

УДК 538.975

## BaSi<sub>2</sub> — перспективный материал для фотоэлектрических преобразователей (обзор)

В. Л. Дубов, Д. В. Фомин

*В данном обзоре обобщены основные результаты теоретических и экспериментальных работ, посвященных методам формирования и исследованию свойств низкоразмерных структур BaSi<sub>2</sub> на кремнии. Данный дисилицид в силу своих оптических свойств, фотовольтаических характеристик и устойчивости к воздействию атмосферного воздуха признается целым рядом исследователей как перспективный материал для фотопреобразователей солнечных батарей. В результате обзора можно сделать выводы о том, что непрямому переходу BaSi<sub>2</sub> соответствуют энергии в 0,83—1,1 эВ, а прямому — 1,23—1,3 эВ, максимальная концентрация зарядов в дисилициде бария с примесью бора — 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>, а максимальной подвижностью носителей заряда 1000 см<sup>2</sup>·В<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. Наибольшее значение КПД обнаружено у тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей на основе структур p-BaSi<sub>2</sub>/n-Si, которое на данный момент составляет 9—10 %. Отдельно отмечена сложность выполняемых работ при формировании BaSi<sub>2</sub>. При этом наличие примеси в сформированных образцах может существенно повлиять на их свойства как в положительную, так и отрицательную стороны. В настоящее время активно идет поиск методов формирования данного дисилицида с заданными свойствами, о чем также говорится в статье.*

PACS: 10.1143

*Ключевые слова:* тонкие пленки, дисилицид бария, кремний, фотоэлектрический преобразователь.

### Введение

Проблема создания источников возобновляемой энергии все более актуальна в связи с сокращением углеводородного сырья. Одним из возможных решений данной проблемы может быть использование энергии солнца. Солнечные электростанции могли бы заменить ТЭЦ в областях, где количество солнечных дней достаточно для генерации необходимой электроэнергии. Однако существующие на данный момент дешевые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) малоэффективны [1] и используются лишь в солнечных батареях для вспомогательных целей, например,

для освещения улиц в вечернее время. ФЭП с более высоким КПД существенно дороже, и их использование оправдано только в местах, где невозможно подвести обычные линии электропитания, а именно: в труднодоступных местах, в экспедициях или на космических аппаратах.

В таблице из работы [1] приведены КПД уже промышленно выпускаемых ФЭП. Как видно из приведенной таблицы, КПД солнечных батарей зависит от применяемого материала и способа изготовления. Так, для кремния КПД минимален (~ 5 %), но для сложных гетероструктур на основе арсенида галлия уже равен 21,5 %. Однако существующие ФЭП с высоким КПД не пригодны для массового применения в связи с большой стоимостью производства и низким ожидаемым приростом КПД в дальнейшем.

Таблица

КПД промышленно выпускаемых солнечных батарей

Материал	КПД, %
Тонкопленочные ФЭП на основе Si	5—8
Монокристаллический Si	14,8
GaAs	18,5
GaInAs-GaAs-Ge	21,5

Дубов Виктор Леонидович, младший научный сотрудник.  
Фомин Дмитрий Владимирович, директор научно-образовательного центра.

Амурский государственный университет.  
Россия, 675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21.  
Тел. +7 (4162) 394-541.  
E-mail: 7dubov7@mail.ru; e-office@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2016 г.

© Дубов В. Л., Фомин Д. В., 2016

Поиск новых полупроводниковых материалов и изучение их свойств с целью увеличения КПД ФЭП продолжается. Число различных полупроводниковых материалов и их возможных форм велико, а изучение каждого трудоемко, что не позволяет быстро проверить их свойства путем простого перебора в экспериментах. Однако определенные теоретические представления и численные моделирования могут послужить основанием для выбора и дальнейшего подробного изучения конкретного полупроводникового вещества.

Целью данной работы является обобщение имеющихся данных в области формирования и

исследования дисилицида бария, поскольку по теоретическим расчетам, проделанными в [2], орторомбический  $\text{BaSi}_2$  может стать наиболее перспективным материалом для ФЭП.

### Оптические и электрические свойства объемного орторомбического дисилицида бария

На рис. 1 приведена зонная структура дисилицида бария, рассчитанная полнопотенциальным методом FLAPW-GGA.

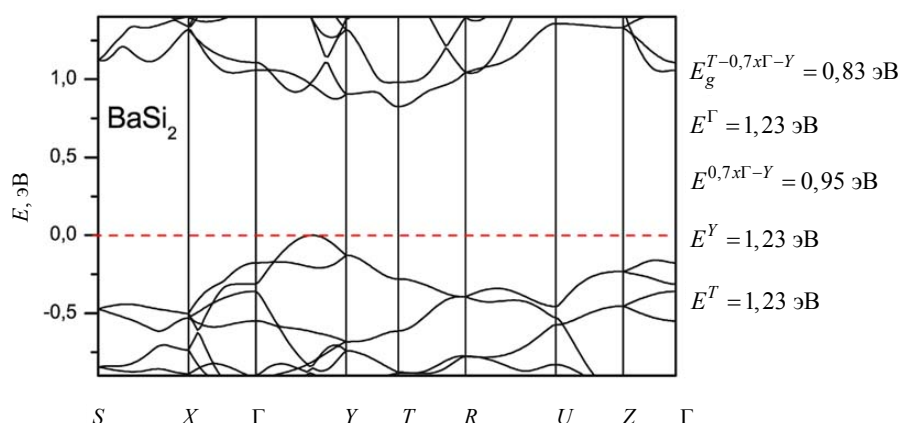


Рис. 1. Зонная структура  $\text{BaSi}_2$ , рассчитанная методом FLAPW-GGA, ноль на шкале энергии  $E$  соответствует энергии Ферми [2].

Как видно из приведенных данных, по расчетам первому непрямому переходу соответствует энергия 0,83 эВ, а прямому — 1,23 эВ. Из этого можно заключить, что рассматриваемый полупроводниковый дисилицид бария оптически значительно более активен, чем кремний.

Однако формирование орторомбического дисилицида бария непростая задача, поскольку, как показал анализ литературных данных, необходимо учитывать различные факторы, оказывающие влияние. Во-первых, в системе Ba/Si существуют несколько фаз силицида бария (см. рис. 2), отличающихся своими свойствами и характеризующиеся различным соотношением атомов бария и кремния, а также температурой образования [3]. Во-вторых, чистый барий является щелочноземельным металлом и быстро окисляется на воздухе. По этой же причине практически все формы силицида бария, кроме  $\text{BaSi}_2$ , на воздухе также достаточно быстро окисляются [4], а незначительное количество примесей в сформированных образцах может привести к образованию дополнительных соединений (например, с участием кислорода), что может негативно отразиться на свойствах материала. Поэтому во всех проведенных работах

операции по формированию и исследованию соединений бария с кремнием, в т.ч. с большим содержанием Ba, выполнялись в сверхвысоком вакууме без извлечения образцов на воздух между этапами эксперимента. В-третьих, на данный момент обнаружены и существуют 4 аллотропные формы  $\text{BaSi}_2$  (см. рис. 3). Не случайно в работах [5—7] указывается на особые условия формирования данного дисилицида.

С точки зрения термодинамического равновесия, наиболее выгодной формой является орторомбический дисилицид бария, так как он образуется при давлениях меньше 1 ГПа и температурах до 600 °С. Кубическая, тригональная и IV фазы  $\text{BaSi}_2$  формируются при более высоком давлении и высокой температуре и при медленном охлаждении переходят в орторомбическую фазу. При закалке данные фазы стабильны при температурах ниже 420 °С (тригональная) и 490 °С (кубическая), однако при превышении данных температур переходят в орторомбическую [5]. Все это накладывает ограничения на изучение физических свойств этих фаз, так как исследования, к примеру, с помощью терморезистивного и холловского метода требуют медленного нагрева от комнатной до близкой к

температуре плавления фазы  $BaSi_2$  (1200 °C). Поэтому данные фазы мало изучены.

Как известно, фотоэлектрические преобразователи на основе тонких пленок формируются при

давлениях меньше  $10^{-7}$  Па и низких температурах из-за необходимости получения чистой и однородной пленки [1]. Таким образом, ФЭП на основе  $BaSi_2$  строятся с использованием его орторомбической фазы.

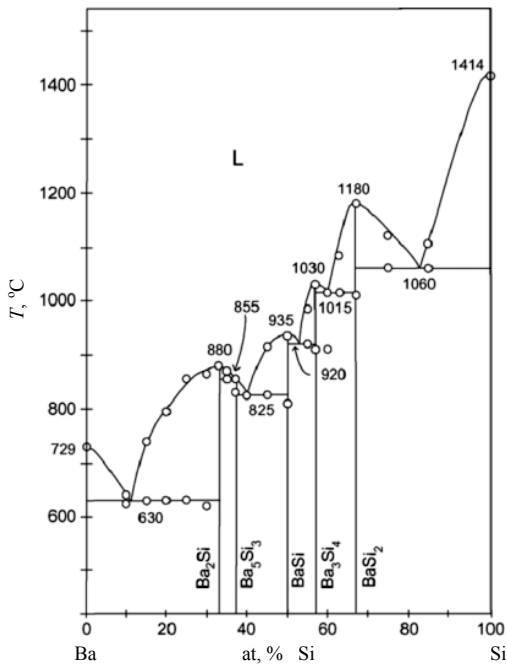


Рис. 2. Фазовая диаграмма двойной системы Ba-Si [3].

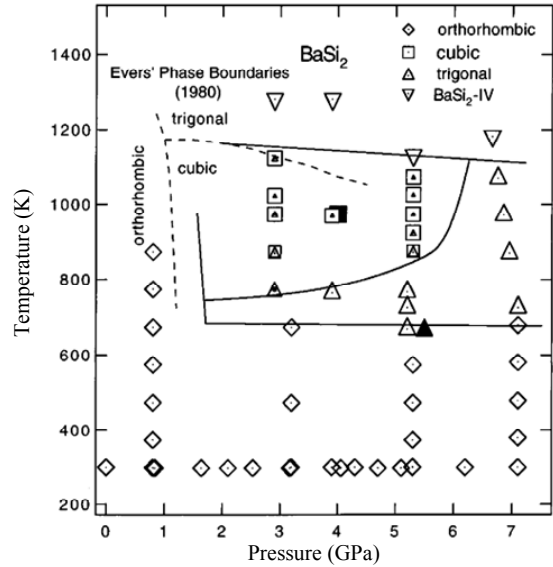


Рис. 3. Фазовая диаграмма  $BaSi_2$  по данным работы [6].

О свойствах объемного орторомбического  $BaSi_2$  в научных источниках говорится следующее. Для объемного дисилицида бария были рассчитаны зонная структура [2, 8, 9], оптические функции [2, 8] (рис. 4), а также проведено сравнение теоре-

тически рассчитанной ширины запрещенной зоны с экспериментально измеренной величиной методами зависимости сопротивления от температуры и оптической спектроскопии в видимом и ближнем инфракрасном спектрах [9] (рис. 5).

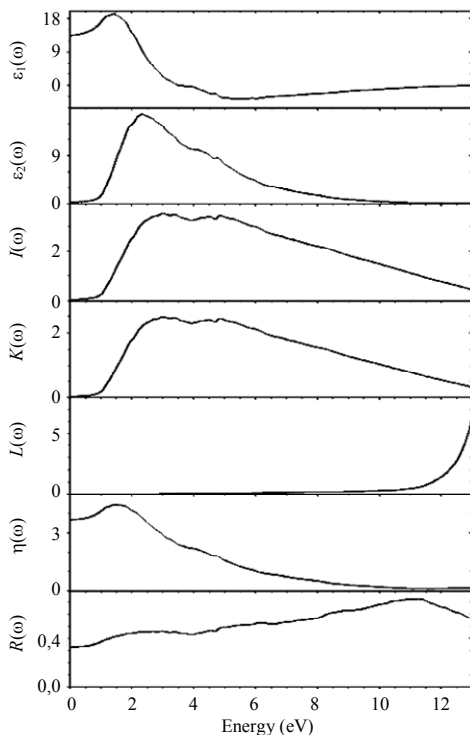


Рис. 4. Зависимости оптических функций от частоты для спектров:  $R(\omega)$  — отражения,  $\eta(\omega)$  — коэффициента отражения,  $L(\omega)$  — потерь энергии электронами,  $K(\omega)$  — коэффициента экстинкции,  $I(\omega)$  — коэффициента поглощения,  $\varepsilon_2(\omega)$  — мнимой и  $\varepsilon_1(\omega)$  — действительной части диэлектрической проницаемости [8].

Для объемного орторомбического дисилицида бария экспериментально измеренная ширина запрещенной зоны 1,1 эВ, а энергии непрямого

(1,15 эВ) и прямого переходов (1,25 эВ) сопоставимы с теоретически данными [2].

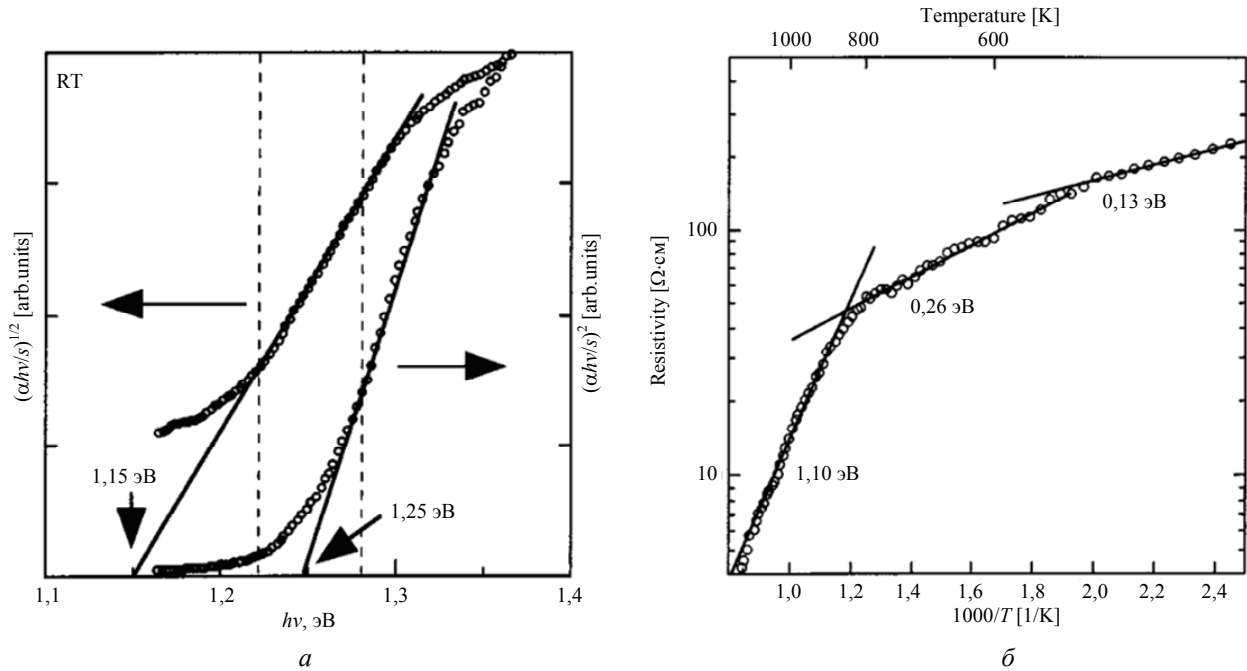


Рис. 5. Зависимости: а —  $(\alpha h\nu/s)^{1/2}$  и  $(\alpha h\nu/s)^2$  от энергии падающего света; б — удельного сопротивления от температуры [9].

### Оптические, электрические и структурные свойства тонких пленок $\text{BaSi}_2$ на Si-подложке

Возвращаясь к анализу структур, используемых в ФЭП, можно заметить, что тонкопленочные фотоэлектрические преобразователи перспективней в использовании, чем получаемые на основе моно- и поликристаллов. Например, из-за относительно небольшого количества вещества, идущего на формирование ФЭП, что в свою очередь снижает стоимость готовых солнечных батарей.

Одно из первых упоминаний о формировании и исследовании тонких пленок  $\text{BaSi}_2$  на кремнии содержится в работе [10], где показана принципиальная возможность формирования чистого орторомбического дисилицида бария методом реактивной эпитаксии в высоком вакууме. Данная тема была развита в работе [11], в которой метод реактивной эпитаксии был дополнен молекулярно-лучевой эпитаксией и определен оптимальный температурный интервал формирования тонких пленок  $\text{BaSi}_2$  из данных метода рентгеновской дифракции (рис. 6).

Отдельная работа посвящена расчету концентрации и подвижности носителей заряда (см. рис. 7, а), энергии непрямого перехода (см. рис. 7, б) и распределения атомов бария и кремния по глубине (см. рис. 7, в) [12]. Так, для сформированной пленки дисилицида бария была определена концентрация носителей заряда в  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Край непрямого

перехода установлен в 1,3 эВ. По этому показателю полученный образец хорошо соответствует требованиям, предъявляемым к ФЭП.

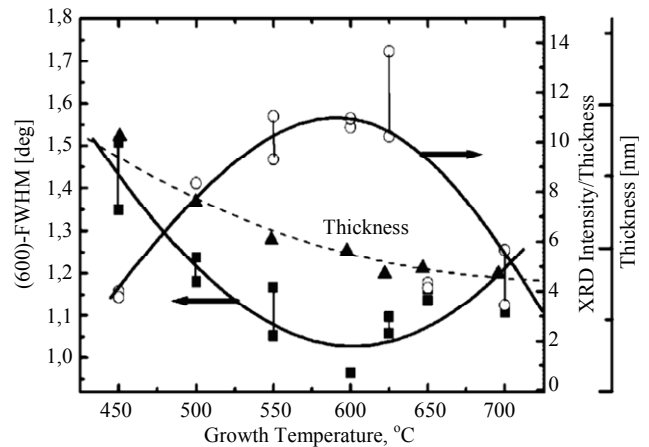


Рис. 6. Зависимость полной ширины на уровне половинной амплитуды, интенсивности пика  $\text{BaSi}_2$  (600) и толщины сформированной пленки от температуры рекристаллизации [11].

Помимо свойств самого дисилицида бария, для использования его в ФЭП важную роль играют свойства перехода  $\text{BaSi}_2/\text{Si}$ . Так, в [13] проведены исследования данного вопроса и предложены к использованию примесные  $\text{BaSi}_2$  и Si. По мнению авторов, это позволит улучшить характеристики ФЭП на основе рассматриваемого

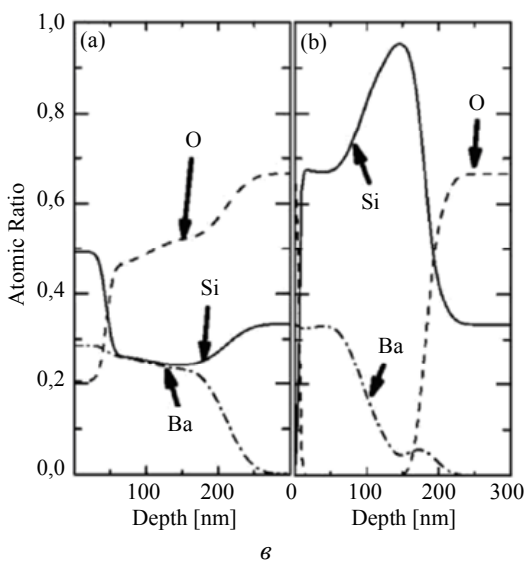
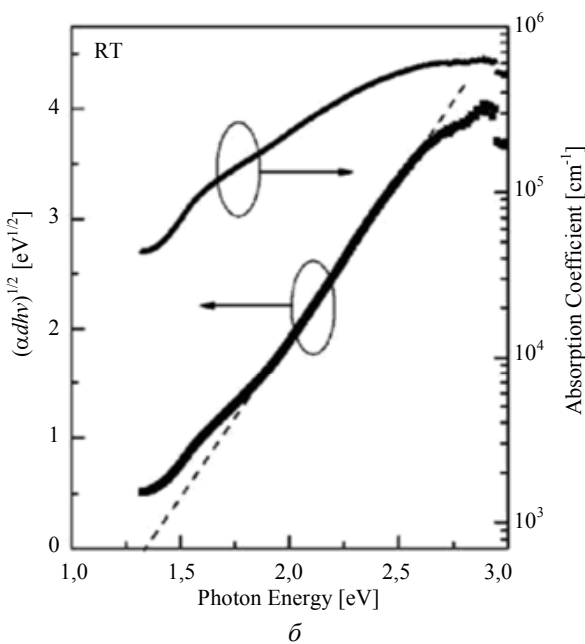
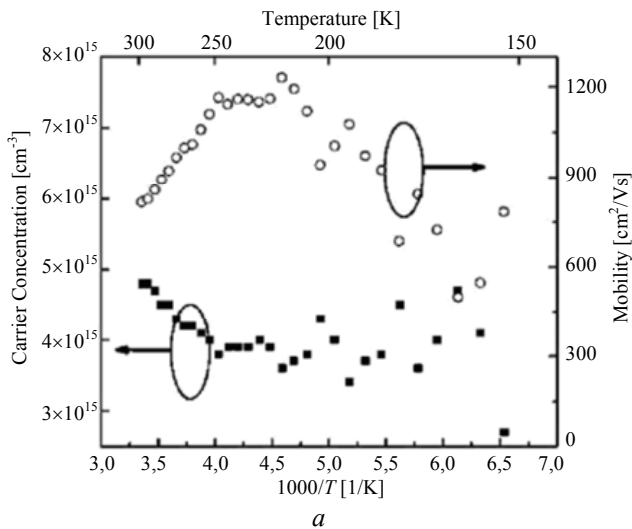


Рис. 7. а — зависимость концентрации и подвижности зарядов в зависимости от температуры; б — зависимости  $(\alpha d/h\nu)^{1/2}$  и коэффициента поглощения от энергии падающего света; в — распределение атомов бария, кремния и кислорода по глубине [12].

материала. В работах [14—16] проведены последовательные исследования вольт-амперных характеристик и фото-отклика различных образцов BaSi<sub>2</sub> с вариациями методики формирования и толщины пленок и нанесенных электродов, что позволило увеличить фото-отклик до 15 % в обратном (4 В) и прямом (5 В) смещениях напряжений.

Известно, что дисилицид бария на кремнии формируется поликристаллически и обладает различными ориентациями относительно подложки [17, 18]. Можно утверждать, что для увеличения подвижности носителей заряда и, следовательно, фотовольтаических свойств материала необходимо формировать однородно ориентированную пленку BaSi<sub>2</sub>.

Увеличения концентрации зарядов в пленках дисилицида бария добиваются использованием различных примесей [19, 22—24]. Основанные на примесных структурах *p*-BaSi<sub>2</sub>/*n*-Si тонкопленочные ФЭП на данный момент обладают достаточно высоким КПД в 9—10 % [20, 21]. Теоретические исследования влияния примесей Cr, Co, Mn, Fe, Na, Mg, Sc, Ti, V, Ni, Cu, Zn, B, C, N, O, F, Ne были проведены в [22, 23], где указано, что бор, углерод, азот и фтор наиболее энергетически выгодны для использования в качестве легирующих добавок. А в работе [24] теоретические и экспериментальные исследования показали, что целенаправленное использование указанных примесей позволяет добиться концентрации носителей зарядов в пленке дисилицида бария от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Лучшими примесями, повышающими концентрацию зарядов, признаны бор (В) — для *p*-типа и сурьма (Sb) — для *n*-типа проводимости. Особо следует отметить, что диффузия атомов Ba и Si при создании тонких пленок достаточно низка [25], что при введении различных примесей может составить определенную проблему. На данный момент для формирования структуры *n*-BaSi<sub>2</sub>/*p*-Si используют сурьму [26] и фосфор [27], которые позволяют достичь концентрации зарядов  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и более сильный фото-отклик по сравнению с остальными примесями. Однако и данной концентрации недостаточно для формирования ФЭП с высоким КПД. Перспективней использовать структуру *p*-BaSi<sub>2</sub>/*n*-Si с примесью бора, которая на данный момент позволяет достичь концентрации зарядов  $10^{18}$ — $10^{20}$  см<sup>-3</sup> и подвижности  $160 \text{ В см}^{-1} \text{ с}^{-1}$  [28, 29], чем и обусловлен высокий коэффициент полезного действия [20, 21].

Конкурентом технологии производства, полученной в [11—29], может стать метод химического осаждения из паровой фазы [30], который позволяет достичь высокой подвижности заряда в  $1000 \text{ В см}^{-1} \text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре. Однако работа в данном направлении только начата и КПД таких ФЭП пока неизвестен.

Авторами данного обзора проведены эксперименты по формированию дисилицида бария методами реактивной и твердофазной эпитаксии, результаты которых представлены в [31, 32], однако фотовольтаические характеристики в настоящий момент не определены, и это еще предстоит сделать для сравнения с имеющимися данными.

### Заключение

Подводя итог проведенному в обзоре анализу можно сделать следующие выводы.

1. Полупроводниковый дисилицид бария оптически более активен, чем кремний (непрямому переходу  $\text{BaSi}_2$  соответствуют энергии 0,83—1,1 эВ, а прямому — 1,23—1,3 эВ).

2. В пользу рассматриваемого материала говорит высокая концентрация  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  и максимальная подвижность его носителей заряда ( $1000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ).

3. Наибольших значений КПД (9—10 %) для тонкопленочных ФЭП на основе  $\text{BaSi}_2$  удалось достичь при использовании примесных структур  $p\text{-BaSi}_2/n\text{-Si}$ .

4. В настоящий момент времени ведется активный поиск оптимальной методики формирования низкоразмерного дисилицида бария и его гетероструктур. К основным используемым методам относят молекулярно-лучевую эпитаксию, твердофазную эпитаксию, реактивную эпитаксию и химические осаждение из паровой фазы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В. П. // ФИП. 2010. Т. 8. № 2. С. 100.
2. Migas D. B., Shaposhnikov V. L., Borisenko V. E. // Phys. Stat. Sol. (b). 2007. 244. Vol. 7. P. 2611.
3. Palenzona A. // Journal of Alloys and Compounds. 2008. Vol. 454. P. L1–L2.
4. Shingo Kishino, Tomohiro Imai, Tsutomu Iida, Yoshiaki Nakaishi, Masato Shinada, Yoshifumi Takanashi, Noritaki Hamada // Journal of Alloys and Compounds. 2007. Vol. 428. P. 22.
5. Evers J. // Journal of Solid State Chemistry. 1980. No. 32. P. 77.
6. Motoharu Imai, Toshiyuki Hirano // Physical Review B. 1998. Vol. 58. No. 18. P. 922.
7. Motoharu Imai // Chem. Mater. 2003. Vol. 15. P. 2543.
8. Cheng, Zheng-Ze, Cheng Ze, Xu Bin // Chin. Phys. Lett. 2007. Vol. 24. No. 9. P. 2649.
9. Tomoyuki Nakamura, Takashi Suemasu, Kenichiro Takakura, Fumio Hasegawa // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. No. 6. P. 1032.
10. Yuya Inomata, Tomoyuki Nakamura, Takashi Suemasu, Fumio Hasegawa // Japanese Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 43. No. 7A. P. 4155.
11. Yuya Inomata, Tomoyuki Nakamura, Takashi Suemasu, Fumio Hasegawa // Japanese Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 43. No. 4A. P. L 478.
12. Morita K., Inomata Y., Suemasu T. // Thin Solid Films. 2006. No. 508. P. 363.
13. Takashi Suemasu, Kousuke Morita, Michitaka Kobayashi, Morihiko Saida and Masahiro Sasaki // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45. No. 20. P. L 519.
14. Yuta Matsumoto, Dai Tsukada, Ryo Sasaki, Mitsutomo Takeishi, and Takashi Suemasu // Applied Physics Express. 2009. No. 2. P. 021101-1.
15. Dai Tsukada, Yuta Matsumoto, Ryo Sasaki, Michitoshi Takeishi, Takanobu Saito, Noritaka Usami, Takashi Suemasu // Applied Physics Express. 2009. No. 2. P. 051601-1.
16. Takanobu Saito, Yuta Matsumoto, Mitsunori Suzuno, Michitoshi Takeishi, Ryo Sasaki, Takashi Suemasu, Noritaka Usami // Applied Physics Express. 2010. No. 3. P. 021301-1.
17. Masakazu Baba, Katsuaki Toh, Kaoru Toko, Noriyuki Saito, Noriko Yoshizawa, Karolin Jiptner, Takashi Sekiguchi, Kosuke O. Hara, Noritaka Usami, Takashi Suemasu // Journal of Crystal Growth. 2012. No. 348. P. 75.
18. Katsuaki Toh, Kosuke O. Hara, Noritaka Usami, Noriyuki Saito, Noriko Yoshizawa, Kaoru Toko, Takashi Suemasu // Journal of Crystal Growth. 2012. No. 345. P. 16.
19. Ajmal Khan M., Saito T., Nakamura K., Baba M., Du W., Toh K., Toko K., Suemasu T. // Thin Solid Films. 2012. No. 522. P. 95.
20. Daichi Tsukahara, Suguru Yachi, Hiroki Takeuchi, Ryota Takabe, Weijie Du, Masakazu Baba, Yunpeng Li, Kaoru Toko, Noritaka Usami, Takashi Suemasu // Appl. Phys. Lett. 2016. No. 108. P. 152101.
21. Suguru Yachi, Ryota Takabe, Hiroki Takeuchi, Kaoru Toko, Takashi Suemasu // Appl. Phys. Lett. 2016. No. 109. P. 072103.
22. Yoji Imai, Mitsugu Sohma, Takashi Suemasu // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2013. Vol. 34, No. 4. P. 25.
23. Yoji Imai, Mitsugu Sohma, Takashi Suemasu // Japanese Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 54. P. 07JE03.
24. Tsukahara D., Baba M., Honda S., Imai Y., Hara K. O., Usami N., Toko K., Werner J. H., and Suemasu T. // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116. P. 123709.
25. Yoshihiko Nakagawa, Kosuke O. Hara, Takashi Suemasu, Noritaka Usami // Procedia Engineering. 2016. Vol. 141. P. 23.
26. Koike S., Baba M., Nakamura K., Ajmal K. M., Du W., Toko K., and Suemasu T. // Phys. Status Solidi C. 2013. Vol. 10. No. 12. P. 1773.
27. Kosuke O. Hara, Yusuke Hoshi, Noritaka Usami, Yasuhiro Shiraki, Kotaro Nakamura, Kaoru Toko, Takashi Suemasu // Thin Solid Films. 2014. Vol. 557. P. 90.
28. Ajmal Khan M., Nakamura K., Du W., Toko K., Usami N., Suemasu T. // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. P. 252104.
29. Ajmal Khan M., Hara K. O., Du W., Baba M., Nakamura K., Suzuno M., Toko K., Usami N., Suemasu T. // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 102. P. 112107.
30. Ankit Pokhrel, Leith Samad, Fei Meng and Song Jin // Nanoscale. 2015. No. 7. P. 17450.
31. Дубов В. Л., Фомин Д. В., Галкин Н. Г. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2016. Т. 15. № 2. С. 114.
32. Fomin D. V., Dubov V. L., Galkin K. N., Goroshko D. L., Maslov A. M., Galkin N. G., Batalov R. I. and Shustov V. A. // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 245. P. 42.

**BaSi<sub>2</sub> is a promising material for photovoltaic cells (review)**

V. L. Dubov and D. V. Fomin

Amur State University  
21 Ignatyevskoe shosse, Blagoveshchensk, 675027, Russia  
E-mail: 7dubov7@mail.ru; e-office@yandex.ru

Received September 28, 2016

*We reviewed the main results of theoretical and experimental works on formation and research properties methods of the low-dimensional structures BaSi<sub>2</sub>. Some researchers have recognized this disilicide as a promising material for photovoltaic solar panels because it material has good optical properties, photovoltaic characteristics and resistance to air. We found that the indirect transfer of energy in the match BaSi<sub>2</sub> 0.83—1.1 eV, and direct — 1.23—1.3 eV maximum concentration of boron-doped barium disilicide — 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>, carrier mobility 1000 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup> and efficiency of thin-film photovoltaic cells based on p-BaSi<sub>2</sub>/n-Si is 9—10 %. Separately we marked then formation of BaSi<sub>2</sub> is difficult, because samples may include. This substance can changing properties of photovoltaic solar cells based on barium silicide.*

PACS: 10.1143

Keywords: thin film, barium disilicide, silicon, photovoltaic cells.

## REFERENCES

1. V. P. Efimov, SPE **8** (2), 100 (2010).
2. D. B. Migas, V. L. Shaposhnikov, and V. E. Borisenko, Phys. Stat. Sol. (B) **7**, 2611 (2007).
3. A. Palenzona, Journal of Alloys and Compounds **454**, L1 (2008).
4. Shingo Kishino, Tomohiro Imai, Tsutomu Iida, Yoshiaki Nakaishi, Masato Shinada, Yoshifumi Takanashi, Noriaki Hamada, Journal of Alloys and Compounds **428**, 22 (2007).
5. J. Evers, Journal of Solid State Chemistry, No. 32, 77 (1980).
6. Motoharu Imai, Toshiyuki Hirano, Physical Review b **58**, 922 (1998).
7. Motoharu Imai, Chem. Mater. **15**, 2543 (2003).
8. Cheng, Zheng-Ze, Cheng Ze, Xu Bin, Chin. Phys. Lett. **24**, 2649 (2007).
9. Tomoyuki Nakamura, Applied Physics Letters **81**, 1032 (2002).
10. Yuya Inomata, Tomoyuki Nakamura, Takashi Suemasu, Fumio Hasegawa, Japanese Journal of Applied Physics **43** (7A), 4155 (2004).
11. Yuya Inomata, Tomoyuki Nakamura, Takashi Suemasu, Fumio Hasegawa, Japanese Journal of Applied Physics **43** (4A), L 478 (2004).
12. K. Morita, Y. Inomata, T. Suemasu, Thin Solid Films No. 508, 363 (2006).
13. Takashi Suemasu, Kousuke Morita, Michitaka Kobayashi, Morihiko Saida and Masahiro Sasaki // Japanese Journal of Applied Physics **45**, L 519 (2006).
14. Yuta Matsumoto, Dai Tsukada, Ryo Sasaki, Mitsutomo Takeishi, and Takashi Suemasu, Applied Physics Express No. 2, 021101-1 (2009).
15. Dai Tsukada, Yuta Matsumoto, Ryo Sasaki, Michitoshi Takeishi, Takanobu Saito, Noritaka Usami, Takashi Suemasu // Applied Physics Express No. 2, 051601-1 (2009).
16. Takanobu Saito, Yuta Matsumoto, Mitsushi Suzuno, Michitoshi Takeishi, Ryo Sasaki, Takashi Suemasu, Noritaka Usami, Applied Physics Express No. 3, 021301-1 (2010).
17. Masakazu Baba, Katsuaki Toh, Kaoru Toko, Noriyuki Saito, Noriko Yoshizawa, Karolin Jiptner, Takashi Sekiguchi, Kosuke O. Hara, Noritaka Usami, Takashi Suemasu, Journal of Crystal Growth, No. 348, 75 (2012).
18. Katsuaki Toh, Kosuke O. Hara, Noritaka Usami, Noriyuki Saito, Noriko Yoshizawa, Kaoru Toko, Takashi Suemasu, Journal of Crystal Growth, No. 345, 16 (2012).
19. M. Ajmal Khan, T. Saito, K. Nakamura, M. Baba, W. Du, K. Toh, K. Toko, T. Suemasu, Thin Solid Films, No. 522, 95 (2012).
20. Daichi Tsukahara, Suguru Yachi, Hiroki Takeuchi, Ryota Takabe, Weijie Du, Masakazu Baba, Yunpeng Li, Kaoru Toko, Noritaka Usami, Takashi Suemasu, Appl. Phys. Lett. No. 108, 152101 (2016).
21. Suguru Yachi, Ryota Takabe, Hiroki Takeuchi, Kaoru Toko, Takashi Suemasu, Appl. Phys. Lett. No. 109, 072103 (2016).
22. Yoji Imai, Mitsugu Sohma, Takashi Suemasu, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **34** (4), 25 (2013).
23. Yoji Imai, Mitsugu Sohma, Takashi Suemasu, Japanese Journal of Applied Physics **54**, 07JE03 (2015).
24. D. Tsukahara, M. Baba, S. Honda, Y. Imai, K. O. Hara, N. Usami, K. Toko, J. H. Werner, and T. Suemasu, Journal of Applied Physics **116**, 123709 (2014).
25. Yoshihiko Nakagawa, Kosuke O. Hara, Takashi Suemasu, Noritaka Usami, Procedia Engineering **141**, 23 (2016).
26. S. Koike, M. Baba, K. Nakamura, K. M. Ajmal, W. Du, K. Toko, and T. Suemasu, Phys. Status Solidi C **10**, 1773 (2013).
27. Kosuke O. Hara, Yusuke Hoshi, Noritaka Usami, Yasuhiro Shiraki, Kotaro Nakamura, Kaoru Toko, Takashi Suemasu, Thin Solid Films **557**, 90 (2014).
28. M. Ajmal Khan, K. Nakamura, W. Du, K. Toko, N. Usami, T. Suemasu, Applied Physics Letters **104**, 252104 (2014).
29. M. Ajmal Khan, K. O. Hara, W. Du, M. Baba, K. Nakamura, M. Suzuno, K. Toko, N. Usami, T. Suemasu, Applied Physics Letters **102**, 112107 (2013).
30. Ankit Pokhrel, Leith Samad, Fei Meng and Song Jin, Nanoscale, No.7, 17450 (2015).
31. V. L. Dubov, D. V. Fomin, K. N. Galkin, Vestnik Samar. Gos. Aerokosmos. Univer. **15** (2), 114 (2016).
32. D. V. Fomin, V. L. Dubov, K. N. Galkin, D. L. Goroshko, A. M. Maslov, N. G. Galkin, R. I. Batalov and V. A. Shustov, Solid State Phenomena **245**, 42 (2016).