

УДК 538.971

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗОРИЕНТАЦИИ ЗЕРЕН В МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЯ РЭМ

© 2022 г. С. М. Пещерова<sup>а</sup>\*, А. Г. Чуешова<sup>а</sup>, М. Д. Зимин<sup>а</sup>, Е. А. Лудина<sup>а</sup>, Л. А. Павлова<sup>а</sup>,  
А. И. Непомнящих<sup>а</sup>, С. М. Зубрицкий<sup>б</sup>, М. Ю. Рыбьяков<sup>б</sup>, Л. К. Довченко<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН, Иркутск, 664033 Россия

<sup>б</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003 Россия

\*e-mail: spescherova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2021 г.

После доработки 27.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Проведен анализ контраста изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме обратно-рассеянных электронов, который показал, что на полированной поверхности мультикристаллического кремния (мультикремния) контраст обусловлен параметрами разориентации между зернами. Установлены значения контраста, соответствующие специальным границам наклонного типа с различными значениями обратной плотности совпадающих узлов кристаллических решеток соседних зерен, образующих эти границы. Поскольку метод РЭМ позволяет исследовать относительно большие площади поверхности образцов (около 1 см<sup>2</sup>), то благодаря предложенному в данной статье методу идентификации специальных границ наклонного типа возможен анализ характера взаимодействия границ и их плотности распределения в структуре в зависимости от тех или иных условий кристаллизации. При РЭМ-исследованиях мультикремния это может иметь важное значение для первичного анализа структуры и дальнейшей постановки исследовательских задач без использования специальных селективных травителей, разрушающих поверхность исследуемых образцов.

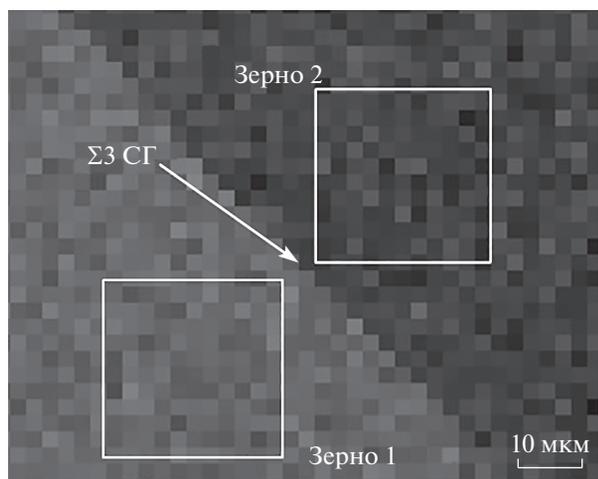
**Ключевые слова:** мультикристаллический кремний, межзеренные границы, сканирующая электронная микроскопия, дифракция обратно-рассеянных электронов, специальные границы наклона, макроструктура, идентификация, контраст изображения РЭМ.

**DOI:** 10.31857/S1028096022020108

### ВВЕДЕНИЕ

Межзеренные границы (МЗГ) в мультикремнии оказывают существенное влияние на его электрофизические характеристики. В зависимости от особенностей внутреннего строения они способны аккумулировать дефекты и, следовательно, проявлять различную степень рекомбинационной активности [1]. Установлено, что наиболее высокую рекомбинационную активность проявляют высокоугловые границы со случайным углом (так называемые общие границы, ОТ), малоугловые границы и, в меньшей степени, границы с решеткой совпадающих узлов (специальные границы, СГ) в соответствии с их значением  $\Sigma$  (величина, обратная плотности совпадающих узлов) [3–5]. В растровом электронном микроскопе (Tescan Mira 3 LMN) можно наблюдать МЗГ на изображении полированной поверхности мультикристаллического кремния благодаря контрасту каналирования обратно-рассеянных элект-

тронов [6, 7]. Контраст каналирования обусловлен количеством отраженных и, соответственно, поступивших на детектор электронов, которое напрямую зависит от плотности атомных слоев в области взаимодействия падающего пучка электронов с различно ориентированными участками поверхности поликристаллического образца. Основанный на данном эффекте метод ЕССИ (electron channeling contrast imaging) наряду с методом дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОРЭ) активно используется для анализа структуры поликристаллических материалов [8–10]. В частности, метод ЕССИ успешно применяли для идентификации границ двойникования  $\Sigma 3$  в деформированной стали, при этом авторам удалось определить двойниковые границы второго порядка, образованные вследствие деформации. Однако, для идентификации границ двойникования и дислокационных кластеров, как правило, используют морфологические характеристики границ на кон-



**Рис. 1.** Результаты измерений интенсивности изображения РЭМ: в зерне одно усредненное значение  $C_1 = 57.1$ , в зерне 2  $C_2 = 73.9$ .

трастных изображениях РЭМ, сопоставляя их с данными ДОРЭ [11]. Непосредственно значения контраста для определения кристаллографических параметров разноориентированных зерен используют значительно реже и только для интерпретации дислокаций и двойниковых границ на изображениях просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [12, 13]. Однако, результаты РЭМ-исследований биструктур SiC при низких значениях энергии электронов (менее 1 кэВ), когда ориентационный вклад в контраст изображения предполагался максимальным, указывают на корреляцию яркости изображения с ориентацией слоя SiC относительно другого слоя SiC [14].

В настоящей работе обсуждается зависимость значений контраста структуры полированной поверхности мульткристаллического кремния на изображениях РЭМ от кристаллографических параметров контрастирующих зерен. Целью работы является идентификация наклонных СГ, имеющих решетку совпадающих узлов по контрасту образующих их зерен, на изображениях РЭМ.

## МЕТОДИКА

Образцы мульткристаллического кремния, выращенные методом направленной кристаллизации Бриджмена, были вырезаны параллельно оси роста из разных слитков. Поверхности образцов полировали алмазными пастами для получения контрастных изображений РЭМ в обратно-рассеянных электронах при ускоряющем напряжении 20.0 кВ (Tescan Mira 3, Jeol JXA 8200) и анализа параметров разориентации методом ДОРЭ (OXFORD INSTRUMENTS, модель JEOL JIB-Z4500). Для выявления фигур травления на исследуемой поверхности образцов применяли ориентационно-

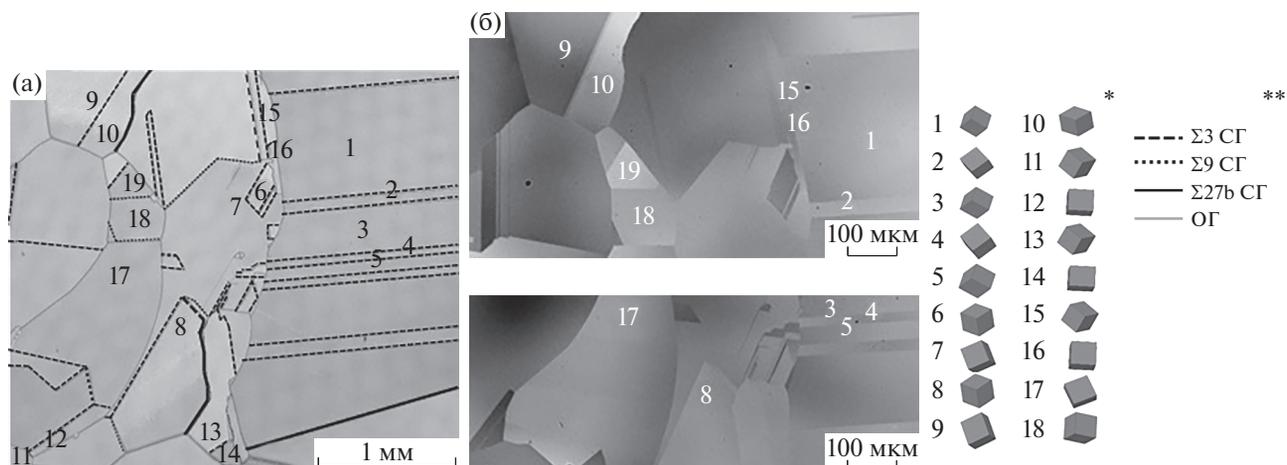
чувствительный анизотропный травитель КОН (10%) [15]. Обработанную в травителе поверхность исследовали методом РЭМ (Qwanta FEI). Значения контраста на изображениях РЭМ (файлы формата bmp) полированных образцов мульткристаллического кремния определяли в программе GIMP 2.10.22 (GNU Image Manipulation Program), измеряя значения яркости серого цвета в областях с одинаковой площадью ( $11 \times 11$  пикселей) по обе стороны от СГ (рис. 1). Полученные значения усреднялись, контраст рассчитывали по формуле Майкельсона:

$$C = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}}. \quad (1)$$

Параметры МЗГ определяли по данным EBSD.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полированные поверхности образцов мульткристаллического кремния (63Н, 64Н, 65Н, 71Н и 79Н) были исследованы методами ДОРЭ и РЭМ таким образом, чтобы области с известными по данным ДОРЭ параметрами разориентации совпадали с их контрастными изображениями РЭМ (рис. 2). Благодаря контрасту на изображениях РЭМ (рис. 2в) четко видны отдельные зерна и МЗГ всех типов (рис. 2а). Формы и границы зерен на контрастных изображениях РЭМ совпадают с данными ДОРЭ для одной и той же области поверхности образца (рис. 2а, 2б). Причем интенсивность контраста меняется от зерна к зерну, что обуславливается различиями пространственных ориентаций кристаллических решеток в этих зернах. Это хорошо согласуется с процессом отражения обратно-рассеянных электронов при сканировании поверхности вблизи МЗГ. Так, в каждой точке сканирования пучок электронов отклоняется на угол, пропорциональный углу наклона элементарной ячейки относительно плоскости поверхности. В соответствии с этим на детектор поступает определенное количество обратно-рассеянных электронов, что в свою очередь, пропорционально яркости серого цвета данной точки сканирования на изображении РЭМ. Следовательно, яркость изображения множества точек сканирования, относящихся к одному монокристаллическому зерну, будет одинаковой для всей области зерна. Однако в области границы двух соседних зерен (1 и 2) с различными индексами Миллера ( $h_1k_1l_1$  и  $h_2k_2l_2$ ), характеризующими (по данным ДОРЭ) положение элементарной ячейки относительно нормали к поверхности исследования, угол отклонения пучка обратно рассеянных электронов меняется, что выражается в виде контраста на изображении РЭМ. Следует отметить, что наиболее контрастными областями являются границы зерен. Так как в области инженерии дефектов именно они имеют важное значение при



**Рис. 2.** Изображение фрагмента поверхности образца мультикремния 64Н: а – ДОРЭ-карта с различно ориентированными зернами (\*) и межзеренными границами (\*\*), б – контрастное РЭМ-изображение в обратно-рассеянных электронах.

анализе свойств материала, целесообразно применить эффект контраста на изображениях РЭМ для идентификации границ зерен “in situ” непосредственно в процессе исследования поверхности мультикристаллического кремния методом растровой электронной микроскопии. В зависимости от тепловых и скоростных режимов кристаллизации плотность границ зерен на единицу площади поверхности может существенно изменяться от слитка к слитку. Кроме того, при решении подавляющего числа задач немаловажным является определение типов границ, поскольку их свойства напрямую зависят от того, являются ли они границами со случайным углом разориентации (ОГ) или границами с решеткой совпадающих узлов (СГ). Учитывая соотношение типов границ в мультикристаллическом кремнии (исключением является высокопроизводительный мультикристаллический кремний), доля СГ существенно превышает долю ОГ. Согласно анализу количества межзеренных границ различных типов в исследуемых образцах по данным ДОРЭ (карты СГ), доля ОГ не превышает 30% от СГ, в то время как доля СГ составляет более 50% от всех границ (табл. 1). В данной работе проведен анализ изображений РЭМ границ специального типа. В отличие

от ОГ, они имеют строго упорядоченную структуру, представляющую собой плоскость “сшивки” двух кристаллических решеток соседних зерен с периодически совпадающими атомами. При этом период (или количество атомов между общими, совпадающими из обеих решеток границами) отображается в обозначении  $\Sigma$  границы. Так, в плоскости  $\Sigma 3$  границы каждый третий атом является общим для двух соседних решеток. Ввиду особенностей строения СГ, они реализуемы только определенными сочетаниями взаимных ориентировок с соответствующим набором возможных для того или иного типа СГ индексов  $hkl$  соседних зерен. Каждому типу СГ в кубической гранцентрированной решетке соответствуют такие параметры, как угол разориентации между плоскостями соседних зерен, ось вращения и плоскость залегания [16]. Исходя из сказанного выше, можно предположить, что значения контраста, соответствующие границам с одинаковыми параметрами, будут сопоставимы друг с другом. Однако не столько параметры самих границ вносят вклад в формирование контраста, сколько ориентации образующих их зерен относительно плоскости исследуемой поверхности. Именно они обуславливают разницу углов отклонения

**Таблица 1.** Межзеренные границы в исследуемых образцах мультикристаллического кремния

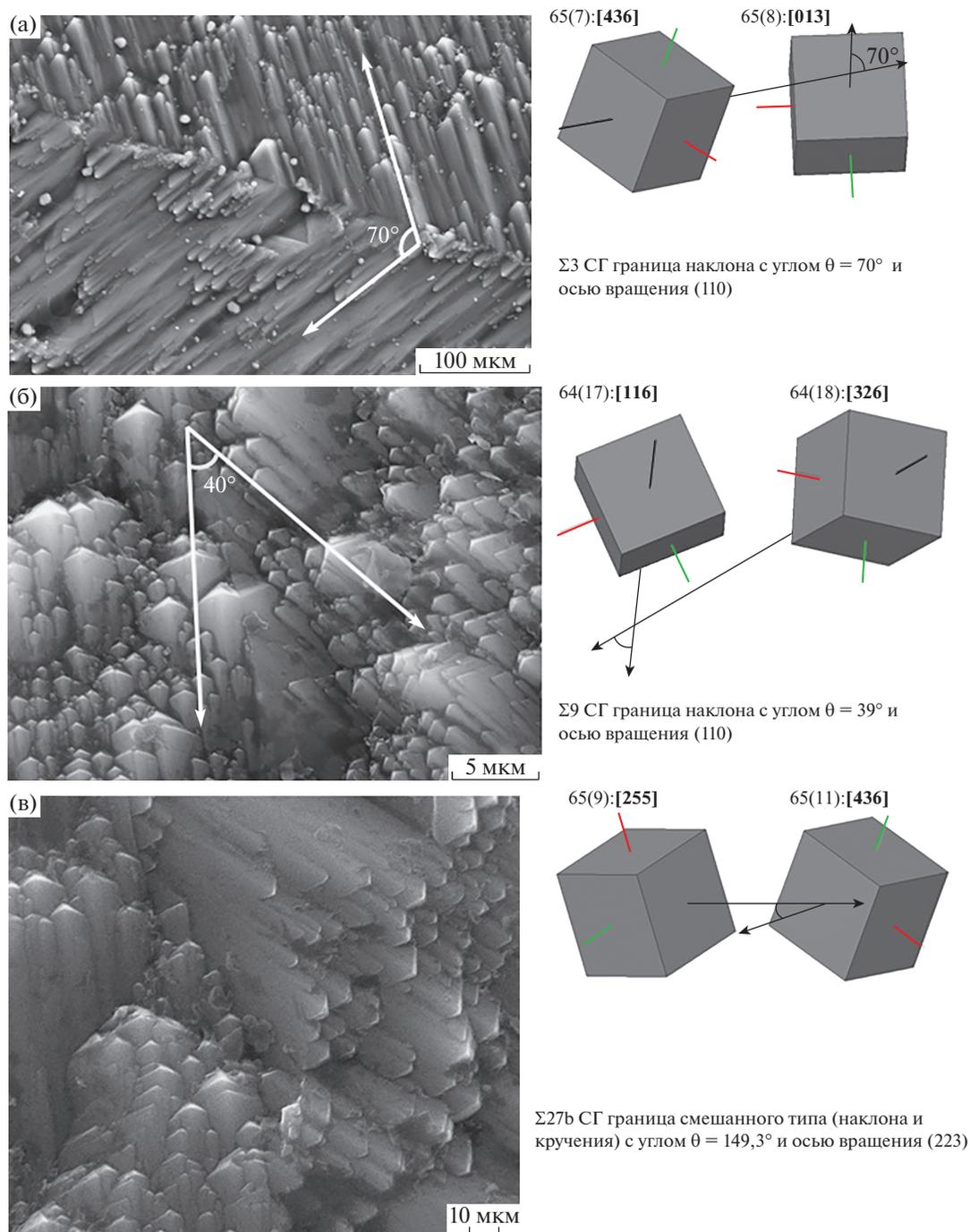
Образец	$\Sigma 3$	$\Sigma 9$	$\Sigma 27a$	$\Sigma 27b$	$\Sigma 29a$	$\Sigma 37b$	ОГ	СГ	МЗГ	$S, \text{мм}^2$
63Н-1	66	12	0	3	2	1	35	84	119	25.58
64Н	98	15	4	4	2	4	34	127	161	28.665
65Н	42	6	3	0	1	1	6	53	59	9.64
71Н	29	3	0	0	0	0	4	32	36	14.87
79Н	19	8	1	3	0	2	2	33	35	9.41

Примечание:  $S (\text{мм}^2)$  – площадь исследуемой методом ДОРЭ поверхности.

Таблица 2. Параметры разориентации зерен и CSL границ и значения контраста

Образец (Зерно №)	$hkl$	$\psi_1$	$\psi$	$\psi_2$	$C_{cp}$	$C$	СГ
64(1)	122	129.6	45.4	25.4	25.2	0.125	$\Sigma 3$
64(2)	012	210.9	28.3	8.3	32.4		
64(2)	012	210.9	28.3	8.3	30.2	0.120594	$\Sigma 3$
64(3)	255	130.1	45.6	24.6	23.7		
64(3)	255	130.1	45.6	24.6	25.5	0.126712	$\Sigma 3$
64(4)	012	210.4	28.4	8.9	32.9		
64(4)	012	210.4	28.4	8.9	28.3	0.123016	$\Sigma 3$
64(5)	255	130.1	45.7	24.8	22.1		
65(5)	146	42.5	33.8	8.9	33.1	0.127768	$\Sigma 3$
65(6)	013	176.4	18.4	5.9	25.6		
71(3)	023	92.9	32.8	4.2	59.6	0.120295	$\Sigma 3$
71(4)	025	220.2	20.9	9.1	75.9		
71(4)	025	220.2	20.9	9.1	74.8	0.120599	$\Sigma 3$
71(5)	023	92.8	33	4.2	58.7		
63-1(3)	356	143.8	43.4	30.8	46.9	0.12605	$\Sigma 3$
63-1(4)	025	233.07	23.58	3.91	36.4		
63-1(4)	025	233.07	23.58	3.91	37.3	0.124413	$\Sigma 3$
63-1(5)	356	143.4	43.5	31.1	47.9		
64(6)	566	68.8	51.4	42.3	28.7	0.090333	$\Sigma 3$
64(7)	114	239.5	19.6	53	34.4		
64(7)	114	239.5	19.6	53	19.4	0.097674	$\Sigma 3$
64(8)	566	68.8	50.9	42.1	23.6		
64(9)	114	239	19.4	53.1	29.3	0.090062	$\Sigma 3$
64(10)	566	68.6	51.7	42.8	35.1		
65(1)	126	269.75	19.08	35.85	60.4	0.092224	$\Sigma 3$
65(2)	656	78.41	51.67	49.01	50.2		
65(2)	656	78.41	51.67	49.01	46.5	0.093567	$\Sigma 3$
65(3)	114	269.3	19.2	36.2	56.1		
65(3)	114	269.3	19.2	36.2	62.4	0.09282	$\Sigma 3$
65(4)	656	78.4	51.7	49.2	51.8		
64(11)	335	281.6	39.7	43	30.4	0.20396	$\Sigma 3$
64(12)	014	161.5	14.6	15.3	20.1		
64(13)	335	282.1	39.5	42.9	19.8	0.206413	$\Sigma 3$
64(14)	014	160.9	14.6	16.3	30.1		
64(15)	335	283.1	39.3	41.8	9.9	0.217391	$\Sigma 3$
64(16)	014	158.4	14.4	18.7	15.4		
65(7)	436	281.3	40.1	51.2	22.4	0.204301	$\Sigma 3$
65(8)	013	176.1	18.7	6.4	14.8		
65(8)	013	176.1	18.7	6.4	14.1	0.216667	$\Sigma 3$
65(9)	436	281.2	40.3	51	21.9		
65(9)	436	281.2	40.3	51	31	0.204108	$\Sigma 3$
65(10)	013	176	18.6	6.4	46.9		
64(17)	116	175.1	12.2	28.3	10.8	0.401662	$\Sigma 9$
64(18)	326	118.7	32.4	53.6	25.3		
64(18)	326	118.7	32.4	53.6	24.9	0.422857	$\Sigma 9$
64(19)	116	175.1	12.2	28.3	10.1		
79(1)	316	36	30.1	80	29.5	0.401425	$\Sigma 9$
79(2)	135	340.3	30.4	11.1	12.6		
63-1(1)	136	324.8	24	12.6	27.5	0.403061	$\Sigma 9$
63-1(2)	316	31.4	26	69.1	11.7		
65(9)	436	281.2	40.3	51	28.6	0.025554	$\Sigma 27a$
65(11)	255	89.6	46.8	24.3	30.1		
71(1)	133	13.1	44.2	17.8	9.4	0.50	$\Sigma 27a$
71(2)	435	322.2	45.6	55.6	28.7		

Примечание:  $C_{cp}$  – усредненная по нескольким областям яркость в отдельном зерне.  $C$  – значение контраста Майкельсона.



**Рис. 3.** Изображения РЭМ-границ зерен и соответствующие им параметры разориентации ячеек образующих их зерен на травленных поверхностях образцов: а – 65Н, б – 64Н, в – 65Н.

пучка обратно-рассеянных электронов от точек сканирования, относящихся к различным зернам и, следовательно, контраст изображения РЭМ. Пространственную ориентацию элементарной ячейки в зерне относительно нормали к плоскости поверхности характеризуют углы Эйлера ( $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ). Карты разориентации зерен ДОРЭ (рис. 2а) были использованы для выбора границ таким обра-

зом, чтобы можно было также сопоставить значения контраста в областях с одинаковыми (в рамках поверхности одного образца) или максимально близкими (для разных образцов) значениями углов Эйлера. Для образца 64Н были выбраны границы между зернами 9/10, 7/6 и 7/8, и значения контраста для них сравнивали не только между собой, но и с подобными границами, образованными зер-

нами с близкими углами Эйлера в других образцах. Так, для  $\Sigma 3$ ,  $\Sigma 9$  и  $\Sigma 27a$  СГ с одинаковыми параметрами в пяти исследуемых образцах мультикремния были измерены значения контраста (табл. 2).

Согласно экспериментальным данным, приведенным в табл. 2, контраст на изображениях РЭМ определенно зависит от параметров разориентации соседних зерен. Так, зерна с близкими значениями углов Эйлера образуют однотипные границы, которые характеризуются аналогичными значениями контраста. Например, границы  $\Sigma 3$  в разных образцах (в образце 65Н и 64Н) между зернами  $2/3$  и  $7/8$  соответственно, с одинаковыми индексами Миллера имеют схожие значения контраста (0.097674 и 0.093567). Все значения контраста в областях  $\Sigma 3$  границ варьируются в пределах значений 0.09–0.2. Для  $\Sigma 9$  границ характерен контраст  $\approx 0.4$ . В случае с границей  $\Sigma 27a$ , когда значения контраста в образцах 65Н и 71Н не совпадают, имеет значение разновидность самой границы: в образце 71Н граница наклонного типа имеет угол разориентации  $\theta$ , равный  $35.340^\circ$ , и ось вращения (110), а в образце 65Н она смешанного типа (наклона и кручения, рис. 3в). Все остальные исследованные в данной работе границы являются границами наклона, что хорошо видно на изображениях РЭМ травленных в КОН поверхностях исследованных образцов (рис. 3а, 3б). Из этого следует, что зависимость контраста от типа границы может быть применена только к СГ наклонного типа.

Малое значение контраста для границы  $\Sigma 27a$  в образце 65Н можно объяснить двумя составляющими истинного угла разориентации между кристаллическими решетками зерен 1 и 2: наклоном и кручением. Следовательно, угол наклона относительно нормали к поверхности исследования может быть слишком мал для формирования выраженного контраста, что делает идентификацию типа границы по контрасту изображения РЭМ невозможной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контраст на изображениях РЭМ полированных поверхностей выявляет зеренно-границную структуру мультикристаллического кремния. Обрато-рассеянные электроны чувствительны к углу наклона элементарной ячейки относительно нормали к поверхности исследования, и их количество, поступившее на детектор, пропорционально интенсивности цвета на изображении РЭМ. Применение данного механизма позволяет использовать значения контраста для идентификации границ с решеткой совпадающих узлов наклонного типа. Так, каждому типу специальных границ

( $\Sigma 3$ ,  $\Sigma 9$ ,  $\Sigma 27a$  и т.д.) соответствует определенное значение контраста изображения РЭМ. Данный способ является перспективным для применения его в качестве метода быстрого анализа структуры мультикристаллического кремния при исследовании его методом растровой электронной микроскопии в режиме обратно-рассеянных электронов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проведено в рамках выполнения Государственного задания (проект № 0284-2021-0004) “Материалы и технологии для разработки радиационных детекторов, люминофоров и оптических стекол”.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schindler F., Fell A., Müller R., Benick J., Richter A., Feldmann F., Krenckel P., Riepe S., Schubert M. C. and Glunz S. W. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2018. V.185. P. 198. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.05.006>
2. Tsoutsouva M.G., Stokkan G., Regula G., Rynningen B., Riberi-Béridot T., Reinhart G., Mangelinck-Noël N. // Acta Materialia. 2019. V. 171. P. 253. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.04.010>
3. Stokkan G., Song A., Rynningen B. // Crystals. 2018. V. 8. № 9. P. 341. <https://doi.org/10.3390/cryst8090341>
4. Brantov S., Feklisova O., Yakimov E. // Phys. Status Solidi C. 2011. V. 8. № 4. P. 1384. <https://doi.org/10.1002/pssc.201083996>
5. Adamczyk K., Sondenå R., Stokkan G., Looney E. // Journal of Applied Physics. 2018. V. 123. № 5. P. 705. <https://doi.org/10.1063/1.5018797>
6. Scanning Electron Microscope Mira 3 FEG-SEM. Instructions for use. TESCAN. a.s. Brno. Czech Republic, 2011. P. 41.
7. Canovic S., Jonsson T., Halvarsson M. // J. Physics: Conference Series. 2008. V. 126. P. 2054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/126/1/012054>
8. Trager-Cowan C., Sweeney F., Trimby P.W., Day A.P., Gholinia A., Schmidt N.-H., Parbrook P.J., Wilkinson A.J., Watson I.M. // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.085301>
9. Koyama M., Akiyama E., Tsuzaki K. and Raabe D. // Acta Materialia. 2013. V. 61. P. 4607. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.030>
10. Zhang J.-L., Zaefferer S., Raabe D. // Materials Science and Engineering: A. 2015. V. 636. P. 231. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.078>
11. Koyama M., Akiyama E., Tsuzaki K., Raabe D. // Acta Materialia. 2013. V. 61. P. 4607. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.030>
12. Gutierrez-Urrutia I., Zaefferer S., Raabe D. // Materials Science and Engineering A. 2010. V. 527. P. 3552. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.041>

13. *Gutierrez-Urrutia I., Zaefferer S., Raabe D.* // JOM. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0678-0>
14. *Ashida K., Kajino T., Kutsuma Y., Ohtani N., Kaneko T.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2015. V. 33. № 4. <https://doi.org/10.1116/1.4927136>
15. *Bressers P., Kelly J., Gardeniers J., Elwenspoek M.* // J. Electrochem Soc. 1996. V. 143. P. 1744. <https://doi.org/10.1149/1.1836710>
16. *Morawiec A.* // J. Applied Crystallography. 2011. V. 44. P. 1152. <https://doi.org/10.1107/S002188981104310X>

## Influence of the Misorientation Parameters of Grains in Multicrystalline Silicon on the Sem Image Contrast Formation

S. M. Peshcherova<sup>1</sup> \*, A. G. Chueshova<sup>1</sup>, M. D. Zimin<sup>1</sup>, E. A. Ludina<sup>1</sup>, L. A. Pavlova<sup>1</sup>, A. I. Nepomnyashchikh<sup>1</sup>, S. M. Zubritsky<sup>2</sup>, M. Yu. Ribyakov<sup>2</sup>, and L. K. Dovchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Federal state budgetary institution of science Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, 664033 Russia*

<sup>2</sup>*Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia*

\**e-mail: spescherova@mail.ru*

The analysis of the contrast of images of scanning electron microscopy (SEM) in the mode of backscattered electrons. The dependence of the SEM images contrast on a polished surface of multicrystalline silicon (mc-Si) on the parameters of misorientation between grains has been established. The SEM images contrast values are revealed that correspond to special tilt grain boundaries with different coincidence number ( $\Sigma$ ) based on the inverse of the number of coincident lattice sites. Since the SEM method allows one to investigate relatively large surface areas of samples (about 1 cm<sup>2</sup>), the method for identifying special tilt grain boundaries proposed in this article makes it possible to analyze the nature of the interaction of boundaries and their distribution density in the structure. In SEM studies of multisilicon, this can be important for the initial analysis of the structure and further formulation of research problems without the use of special selective etchants that destroy the surface of the samples under study.

**Keywords:** multicrystalline silicon, grain boundaries, scanning electron microscopy, backscattered electron diffraction, special tilt grain boundaries, macrostructure, identification, SEM image contrast.