

3. Пароль, Н.В. Фоточувствительные приборы и их применение / Н.В. Пароль, С.А. Кайдалов. — М. : Радио и связь, 1991. — 112 с.
4. Тарасов, В.В. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. — М. : Университетская книга, 2016. — 485 с.
5. Компьютерная программа MOD-1D: св. о рег. комп. прогр. 742 Респ. Беларусь / Н.Л. Лагунович; заявитель ОАО “ИНТЕГРАЛ”-управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ” — № t 20140041; зап. в Реестре зарегистрированных в Нац. центре интеллектуал. собственности комп. программ 10.03.15.
6. Gummel, H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations / H.K. Gummel // IEEE Trans. Electron. Dev. — 1964. — Vol. ED-11, № 10. — P. 455 – 465.
7. Польский, Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов / Б.С. Польский. — Рига : Зинатне, 1986. — 168 с.
8. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. — М. : Наука, 1978. — 326 с

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РОСТА SiC ПРИ БЫСТРОЙ ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КРЕМНИЯ

М. В. Лобанок¹, М. А. Моховиков², П. И. Гайдук¹

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь*

²⁾ *Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь
e-mail: lobanokMV@bsu.byu*

В работе представлены результаты исследования структуры, фазового состава и кинетики роста эпитаксиальных слоев карбида кремния на кремниевых подложках при их быстрой вакуумно-термической обработке. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено формирование слоев кубического политипа SiC (3C-SiC) на кремнии при карбидизации в диапазоне температур 1000–1300 °С. Обнаружено, что формирование слоев SiC проходит в два этапа, характеризующихся различными энергиями активации, а именно, в более низкотемпературном диапазоне от 1000 до 1150 °С энергия активации процесса роста SiC составляет $E_a = 0.67$ эВ, тогда как в диапазоне температур от 1150 до 1300 °С, энергия активации значительно выше ($E_a = 6.3$ эВ), что указывает на смену лимитирующего физического процесса.

Ключевые слова: гетероструктуры SiC/Si; активация энергии; вакуумная карбидизация; быстрая термическая обработка; тонкие пленки.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF SiC GROWTH BY RAPID VACUUM THERMAL PROCESSING

M. V. Lobanok¹, M. A. Makhavikou², P. I. Gaiduk¹

¹⁾ *Department of Physical electronics and nanotechnology, Belarusian State University, Belarus*

²⁾ *Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University, Belarus
Corresponding author: M. V. Lobanok (lobanokMV@bsu.by)*

The paper presents the results of a study of the structure, phase composition, and growth kinetics of silicon carbide epitaxial layers on silicon substrates during their rapid vacuum thermal treatment. Transmission electron microscopy revealed the formation of layers of the cubic polytype SiC (3C-SiC) on silicon during carbidization in the temperature range of 1000–1300 °C. It was found that the formation of SiC layers takes place in two stages, characterized by different activation energies, namely, in the lower temperature range from 1000 to 1150 °C, the activation energy of the SiC growth process is $E_a = 0.67$ eV, while in the temperature range from 1150 to 1300 °C, the activation energy is much higher ($E_a = 6.3$ eV), which indicates a change in the limiting physical process.

Key words: SiC/Si heterostructures; energy activation; vacuum carbidization; fast heat treatment; thin films.

ВВЕДЕНИЕ

Слои 3C-SiC, эпитаксиально выращенные на кремниевых подложках являются альтернативой сложным в производстве слиткам и подложкам монокристаллического SiC. Сформированные таким образом структуры 3C-SiC/Si применяются для создания датчиков и приборов микроэлектроники [1, 2]. Однако, получение качественных слоев SiC на Si является сложной задачей из-за существенного различия в кристаллических решетках и коэффициентах теплового расширения [1]. В настоящее время для улучшения качества гетероэпитаксиальных структур SiC/Si, слои SiC выращивают в несколько стадий, на первой из которых формируют буферные слои SiC, которые принимают на себя нагрузку по релаксации механических напряжений, связанных с несоответствием параметров решетки и различием коэффициентов теплового расширения [3, 4]. В частности, установлено, что таким буфером может служить эпитаксиальный слой 3C-SiC сформированный путем карбидизации кремния [4, 5]. Проводятся исследования и низкотемпературных режимов карбидизации кремния, с варьированием концентрации углеродосодержащих газов и силана, а также с использованием различных буферных слоев [4, 5]. При этом, по данным исследований [5, 6], толщина сформированных слоев SiC не превышает несколько десятков нанометров, что может быть недостаточным для демпфирования напряжений, возникающих при последующим наращивании рабочих слоев SiC, GaN толщиной более 1 мкм [6].

Поэтому при разработке режимов формирования слоев 3C-SiC необходима информация об основных физических процессах, лимитирующих рост слоев SiC на кремнии в различных температурно-временных условиях. Этим исследованиям посвящена настоящая работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методом ПЭД установлено, что формирование слоев SiC на Si-подложке происходит во всем диапазоне температур 1000–1300 °C. В подтверждение этого, на картинах электронной дифракции, представленных на рис. 1, обнаружены рефлексы, которые обусловлены дифракцией электронов на кубическом политипе 3C-SiC ($a = 0,435$ нм), рефлексы {111}, {220}, {311} и кремниевой подложке ($a = 0,543$ нм) рефлексы {220} а упорядоченное расположение рефлексов кремниевой подложки {220} и слоя SiC {220} свидетельствует о формировании эпитаксиального слоя SiC.

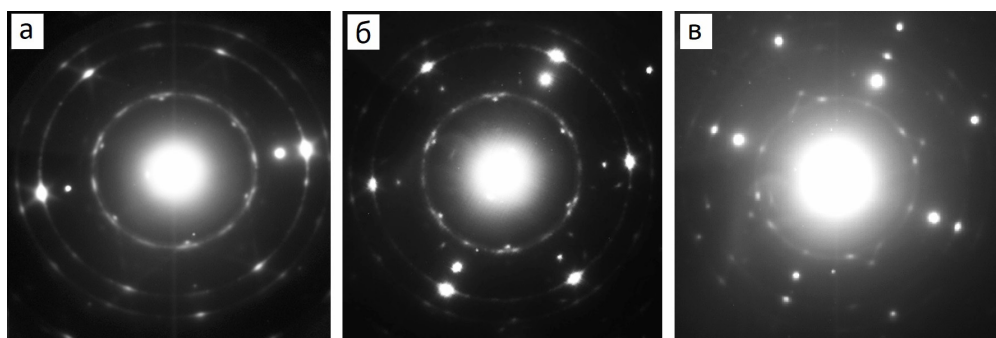


Рисунок 1. Дифракционные картины структур SiC/Si, сформированных при различных температурах: (а) – 1000 °С, (б) 1100 °С, (в) – 1200 °С

Таким образом, на всех картинах электронной дифракции хорошо различимы концентрические кольца различной интенсивности, которые указывают на наличие поликристаллической фазы SiC в слое карбида кремния. При этом, количество колец варьируется в зависимости от температуры карбидизации кремния. Так, на ПЭД-микрофотографии структуры SiC/Si, сформированной при температуре 1000 °С (рис. 1, а), отчетливо видны кольца, обусловленные преобладанием поликристаллического SiC, а структура колец указывает на малые размеры зерен SiC. При температуре 1100 °С и 1200 °С (рис. 1, б-в) интенсивность колец по сравнению с интенсивностью точечных рефлексов значительно ниже, что свидетельствует о том, что в данных температурных условиях формируется слой преимущественно монокристаллического SiC. Слияние некоторых точечных рефлексов на снимках ПЭД являются результатом дифракции на вторичных микродвойниках SiC во всех возможных плоскостях {111}. На рис. 2 представлены типичные РЭМ-микрофотографии сформированных структур SiC/Si. В Si-подложке видны поры, формирование которых вероятно связано с эффектом Киркендалла [7,8]. Далее различается сформированный на подложке слой SiC. Практически полное зарастание пор (рис. 2, б) происходит при высокотемпературной карбидизации (более 1100 °С), а в случае низкотемпературной карбидизации (1000 °С) зарастания пор не наблюдаются (рис 2, а).

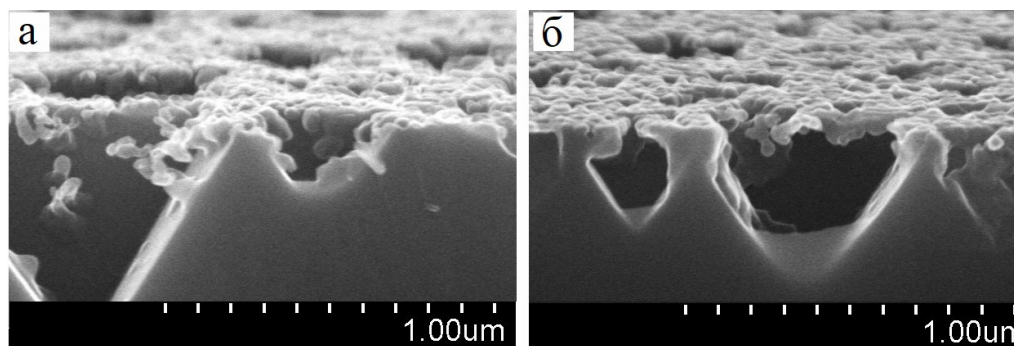


Рисунок 2. Микрофотографии РЭМ структур SiC/Si, сформированных при: (а) - 1000 °С, (б)– 1100 °С

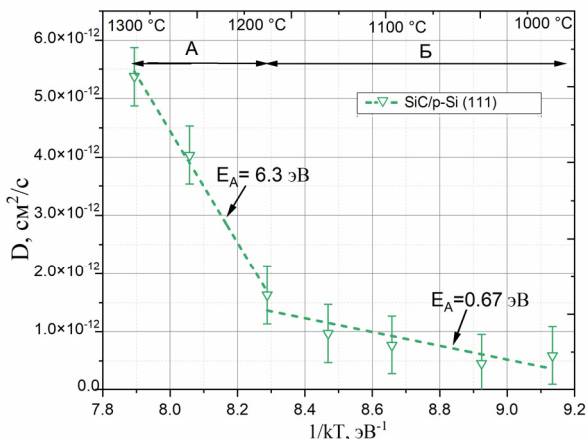


Рисунок 3. График Аррениуса структур SiC/Si

методом РЭМ, построены график с линиями Аррениуса для образцов всех типов подложек. Как видно из графиков, при изменении температур процесса в пределах исследуемого диапазона 1000 – 1300 °C происходит переход из области с низкой энергией активации А в область с большей энергией активации Б при температуре приблизительно 1150 °C. Это согласуется с результатами исследований [10], в которой установили энергию активации роста SiC равной 0,76 и 3,1 эВ соответственно с переходом вблизи 1175 °C.

Из расчета по формуле (1) следует, что энергия активации роста SiC в диапазоне 1000 – 1150 °C составляет 0,67 эВ, а в диапазоне 1150 – 1300 °C равняется 6,3 эВ. Анализ данных, приведенных на рис. 3 в сочетании с результатами структурных исследований (рис. 1, 2) позволяет интерпретировать различие в энергиях активации с точки зрения диффузионно-лимитированного процесса роста слоев SiC.

При низкотемпературной карбидизации, сформировались более тонкие слои SiC, которые к тому же не являются сплошными, поэтому их рост лимитируется диффузией атомов по поверхности (низкое значение E_a). В работе [10], предполагают, что в низкотемпературном процессе с энергией активации $E = 0,76 \text{ эВ}$ лимитирующим механизмом является поверхностная реакция кремния и углерода. В высокотемпературной области существенное увеличение энергии активации можно объяснить заращиванием большей части несплошностей в слоях SiC и сменой диффузионного механизма. Для установления преобладающих механизмов процесса твердофазной эпитаксии необходимо провести анализ и соотнести полученные значения энергии активации с литературными данными для элементарных процессов. В частности, известны следующие значения энергии активации: объемной диффузии по вакансионному механизму в монокристалле SiC для атомов Si и C при 1600 К (6 – 8 эВ) [11], поверхностной диффузии (4,5 – 5,5 эВ) [12]. Сравнивая значение полученной энергии активации с литературными данными, можно сделать вывод, что в высокотемпературной области вакуумной карбидизации лимитирующим механизмом является объемная диффузия вакансий.

Согласно исследованиям [9], для внедряемых в кубические кристаллы атомов углерода в большом интервале температур выполняется закон Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right),$$

где D_0 – предэкспоненциальный фактор, E_A – энергия активации, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Поэтому, с помощью значений средней толщины слоев SiC измеренных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлены результаты структурно-фазовых исследований эпитаксии слоев SiC сформированных путем быстрой вакуумно-термической обработки кремния. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в диапазоне температур 1000 – 1300 °С за 30 сек, формируются ориентированные кристаллические слои кубического политипа SiC (3C-SiC) на кремнии. На основании температурной зависимости средней толщины слоев SiC рассчитаны энергии активации процессов роста SiC. Обнаружено, что формирование слоев SiC проходит в два этапа, характеризующихся различными энергиями активации, а именно, в более низкотемпературном диапазоне от 1000 до 1150 °С энергия активации процесса роста SiC составляет $E_a = 0.67$ эВ, тогда как в диапазоне температур от 1150 до 1300 °С, энергия активации значительно выше ($E_a = 6.3$ эВ), что указывает на смену лимитирующего физического процесса.

Исследования выполнены в рамках проекта T22-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, а также, частично, проекта государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (проект 3.1.2, № ГР 20212702).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail/ G. Ferro // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. - 2015. - №76. – p. 40-56. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Shenai, K. Optimum semiconductors for high-power electronics / K. Shenai, R. S. Scott, V. J. Baliga//*IEEE Transactions on Electron Devices*. - №36 – vol.9– p 1811-1823.
3. Лобанок, М.В. Формирование эпитаксиальных слоев 3C-SiC на Si методом быстрой вакуумно-термической обработки / М. В. Лобанок, С. Л.Прокопьев, М. А. Моховиков, О. В.Королик, П. И. Гайдук // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. -2022.- №2.– p. 79-86.
4. Zimbone M, Mauceri M, Litrico G, Barbagiovanni EG, Bongiorno C, La Via F. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si. *Journal of Crystal Growth*. 2018.
5. Kuzmina, V. O., Sinelnikov, A. A., Soldatenko, S. A., & Sumets, M. (2018). Activation energy of subgrain growth process and morphology evolution in β -SiC/Si (111) heterostructures synthesized by pulse photon treatment method in a methane atmosphere. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(23), 20097–20103. doi:10.1007/s10854-018-0141-7.
6. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, N.A. Feoktistov, *Phys. Solid State* 56, 1507 (2014).
7. Jinschek J. R. Different void shapes in Si at the SiC thin film / Si (111) substrate interface / J. R. Jinschek, U. Kaiser, W. Richter // *Journal of Electron Microscopy*. – 2001. -№ 50 (1). -p.3-8.
8. R.RaoJuluri. Impact of a SiGe interfacial layer on the growth of a SiC layer on Si with voids at the interface / R.RaoJuluri, P.I.Gaiduk, J.L. Hansen, A.N. Larsen, B.Julsgaard // *Thin Solid Films*. – 2018. – Vol. 662. –p.103–109.
9. A.M. Hashim and K. Yasui, 2008. Carbonization Layer Obtained by Acetylene Reaction with Silicon (100) and (111) Surface Using Low Pressure Chemical Vapor Deposition. *Journal of Applied Sciences*, 8: 3473-3478.
10. A.J. Steckl and J.P. Li, *Wide Band-Gap Semiconductors*, Materials Research Society Symp. Proc., Vol. 242, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 1992, p. 537.
11. Backstedte Ab initio study of the migration of intrinsic defects in 3C-SiC.
12. Van Dijen, F. K. The Chemistry of the Carbothermal Synthesis of β -SiC: Reaction Mechanism, Reaction Rate and Grain Growth / F. K. Van Dijen, R. Metselaar // *Journal of the European Ceramic Society*. – 1991. – № 7. – P. 177–184.