

**Нусупов К.Х.¹, Бейсенханов Н.Б.^{1*}, Бакранова Д.И.¹,
Кейінбай С.¹, Сейтов Б.Ж.²**

¹Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

²Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави, Казахстан, г. Туркестан

*e-mail: beisen@mail.ru

СТРУКТУРА ПЛЕНОК КАРБИДА КРЕМНИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Данная работа посвящена синтезу твердых пленок карбида кремния (SiC_x) на поверхности монокристаллического кремния (c-Si) с тонкой прослойкой аморфного кремния (a-Si) методом магнетронного распыления и установлению новых закономерностей по влиянию термической обработки на состав, процессы кристаллизации и структуру слоев. Принципиальным отличием этого метода синтеза от традиционно используемого метода магнетронного распыления состоит в высокочастотном режиме 13,56 МГц магнетронного распыления мишени кремния и мишени графита. При режиме осаждения: rf – 150 Вт, 13,56 МГц; Ar – 2,4 л/час, 0,4 Па; 100°C, 10800 сек получена аморфная пленка SiC_x с высокой плотностью ~ 3,52 г/см³, содержащая нанокластеры с преобладанием укороченных SiC-связей, поглощающих при 860 см⁻¹. Быстрый отжиг (970°C, 5 мин, вакуум) приводит к частичному распаду кластеров, улучшению структуры пленки, формированию нанокристаллов α -SiC, β -SiC и Si и уменьшению плотности пленки. На основании данных рентгеновской дифракции и плотности пленки (3,522 и 3,397 г/см³ до и после отжига) сделано предположение о присутствии включений алмаза и плотных кластеров.

Ключевые слова: кремний, полупроводники, карбид кремния, кристаллизация, магнетронное распыление.

Nussupov K.Kh.¹, Beisenkhanov N.B.^{1*}, Bakranova D.I.¹,
Keyinbay S.¹, Seitov B.Zh.²

¹Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty

²International Kazakh-Turkish Khodja Ahmed Yasawi University, Kazakhstan, Turkestan

*e-mail: beisen@mail.ru

The structure of silicon carbide films synthesized by magnetron sputtering

This paper is devoted to the synthesis of solid silicon carbide (SiC_x) films on the surface of single-crystal silicon (c-Si) with a thin interlayer of amorphous silicon (a-Si) by magnetron sputtering and to establish new regularities in the influence of heat treatment on composition, crystallization processes and structure of layers. A principal difference between this method of synthesis and the traditionally used magnetron sputtering is the 13.56 MHz high-frequency magnetron sputtering of a silicon target and a graphite target. In the deposition mode: rf – 150 W, 13.56 MHz; Ar – 2.4 l/h, 0.4 Pa; 100°C, 10800 s, an amorphous SiC_x film with a high density of ~ 3.52 g/cm³ containing nanoclusters with a predominance of shortened SiC bonds absorbing at 860 cm⁻¹, was obtained. Rapid annealing (970°C, 5 min, vacuum) leads to partial disintegration of clusters, an improvement in the structure of the film, the formation of α -SiC, β -SiC and Si nanocrystals and a decrease in the density of the film. Based on the data of X-ray diffraction and density of the film (3,522 and 3,397 g/cm³ before and after annealing, respectively), it was suggested that there are inclusions of diamond and dense clusters.

Key words: Silicon, semiconductor, silicon carbide, crystallization, magnetron sputtering.

Нүсіпов К.Х.¹, Бейсенханов Н.Б.^{1*}, Бакранова Д.И.¹,
Кейінбай С.¹, Сейтов Б.Ж.²

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

²Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан, Түркістан қ.

*e-mail: beisen@mail.ru

Магнетрондық ыдырату әдісімен синтезделген кремний карбиді қабыршақтарының құрылымы

Бұл мақала магнетрондық ыдырату әдісі арқылы аморфты кремнийдің (a-Si) жұқа қабаты бар монокристалдық кремний (c-Si) бетіндегі қатты кремний карбиді қабыршақтардың (SiC_x) синтезіне, және қабат құрамына, құрылымына, кристаллизация процестеріне термиялық өңдеудің әсер етуі туралы жаңа заңдардың анықтауна арналған. Магнетрондық ыдырату әдетте қолданылатын тәсілінен осы синтездеу әдісінің негізгі айырмашылығы кремний және графит нысандарының магнетрондық 13,56 МГц жоғары жиілікті режимі болып табылады. Тұндыру режимінде: rf – 150 Вт, 13,56 МГц; Ar – 2,4 л/сағ, 0,4 Па; 100 °С, 10800 сек, 860 см⁻¹ сіңіретін қысқа SiC байланыстары басым болатын нанокластерлерді қамтитын ~ 3,52 г/см³ жоғары тығыздығы бар аморфты SiC_x пленкасы алынды. Тұндыру режимінде: rf – 150 Вт, 13,56 МГц; Ar – 2,4 л / сағ, 0,4 Па; 100 °С, 10 800 с, жоғары тығыздығы ~ 3,52 г / см³ болатын аморфты SiC_x қабыршағы алынды. Қабыршақта 860 см⁻¹ сіңіретін қысқартылған SiC байланыстары басым болатын нанокластерлер бар екенін көрсетілді. Жылдам күйдіру (970 °С, 5 мин, вакуум) кластерлердің жартылай ыдырауына, қабыршақ құрылымын жақсартуға, α-SiC, β-SiC және Si нанокристалдарының пайда болуына, қабыршақтың тығыздығын төмендетуге әкеп соғады. Рентгендік дифракция және пленка тығыздығының деректері бойынша (сәйкесінше 3,522 және 3,397 г / см³, күйдіргенге дейін және кейін), алмаз және тығыз кластерлердің қосындылары бар деп ұсынылды.

Түйін сөздер: кремний, жартылай өткізгіш, кремний карбиді, кристаллдану, магнетрондық ыдырату.

Введение

Ценные для полупроводниковой электроники физико-химические свойства карбида кремния, такие как широкая запрещенная зона ($E_g = 2,3-3,5$ эВ), высокие температура плавления (2830 °С), химическая стойкость, теплопроводность, подвижность носителей заряда и твердость (33400 Мн/м²) обусловили его широкое применение в **радиационно-стойкой электронике, высокотемпературной электронике, высокочастотной электронике, оптоэлектронике** [1], а также в качестве жаростойких материалов при изготовлении нарезных дисков и буров, в конструкции термоядерных реакторов [2], в покрытиях корпуса космических кораблей [3]. Электронные приборы на основе SiC обладают высоким быстродействием и возможностью работы при температурах до 600 °С [4].

В связи с трудностями синтеза кристаллического карбида кремния малогабаритные и дорогостоящие SiC-пластины сильно ограничивают их применение в крупномасштабном промышленном производстве [5]. Кроме того, различие в параметрах решеток карбида кремния и монокристаллического кремния составляет ~20%, а разница в их термических коэффициентах расширения ~8% [6]. Поэтому, выращивание эпи-

таксиальных слоев SiC на подложке Si является нетривиальной задачей [6, 7]. Например, методом ионной имплантации [1, 4, 5, 8, 9], ионно-лучевого распыления [10, 11], либо плазмо-стимулированного химического осаждения из газовой фазы [12] удается получить аморфные пленки SiC с последующей их кристаллизацией в процессе отжига (900-1300 °С). Были достигнуты успехи по синтезу тонких эпитаксиальных пленок SiC на Si методом замещения атомов [6, 7, 13-15]. Метод магнетронного распыления получил распространение благодаря относительно большим скоростям роста, хорошей адгезии пленок SiC и достаточно низкой стоимости технологического процесса [16-19]. В [16] предложено магнетронное распыление двухкомпонентной мишени, которая составлена из отдельных частей C и Si. В целом, при температурах ниже 500 °С структура пленок SiC является аморфной. При магнетронном распылении на постоянном токе обычно используются поликристаллические сплавленные мишени из кремния и углерода [17]. Альтернативой использования сплавленной мишени является распыление мишени из чистого кремния в смеси аргона и метана [18]. Полученные пленки SiC имели поликристаллическую структуру с нанометровыми столбчатыми зернами. В [19] предложен метод осаждения аморфного a-Si_{1-x}C_x

с помощью радиочастотного магнетронного со-распыления двух или нескольких мишеней.

В данной работе методом магнетронного распыления осуществлен синтез толстых пленок карбида кремния на поверхности тонкого слоя аморфного кремния, выращенного на поверхности монокристаллической подложки кремния.

Эксперимент

Осаждение пленок SiC осуществлено на установке МАГНА ТМ-200-01 при одновременном распылении мишени кремния и мишени графита в высокочастотном режиме 13,56 МГц при мощности 150 Вт, расходе газа Ar 2,4 л/час, давлении в камере 0,4 Па, температуре подложки 100°

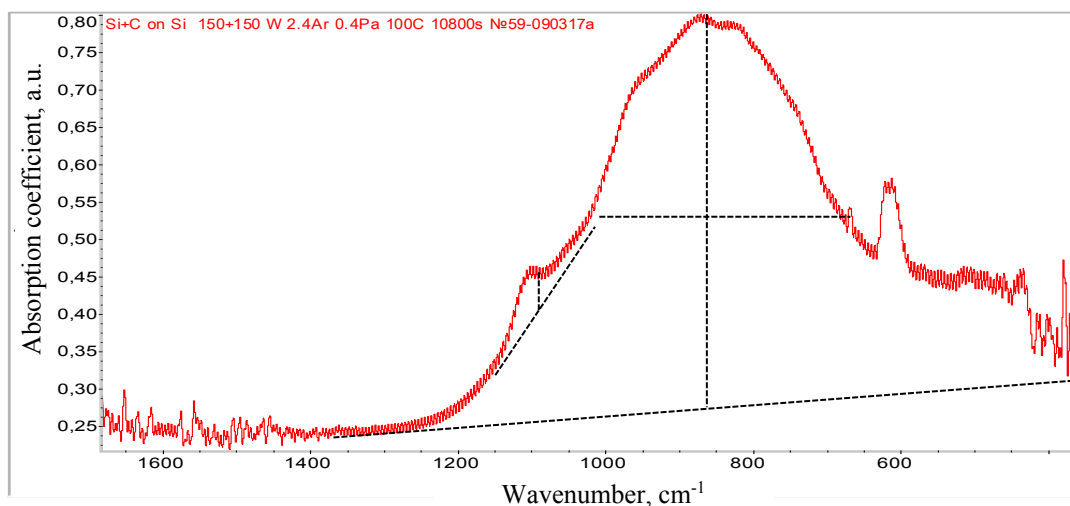


Рисунок 1 – Спектр ИК-поглощения пленки SiC_x, осажденной на поверхности пластины c-Si магнетронным распылением (150 Вт, 10800 с, Ar– 2,4 л/ч, 0,4 Па)

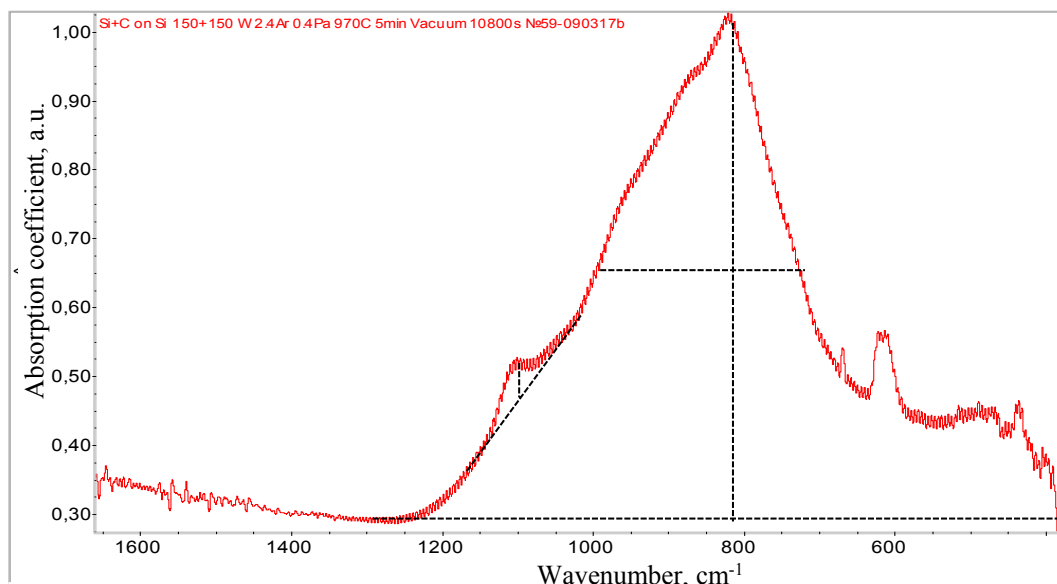


Рисунок 2 – Спектр ИК-поглощения пленки SiC, осажденной на поверхности пластины Si магнетронным распылением (150 Вт, 10800 с, Ar– 2,4 л/ч, 0,4 Па) после отжига при 970°С в течение 5 мин (вакуум)

На рентгеновской дебаеграмме после быстрого отжига (970°C , 5 мин, вакуум) обнаружено 9 линий (рис. 3). Только одна линия соответствует фазе нано-Si – наиболее интенсивной линии Si(111). 3 линии из остальных 8 линий соответствуют гексагональной фазе α -SiC и одна линия β -SiC. 3 линии из оставшихся 4 линий по расположению могут соответствовать как линиям β -SiC, так и α -SiC, поскольку расположение этих линий на дебаеграмме по значениям углов 2θ очень близко друг к другу. Известно, что нагревание β -SiC до температур выше 1700°C [22] либо 2000°C [23,24] способно приводить к постепенному переходу кубической фазы (β -SiC) в гексагональную (2H, 4H, 6H, 8H) α -SiC и ромбическую

(15R) фазу [22]. Низкотемпературное формирование α -SiC может быть обусловлено влиянием высокочастотного режима 13,56 МГц магнетронного распыления, использованного при одновременном распылении мишеней кремния и графита.

Кроме того, линия α -SiC(105) в области $2\theta = 44-45^{\circ}$ обладает максимальной интенсивностью на дебаеграмме, хотя согласно базе данных дифрактометра «ДРОН-6» линия должна иметь низкую интенсивность 28% – в два раза слабее линии α -SiC(102). Известно, что максимальной интенсивностью (100%) в области $2\theta = 44,14^{\circ}$ обладает линия C(111) алмаза. Предположено, что пленки SiC могут содержать нановключения алмаза.

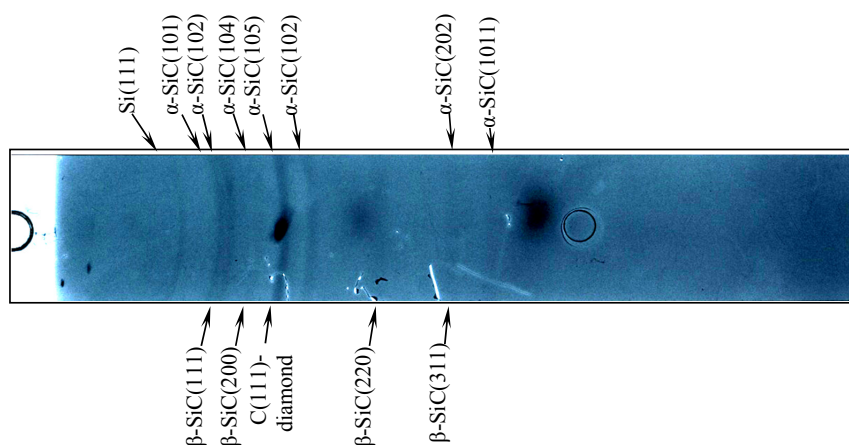


Рисунок 3 – Дебаеграмма пленки SiC, осажденной на поверхности Si магнетронным распылением (150 Вт, 10800 с, Ar – 2,4 л/ч, 0,4 Па) после отжига (970°C , 5 мин, вакуум)

В связи с этим, были проведены измерения плотности этой пленки до отжига методом рентгеновской рефлектометрии с использованием двух спектральных линий CuK_α и CuK_β . (рис.4). По величине критического угла полного внешнего отражения $\theta_c = 0,27366^{\circ}$ (таблица 1, рис. 4б) с помощью программы Henke [25] определена плотность пленки SiC_x , которая составила $3,522 \text{ г/см}^3$, превосходит плотность карбида кремния $3,21 \text{ г/см}^3$ и почти равна плотности алмаза $3,51 \text{ г/см}^3$.

Не наблюдается осцилляций интенсивности (рис. 4а) вследствие большой длительности напыления (10800 сек). Рентгеновский рефлектометр обычно определяет толщины пленок в пределах 2-400 нм. При больших толщинах осцилляции становятся мелкими и практически сливаются друг с другом.

Высокая плотность аморфной пленки SiC_x сразу после осаждения при комнатной температуре является необычным фактом и требует дальнейших исследований. На других образцах плотность пленок, синтезированных аналогичным образом, составила величины в пределах $3,204 - 3,593 \text{ г/см}^3$ сразу после осаждения в зависимости от расположения образца в камере. Предварительные трактовка результатов предполагает в качестве первопричины влияние высокочастотной плазмы на структуру осаждаемой пленки, которое приводит к формированию плотных углеродных и углеродно-кремниевых кластеров, содержащих кратные межатомные связи.

После быстрого отжига (970°C , 5 мин, вакуум) плотность пленки, дебаеграмма которой показана на рис. 3, уменьшается в 1,04 раза до

3,397 г/см³ (рис. 5, таблица 2). Отжиг приводит к улучшению качества структуры поверхности пленки с увеличением интенсивности главного максимума рентгеновских отражений от 152997 импульсов в секунду (рис. 4б, таблица 1) до 262149 импульсов в секунду (рис. 5б, таблица 2). Предполагается, что происходит частичный распад плотных кластеров и форми-

рование нанокристаллов SiC. Как было показано в [9], интенсивные процессы твердофазной кристаллизации в пленках карбида кремния начинаются при температуре 900°C, а интенсивное формирование гранулярной структуры поверхности с появлением зерен и увеличением шероховатости происходит при температурах 1100°C и выше.

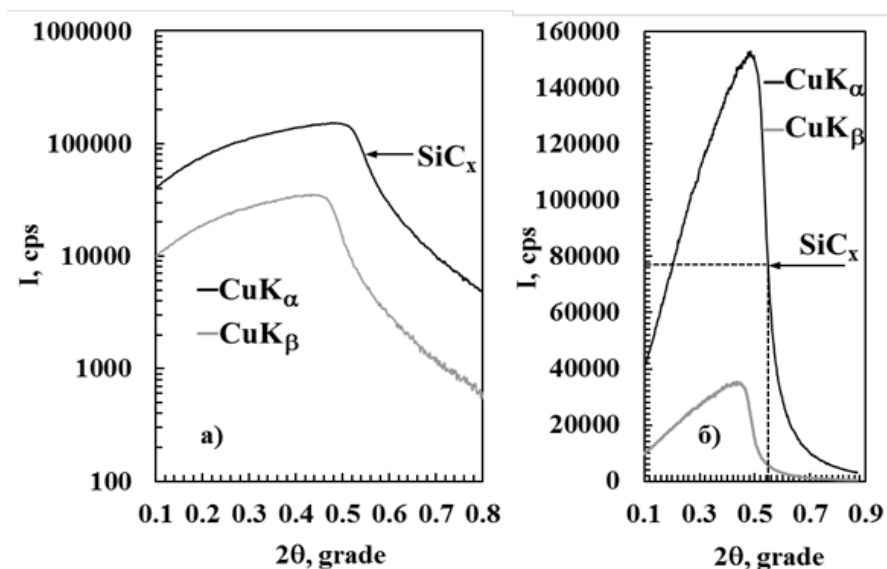


Рисунок 4 – Рентгеновская рефлектометрия пленки SiC_x, осажденной на поверхности пластины Si магнетронным распылением (150 Вт – rf, 10800 сек, Ar–2,4 л/час, 0,4 Па), в логарифмическом (а) и натуральном (б) масштабах

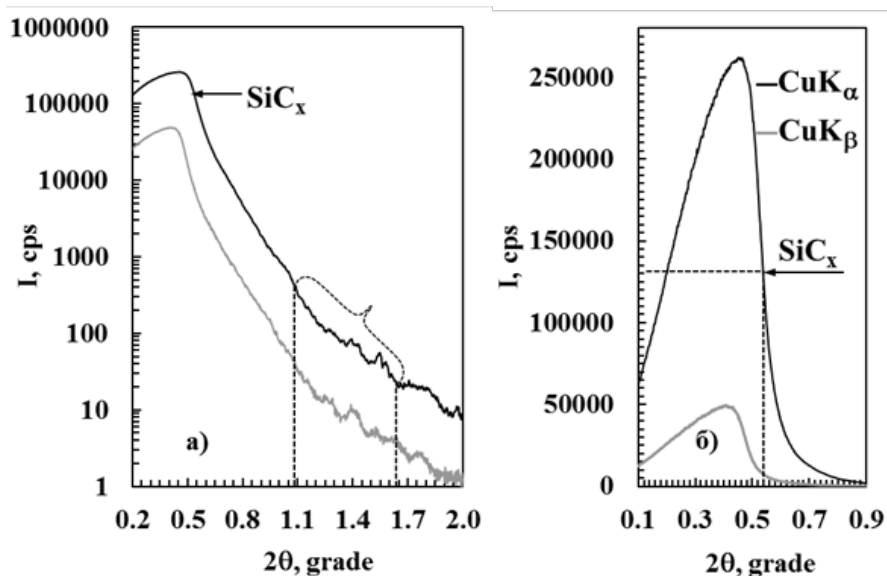


Рисунок 5 – Рентгеновская рефлектометрия пленки SiC_x, осажденной на s-Si магнетронным распылением (150 Вт – rf, 10800 сек, Ar–2,4 л/час, 0,4 Па) после отжига (970°C, 5 мин, вакуум), в логарифмическом (а) и натуральном (б) масштабах

Таблица 1 – Определение плотности ρ покрытия по программе Henke

Пленка	$I_{\max}, \text{с}^{-1}$	$I_{\max}/2, \text{с}^{-1}$	$2\theta_{\text{с}}, \text{градус}$	$\theta_{\text{с}}, \text{градус}$	$\theta_{\text{с}}, \text{мрад}$	$\rho, \text{г/см}^3$
SiC_x	152997	76499	0,54731	0,27366	4,776	3,522

Таблица 2 – Определение плотности ρ покрытия по программе Henke

Пленка	$I_{\max}, \text{с}^{-1}$	$I_{\max}/2, \text{с}^{-1}$	$2\theta_{\text{с}}, \text{градус}$	$\theta_{\text{с}}, \text{градус}$	$\theta_{\text{с}}, \text{мрад}$	$\rho, \text{г/см}^3$
SiC_x	262149	131075	0,53746	0,26873	4,690	3,397

Таблица 3 – Определение толщины d слоя по формуле $2d \cdot \sin\theta = \lambda$, или $d = \lambda/2\theta$

Пленка	$(2\theta)_p, \text{градус}$	$(2\theta)_r, \text{градус}$	$j - i$	$2\theta_{\text{ав}} = [(2\theta)_j - (2\theta)_i] / (j - i), \text{градус}$	$\lambda, \text{нм}$	$d, \text{нм}$
SiC_x	1.648	1.082	14	0.0404	0.15420	218.5
SiC_x	1.480	0.970	14	0.0364	0.13923	219.0

На рис. 5 видны крупные осцилляции интенсивности, состоящие из мелких пиков, т.е. пленка является многослойной. Тонкий слой дает крупные осцилляции, а толстый слой дает мелкие осцилляции, соответствующие толщине

219 нм (таблица 3). Этот слой плотностью $3,397 \text{ г/см}^3$ предположительно отличается по плотности от нижележащего слоя, и поэтому появились осцилляции.

Литература

- 1 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.
- 2 Zinkle S.J., Was G.S. Materials challenges in nuclear energy // *Acta Materialia.* – 2013. – Vol. 61. – P. 735–758. doi: 10.1016/j.actamat.2012.11.004.
- 3 United State Patent. Heat resistant material and hot structure member both space shuttle, space shuttle, and method for producing heat resistant material for space shuttle / Oguri K., Sekigawa T. // *Pub. № US 2004/0180242 A1.*
- 4 Chen D., Wong S.P., Yang Sh., Mo D. Composition, structure and optical properties of SiC buried layer formed by high dose carbon implantation into Si using metal vapor vacuum arc ion source // *Thin Solid Films.* – 2003. – 426. – P. 1–7.
- 5 Liangdeng Y., Intarasiri S., Kamwanna T., Singkarat S. In book: Ion beam applications in surface and bulk modification of insulators. – Austria, Vienna: IAEA-TECDOC-1607. 2008. – P. 63.
- 6 Kukushkin S.A. and Osipov A.V. Topical review. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films // *J. Phys. D Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 47. – P. 313001–313041.
- 7 Kukushkin S. A. and Osipov A.V., New method for growing silicon carbide on silicon by solid-phase epitaxy: model and experiment // *Phys. Solid State.* – 2008. – Vol. 50 (7). – P. 1238–1245.
- 8 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 // *J. of Materials Science: Materials in Electronics.* – 2008. – Vol. 19. – P. 254–262.
- 9 Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Zharikov S.K., Beisembetov I.K., Kenzhaliev B.K., Akhmetov T.K., Seitov B.Zh. Structure and Composition of Silicon Carbide Films Synthesized by Ion Implantation // *Phys. Solid State.* – 2014. – Vol. 56 (11). – P. 2307–2321.
- 10 Beisembetov I.K., Nusupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Zharikov S.K., Kenzhaliev B.K., Akhmetov T.K., and Seitov B.Zh.. Synthesis of SiC Thin Films on Si Substrates by Ion-Beam Sputtering // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* – 2015. – Vol. 9, No. 2. – P. 392–399.
- 11 Volz K., Kiuchi M., Okumura M., Ensinger W. C–SiC–Si gradient films formed on silicon by ion beam assisted deposition at room temperature // *Surface and Coatings Technology.* – 2000. – Vol. 128–129. – P. 274–279.
- 12 Sun Y., Miyasato T., Wigmore J.K., Sonoda N., Watari Y. Characterization of 3C–SiC films grown on monocrystalline Si by reactive hydrogen plasma sputtering // *Journal of Applied Physics.* – 1997. – Vol. 82 (5). – P. 2334–2341.

- 13 Kukushkin S.A., Osipov A.V., Feoktistov N.A. Synthesis of epitaxial silicon carbide films through the substitution of atoms in the silicon crystal lattice: a review // *Phys. Solid State*. – 2014. – Vol.56 (8). – P. 1507–1535.
- 14 Kukushkin S.A., Nusupov K.Kh., A.V. Osipov, N.B. Beisenkhanov and D.I. Bakranova. X-Ray Reflectometry and Simulation of the Parameters of SiC Epitaxial Films on Si(111), Grown by the Atomic Substitution Method // *Physics of the Solid State*. – 2017. – Vol. 59 (5). – P. 1014–1026.
- 15 Kukushkin S.A., Nussupov K.Kh., Osipov A.V., Beisenkhanov N.B., Bakranova D.I. Structural properties and parameters of epitaxial silicon carbide films, grown by atomic substitution on the high-resistance (111) oriented silicon // *Superlattices and Microstructures*. – 2017. – Vol.111. – P.899-911. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749603617310200>
- 16 Перекрестов В.И., Корнющенко А.С., Загайко И.В. Получение пленок карбида кремния методом магнетронного распыления составной углерод-кремниевой мишени // *Журнал нано- и электронной физики*. – 2015. – Vol.7 (2). – P. 02016.
- 17 Rajab S.M., Oliveira I.C., Massi M., Maciel H.S., dos Santos Filho S.G., Mansano R.D. Effect of the thermal annealing on the electrical and physical properties of SiC thin films produced by RF magnetron sputtering. // *Thin Solid Films*. – 2006. – Vol.515. – P.170-175.
- 18 Lei Y.M., Y.H. Yu, C.X. Ren, S.C. Zou, D.H. Chen, S.P. Wong, I.H. Wilson. Compositional and structural studies of DC magnetron sputtered SiC films on Si(111) // *Thin Solid Films*. – 2000. – Vol.365.– P. 53-57.
- 19 Joung Y.-H., Kang H.I., Kim J.H., Lee H.-S., Lee J., Choi W.S. SiC formation for a solar cell passivation layer using an RF magnetron co-sputtering system // *Nanoscale Res. Lett.* – 2012. – Vol.7(1). – P.22.
- 20 Touryanski A.G., Vinogradov A.V., Pirshin I.V., X-ray reflectometer. US Patent No. 6041098 -2000.
- 21 Mutschke H., Andersen A.C., Clément D., Henning T. Peiter. Infrared properties of SiC particles // *Astron.Astrophys.* – 1999. – Vol.345. – P.187–202.
- 22 Карбид кремния. Под ред. Г.Хенита и Р.Рол, пер. с англ. – М. Мир, 1972. – 349 с.
- 23 Parish C.M., Koyanagi T., Kondo S., Katoh Y. Irradiation-induced β to α SiC transformation at low temperature // *Sci Rep.* – 2017. – Vol.7. – P.1198.
- 24 Meher S., Rooyen I.J., Lillo T.M. A Novel Dual-Step Nucleation Pathway in Crystalline Solids under Neutron Irradiation // *Sci Rep.* – 2018. – Vol. 8. – P.98.
- 25 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/.

References

- 1 J.K.N. Lindner, *Appl.Phys. A* 77, 27-38 (2003).
- 2 S.J. Zinkle and G.S. Was, *Acta Materialia*. 61, 735-758 (2013).
- 3 K. Oguri and T. Sekigawa, US Patent № US 2004/0180242 A1.
- 4 D. Chen, S.P. Wong, Sh. Yang, and D.Mo, *Thin Solid Films* 426, 1-7 (2003).
- 5 Y. Liangdeng, S. Intarasiri, T. Kamwanna, and S. Singkarat, Ion beam applications in surface and bulk modification of insulators, (Austria, Vienna, 2008), 63 p.
- 6 S.A. Kukushkin and A.V. Osipov, *J. Phys. D Appl. Phys.* 47, 313001-313041. (2014).
- 7 S.A. Kukushkin and A.V. Osipov, *Phys. Solid State*. 50 (7), 1238-1245 (2008).
- 8 K.Kh. Nussupov, N.B. Beisenkhanov, I.V. Valitova, K.A. Mit', D.M. Mukhamedshina, and E.A. Dmitrieva, *J. of Materials Science: Materials in Electronics*, 19, 254-262 (2008).
- 9 K.Kh. Nussupov, N.B. Beisenkhanov, S.K. Zharikov, I.K. Beisembetov, B.K. Kenzhaliev, T.K. Akhmetov, and B.Zh. Seitov, *Phys. Solid State* 56 (11), 2307-2321 (2014).
- 10 I.K. Beisembetov, K.Kh. Nusupov, N.B. Beisenkhanov, S.K. Zharikov, B.K. Kenzhaliev, T.K. Akhmetov, and B.Zh. Seitov, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 9 (2), 392-399 (2015).
- 11 K. Volz, M. Kiuchi, M. Okumura, and W. Ensinger, *Surface and Coatings Technology*, 128–129, 274-279 (2000).
- 12 Y. Sun, T. Miyasato, J.K. Wigmore, N. Sonoda, and Y. Watari, *Journal of Applied Physics*, 82 (5), 2334-2341 (1997).
- 13 S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, N.A. Feoktistov, *Phys. Solid State*, 56(8), 1507-1535 (2014).
- 14 S.A. Kukushkin, K.Kh. Nusupov, A.V. Osipov, N.B. Beisenkhanov and D.I. Bakranova, *Phys.Solid State*, 59(5), 1014–1026 (2017).
- 15 S.A. Kukushkin, K.Kh. Nussupov, A.V. Osipov, N.B. Beisenkhanov and D.I. Bakranova, *Superlattices and Microstructures*, 111, 899-911 (2017).
- 16 V.I. Perekrestov, A.S. Kornushchenko, I.V. Zahaiko, *J. Nano- Electron. Phys.*, 7 (2), 02016 (2015). (in Russ.).
- 17 S.M. Rajab, I.C. Oliveira, M. Massi, H.S. Maciel, S.G. dos Santos Filho, and R.D. Mansano, *Thin Solid Films*, 515, 170-175 (2006).
- 18 Y.M. Lei, Y.H. Yu, C.X. Ren, S.C. Zou, D.H. Chen, S.P. Wong, and I.H. Wilson, *Thin Solid Films*, 365, 53-57 (2000).
- 19 Y.-H. Joung, H.I. Kang, J.H. Kim, H.-S. Lee, J. Lee, and W.S. Choi, *Nanoscale Res. Lett.*, 7(1), 22 (2012).
- 20 A.G. Touryanski, A.V. Vinogradov, and I.V. Pirshin, US Patent No. 6041098 (2000).
- 21 H. Mutschke, A.C. Andersen, D. Clément, and T. Peiter Henning, *Astron.Astrophys*, 345, 187-202 (1999).
- 22 G. Henita and R.Rol, *Silicon carbide* (Moscow: Mir, 1972), 349 p. (in Russ.).
- 23 C.M. Parish, T. Koyanagi, S. Kondo, and Y. Katoh, *Sci Rep.*, 7, 1198 (2017).
- 24 S. Meher, I.J. Rooyen, and T.M. Lillo, *Sci Rep.* 8, 98 (2018).
- 25 B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 54 (2), 181 (1993).