ тығыздығы 2,71 г/см³ құрайтындығы көрсетілген. Release бағдарламасының көмегімен модельдеу арқылы кремний матрицасы бетіндегі SiO₂ (0,8 нм), SiC_{0,8} (2,0 нм), SiC_{0,6} (13,0 нм) қабаттардан тұратын қалындығы 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.

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 4, Number 302 (2015), 269 – 276

UDC 512.95

THE DECISION IS SINGULAR THE INDIGNANT TASK OF CAUCHY BY METHOD OF SPECTRAL DECOMPOSITION

Shaldanbayev A.Sh., Imanbayeva A.B., Besbaev G.A.,
YuKGU of M. Auyezov, Shymkent
shaldanbaev51@mail.ru

Key words: spectr, spectral decomposition, deviating argument, singular indignation.

Abstract. In this work essentially new method of research is offered is singular the indignant task of Cauchy, based on the spectral theory of the equations with we deviating by argument.

Many problems of mechanics, physics, equipment and other areas of science lead to the differential and integro-differential equations with small parameter at the senior derivative. Systematic research of such equations (now they are called it is singular revolted) began after emergence of the fundamental works of A. N. Tikhonov which paid attention of many researchers to the equations with small parameter at the senior derivative. In these works the general problem definition of Cauchy for systems of the nonlinear ordinary differential equations with small parameter at the senior derivative is given, and the theorems of limit transition establishing connection