

Д.В. Фомин, В.Л. Дубов, Д.А. Безбабный

ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ВА НА SI (111) И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В статье представлены результаты экспериментов по формированию тонких пленок бария на кремниевой подложке Si (111) 7×7 методом реактивной эпитаксии. Приведены оптические ИК-спектры полученных образцов. Исследована морфология их поверхности методом атомно-силовой микроскопии. Определена температурная граница, при которой формируются пленки с низкой шероховатостью.

Ключевые слова: тонкие пленки, дисилицид бария, атомно-силовая микроскопия, оптические спектры.

FORMING OF THIN FILMS Ba ON Si (111) AND A RESEARCH OF OPTICAL PROPERTIES

The article presents the results of experiments on the formation of thin films of barium silicon substrate Si (111)7×7 by reactive epitaxy. Shows the optical IR spectra of the samples obtained. The morphology of the surface by atomic force microscopy. The temperature boundary at which the film is formed with a low roughness.

Key words: thin films, barium disilicide, atomic force microscopy, optical spectra.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию альтернативных источников возобновляемой энергии. К ним относятся в первую очередь солнечные батареи. При их производстве в качестве материала для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) используют кремний или его соединения, в некоторых случаях – арсенид галлия. Кремниевые ФЭП имеют невысокие КПД, но менее затратное изготовление, нежели чем при получении ФЭП из соединений галлия с мышьяком. Поэтому наиболее остро сейчас стоит вопрос об улучшении преобразовательных свойств ФЭП на основе кремния.

Анализ литературных данных показывает, что перспективным материалом для ФЭП нового поколения может стать дисилицид бария ($BaSi_2$). Об этом свидетельствуют как теоретические [1], так и экспериментальные [2-5] работы. Ширина запрещенной зоны, оптимальная для фотопреобразователей и равная 1,3 эВ для $BaSi_2$ отмечается в работах [1, 3, 4, 5]. В трудах [3] для пленки $BaSi_2$ толщиной 250 нм определены концентрация и подвижность основных носителей заряда, равные $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $820 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ соответственно. При этом край собственного поглощения составил 1,3 эВ и достиг максимума при 1,5 эВ. Для пленки толщиной 900 нм в работе [4] край собственного поглощения составил также 1,3 эВ, достигая максимума при 1,7 эВ. В [8] детально описывается рост пленок дисилицида бария методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Именно этот метод используется чаще всего.

Целью нашей работы являлось формирование пленок Вана Si (111) с меньшими толщинами, чем в указанных выше работах, а также исследование их оптических свойств в инфракрасной области и изучение морфологии поверхности.

Эксперимент

Для осаждения бария на кремний использовалась сверхвысоковакуумная камера прибора РНИ-590 с базовым давлением $1 \cdot 10^{-9}$ Торр. Осаждение велось из термического источника бария методом реактивной эпитаксии. Предварительно, подложка – пластина кремния Si (111), вырезанная из промышленной шайбы КДБ-45, – подвергалась стандартным процедурам высокотемпературной очистки. Калибровка скорости осаждения проводилась по кварцевому датчику и составила 0,1 нм/мин. Все пленки формировались в течение 200 мин. В результате были получены три образца: № 5 при температуре кремниевой подложки 800°C; № 6 – при $T = 850^\circ\text{C}$; № 7 – при $T = 900^\circ\text{C}$. Данные образцы исследовались методами оптической ИК спектроскопии и атомно-силовой микроскопии.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры отражения, поглощения и пропускания сформированных пленок и чистой подложки Si (111) 7×7 , полученные на ИК-спектрометре Vertex80v. Обработка данных была проведена в программе Origin из пакета программ фирмы OriginLabCorporation.

На ИК-спектрах отражения (см. рис.1,а) у образцов № 5 и 6 наблюдалось появление значительного обратного пика при энергии 0,1 эВ, в меньшей выраженный у образца №7 и отсутствующий у чистого кремния. Появление такого пика мы связываем с процессом силицидообразования сплошных пленок при температурах ниже 900°C. Очевидно, для указанной температуры подложки процесс десорбции атомов Ва с поверхности образца протекает более активно, что приводит к образованию пленки силицида бария, имеющей островковый характер (образец №7). Та же тенденция прослеживается и на спектрах поглощения (см. рис.1,б).

Спектры пропускания (см. рис.1,в) позволяют увидеть небольшое уширение пика у образца № 6 в районе энергии 0,1 эВ, что свидетельствует об имеющихся незначительных областях кремниевой подложки, не покрытых барием.

Для исследования морфологии поверхности полученных образцов мы использовали сканирующий зондовый микроскоп Solver P47. На рис. 2 представлены АСМ-картины для каждой из полученных пленок.

Анализ АСМ-изображений показал, что наше предположения относительно качества формируемой пленки в зависимости от температуры подложки, построенные по данным ИК-спектроскопии, оказались верными. Достаточно оценить, например, АСМ изображения образцов № 5 и 7 (см. рис.2, а, в). Поверхность последнего образца состоит из островков со средними размерами порядка 100 нм.

Дополнительно были проведены расчеты средней шероховатости (R_a) у полученных пленок. Так, для образца № 5 она составила $R_a=15,14$ нм, для образца № 6 – $R_a=18,14$ нм, для образца № 7 – $R_a=36,65$ нм.

Заключение

Таким образом, в данной работе нам удалось сформировать тонкие пленки Ва на Si(111) 7×7 методом реактивной эпитаксии и определить зависимость механизма их роста от температуры подложки. Выяснено, что меньшей шероховатостью обладает пленка, полученная при температуре 800°C. Очевидно, что при формировании тонких пленок для дальнейшего их исследования уже как материала для ФЭП необходимо формировать их не выше указанной температуры. Данные исследования следует продолжить с использованием метода Холла для определения типа проводимости, концентрации и подвижности зарядов в полученных образцах.

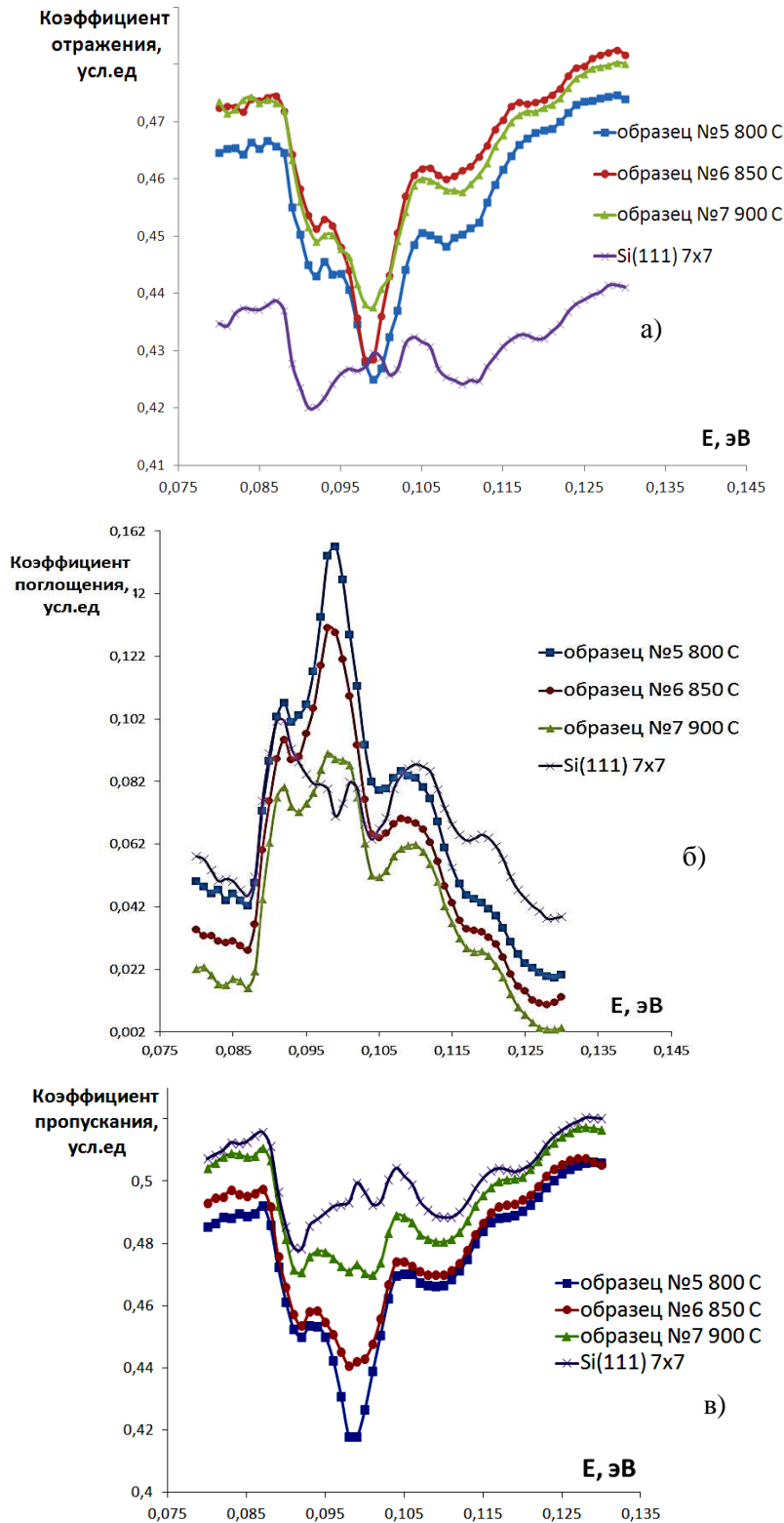


Рис. 1. Спектры тонких пленок, сформированных на Si (111)7x7 при разных температурах: а) отражения; б) поглощения, пропускания.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта АмГУ.

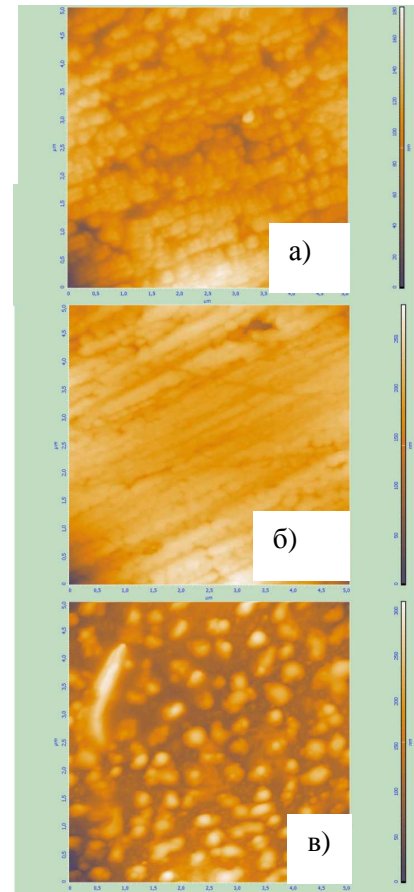


Рис. 2. АСМ-изображения пленок силицида бария: а) образец № 5; б) образец № 6; в) образец № 7.

2. Tomoyuki Nakamura, Takashi Suemasu, Ken-ichiro Takakura, Fumio Hasegawa, Akihiro Wakahara, Motoharu Imai. Investigation of the energy band structure of orthorhombic BaSi₂ by optical and electrical measurements and theoretical calculations // *Applied physics letters*. – 2002. – Vol. 81, № 6. – P. 1032-1034.
3. Morita, K., Inomata, Y., Suemasu, T. Optical and electrical properties of semiconducting BaSi₂ thin films on Si substrates grown by molecular beam epitaxy // *Thin Solid Films*. – 2006. – Vol. 508. – P. 363-366.
4. Yuta Matsumoto, Dai Tsukada, Ryo Sasaki, Mitsutomo Takeishi, Takashi Suemasu. Photoresponse Properties of Semiconducting BaSi₂ Epitaxial Films Grown on Si(111) Substrates by Molecular Beam Epitaxy // *Applied Physics Express*. – 2009. – № 2. – P. 021101-1 – 021101-3.
5. M. Ajmal Khan, K.O. Hara, W. Du, M. Baba, K. Nakamura, M. Suzuno, K. Toko, N. Usami, T. Suemasu. In-situ heavily p-type doping of over 10²⁰cm⁻³ in semiconducting BaSi₂ thinfilms for solar cells applications // *Applied physics letters*. – 2013. – № 102. – P. 112107-1.
6. Ryouta Takabe, Kotaro Nakamura, Masakazu Baba, Weiji Du, M. Ajmal Khan, Kaoru Toko, Masato Sasase, Kosuke O. Hara, Noritaka Usami, Takashi Suemasu. Fabrication and characterization of BaSi₂ epitaxial films over 1 μm in thickness on Si(111) // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2014. – № 53. – P. 04ER04-1- 04er04-4.