

Т.В. Критская, профессор, д.т.н.

Г.А. Колобов, профессор, к.т.н.

## РАФИНИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ

(Сообщение 3)

*Запорожская государственная инженерная академия*

Проведено анализ современных методов одержания кремния высокой чистоты для электроники та сонячної енергетики. Дано характеристику основних стадій процесу одержання кремнієвих зливок масою 400...450 кг методом направленного тепловідведення (НЕМ). Наведено дані про розподіл домішок та електрофізичних параметрів за об'ємом блоків мультикристалічного кремнію, що використовують у технології фотоелектричних перетворювачів.

Проведен анализ современных методов получения кремния высокой чистоты для электроники и солнечной энергетики. Дана характеристика основных стадий процесса получения кремниевых слитков массой 400...450 кг методом направленного теплоотвода (НЕМ). Приведены данные о распределении примесей и электрофизических параметров по объёму блоков мультикристаллического кремния, используемых в технологии фотоэлектрических преобразователей.

В сообщениях [1,2] рассмотрены технологии рафинирования металлургического кремния ( $MG-Si$ ) до степени чистоты  $UMG-Si$ . Кроме описанных процессов, для улучшения качества кристаллического кремния может быть использована электронно-лучевая плавка [3]. При переплаве кремния способом ЭЛП происходит эффективное удаление таких примесей, как  $Mg$ ,  $Al$ ,  $P$ ,  $Ca$ ,  $As$  и других. Указывается, что необходимо продолжить исследования по интенсификации процессов удаления из кремния  $B$ ,  $C$ ,  $Ni$  и  $Cu$  при ЭЛП.

При получении кремния, предназначенного для использования в солнечных элементах (обозначение  $SoG-Si$ ), может быть использовано шлаковое рафинирование [4]. При исследовании возможности удаления бора из кремния металлургического сорта измеряли коэффициент распределения бора и коэффициент активности оксида бора при температуре 1550 °С в системе силикатных шлаков  $CaO-SiO_2$  при отношении  $CaO : SiO_2$  в интервале 0,55...1,21. При отношении  $CaO : SiO_2 > 0,8$  коэффициент активности оксида бора уменьшается с ростом количества  $CaO$ , а при  $CaO : SiO_2 < 0,8$  коэффициент активности оксида бора уменьшается с ростом количества  $SiO_2$ . В этих шлаках бор существует в виде  $BO_4$ , встроенного в сетку силикатов. Структуры вокруг бора в шлаке имеют тетраэдрическую форму и окружены группами  $SiO_2$ , а вокруг атома бора находятся  $Ca^{2+}$ .

Развивается метод получения металлургического кремния повышенной чистоты для фотоэнергетики путем алюмотермического восстановления природных кварцитов. В работе [5] подобран оптимальный состав шихты для проведения реакции восстановления. Обнаружено, что чистота исходных материалов при алюмотермическом восстановлении незначительно влияет на чистоту получаемого кремния, за исключением содержания примесей бора и фосфора. В результате применения шлакового рафинирования резко уменьшилась концентрация фаз  $CaAl_2Si_2$  и  $CaAl_2Si_{1,5}$  и увеличилась доля свободного кремния. Общая концентрация примесей в кремнии после его очистки химическим методом и кристаллизационной очистки уменьшилась до  $\sim 10$  ppm. Выращенные монокристаллы кремния имели концентрацию бора и алюминия не больше 2 ppm, фосфора – не более 7 ppm и удельное электрическое сопротивление 1,0...1,5 Ом·см.

Исходным материалом для получения кремния качества *SoG-Si* может служить и побочная продукция производства фосфорных соединений. Так, в работе [6] рассмотрена фторидно-гидридная технология получения гранулированного кремния «солнечного» качества из вторичного продукта переработки апатита Хибинского месторождения [химическая формула  $Ca_5F(PO_4)_3$ ], который содержит кремний (в форме  $SiO_2$ ) без наиболее вредных примесей бора и хрома. Технология получения поликремния включает следующие стадии: получение из  $Ca_5F(PO_4)_3$  кремнефторида натрия, термическое разложение  $Na_2SiF_6$  с получением  $SiF_4$ , каталитический синтез моносилана ( $SiH_4$ ) и пиролиз  $SiH_4$ . Методами зонной плавки и Чохральского полученный поликремний в виде стержней модифицировался в монокристаллическую структуру. Выращенный монокристаллический слиток был распилен на пластины, которые были использованы для изготовления солнечных элементов, показавших высокую эффективность.

В настоящем сообщении рассматривается следующий этап рафинирования кремния: от чистоты *UMG-Si* до чистоты *SoG-Si*. Производство кристаллического кремния. Производство кристаллического кремния для использования в полупроводниковом приборостроении сводится к двум аспектам – получению высокосовершенных монокристаллов методами Чохральского и бестигельной зонной плавки, используемых, в основном, в силовой, микро- и нанoeлектронике, и кремния «солнечного качества», получаемого помимо перечисленных методов, методами направленной кристаллизации. Выращивание монокристаллов, обеспечивая требуемое совершенство кристаллической структуры, также сопровождается очисткой от ряда примесей, оттесняемых в жидкую фазу или испаряемых из расплава.

Сырьем для получения монокристаллов кремния «электронного качества» является поликристаллический кремний, получаемый по «Сименс»-технологии или методом термического разложения моносилана. Чистота поликристаллического кремния, получаемого этими методами, зависит от степени очистки исходных продуктов (трихлорсилана, водорода, моносилана), использования материалов оснастки с лимитированным содержанием микропримесей и технологических аспектов. В частности, применение термодистилляционной очистки парогазовой смеси (ПГС) трихлорсилан-водород позволяет в существенной мере повысить чистоту производимого поликристаллического кремния (табл. 1).

**Таблица 1** – Электрофизические параметры поликристаллического полупроводникового кремния [7]

Параметр качества	Без очистки ПГС	С очисткой ПГС в термодистилляционной колонне
Уровень доноров	300 Ом·см ( <i>n</i> -тип)	$\geq 600 \dots 800$ Ом·см ( <i>n</i> -тип)
Уровень акцепторов (бора)	3000 Ом·см ( <i>p</i> -тип)	$\geq 10000$ Ом·см ( <i>p</i> -тип)
Содержание углерода	$5 \cdot 10^{16} \dots 10^{17}$ см <sup>-3</sup>	$< 10^{15}$ см <sup>-3</sup>

Поликристаллический кремний, выпускаемый в СССР по методу водородного восстановления трихлорсилана (ВВ), в соответствии с ТУ 48-4-86, имел девять марок качества. Уровень чистоты по бору обеспечивали в пределах 1000...10000 Ом·см ( $10^{13} \dots 10^{12}$  см<sup>-3</sup>), по фосфору – в пределах 50...1000 Ом·см ( $8,5 \cdot 10^{13} \dots 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>). Поликристаллический кремний, получаемый моносилановым методом, отличается более высокой чистотой по бору и фосфору –  $10^{11} \dots 10^{10}$  см<sup>-3</sup>, однако в настоящее время объемы его промышленного производства уступают методу ВВ. Этот материал, в основном, используют для выращивания монокристаллов методом бестигельной зонной плавки, предназначенных для изготовления уникальных полупроводниковых приборов. Сырьем при получении монокристаллов по методу Чохральского, удовлетворяющим требованиям

большинства классов приборов и интегральных микросхем, является поликристаллический кремний с содержанием акцепторов (бора) менее  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  и доноров (фосфора) менее  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Монокристаллы, выращенные методом Чохральского, отличаются высокими – до  $(1 \dots 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  – концентрациями кислорода, в то же время этот метод обеспечивает более эффективное отеснение примесей в жидкую фазу, по сравнению с однопроходной бестигельной зонной плавкой (при использовании одного и того же поликристаллического кремния). Принятие специальных мер, в частности инициация испарения из расплава кислорода при помощи специально направленных на него струй аргона [8,9], позволяет обеспечить чистоту монокристаллов, сравнимую с их чистотой в процессе многопроходной бестигельной зонной плавки (табл. 2) [10].

**Таблица 2** – Содержание примесей в монокристаллах кремния<sup>\*)</sup>, полученных методами Чохральского и бестигельной зонной плавкой

Элемент	Концентрация примеси, $\text{см}^{-3}$			
	Традиционный метод	Обдувка расплава струями аргона	Метод БЗП, один проход	Метод БЗП, пять проходов
<i>Na</i>	$3,6 \cdot 10^{15}$	$6,9 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{15}$	$5,1 \cdot 10^{14}$
<i>Sc</i>	$1,9 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$< 1,0 \cdot 10^{12}$
<i>Ti</i>	$2,1 \cdot 10^{16}$	$< 1,8 \cdot 10^{16}$	$< 1,8 \cdot 10^{16}$	$7,0 \cdot 10^{15}$
<i>Cr</i>	$6,7 \cdot 10^{13}$	$5,6 \cdot 10^{13}$	$5,9 \cdot 10^{13}$	$3,5 \cdot 10^{13}$
<i>Fe</i>	$3,0 \cdot 10^{13}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	$< 1,0 \cdot 10^{12}$
<i>Co</i>	$2,4 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{13}$
<i>Ni</i>	$2,9 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	$4,7 \cdot 10^{11}$
<i>Zn</i>	$4,3 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{14}$
<i>As</i>	$1,2 \cdot 10^{12}$	$9,0 \cdot 10^{11}$	$4,0 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{11}$
<i>Mo</i>	$2,0 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	$7,0 \cdot 10^{11}$	$4,0 \cdot 10^{11}$
<i>Cd</i>	$5,4 \cdot 10^{14}$	$4,0 \cdot 10^{14}$	$4,5 \cdot 10^{14}$	$4,0 \cdot 10^{14}$
<i>Ag</i>	$2,0 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$6,7 \cdot 10^{11}$	$5,4 \cdot 10^{11}$
<i>Sb</i>	$9,5 \cdot 10^{11}$	$8,0 \cdot 10^{11}$	$4,3 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{10}$
<i>Cs</i>	$2,2 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{11}$
<i>Sm</i>	$9,0 \cdot 10^9$	$6,5 \cdot 10^9$	$9,0 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$
<i>Hf</i>	$1,8 \cdot 10^{10}$	$6,5 \cdot 10^9$	$9,0 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$
<i>Ta</i>	$6,9 \cdot 10^{10}$	$7,7 \cdot 10^{10}$	$2,9 \cdot 10^{11}$	$3,0 \cdot 10^{10}$
<i>W</i>	$7,0 \cdot 10^{11}$	$3,7 \cdot 10^{11}$	$5,0 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$
<i>Au</i>	$7,0 \cdot 10^9$	$7,8 \cdot 10^9$	$4,0 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$
<i>Hg</i>	$5,8 \cdot 10^{12}$	$2,8 \cdot 10^{12}$	$3,0 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$

<sup>\*)</sup> содержание примесей определяли методом нейтронно-активационного анализа; измерения проведены в ОИЯИ РАН, г. Дубна (Россия)

Для производства фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) пригоден как монокристаллический, так и крупноблочный мультикристаллический кремний, размер монокристаллических зерен в котором должен быть не менее 2...5 мм [11]. Сырьем для мультикристаллического кремния (*SoG-Si*) может быть как поликристаллический кремний, так и очищенный металлургический кремний (*UMG-Si*).

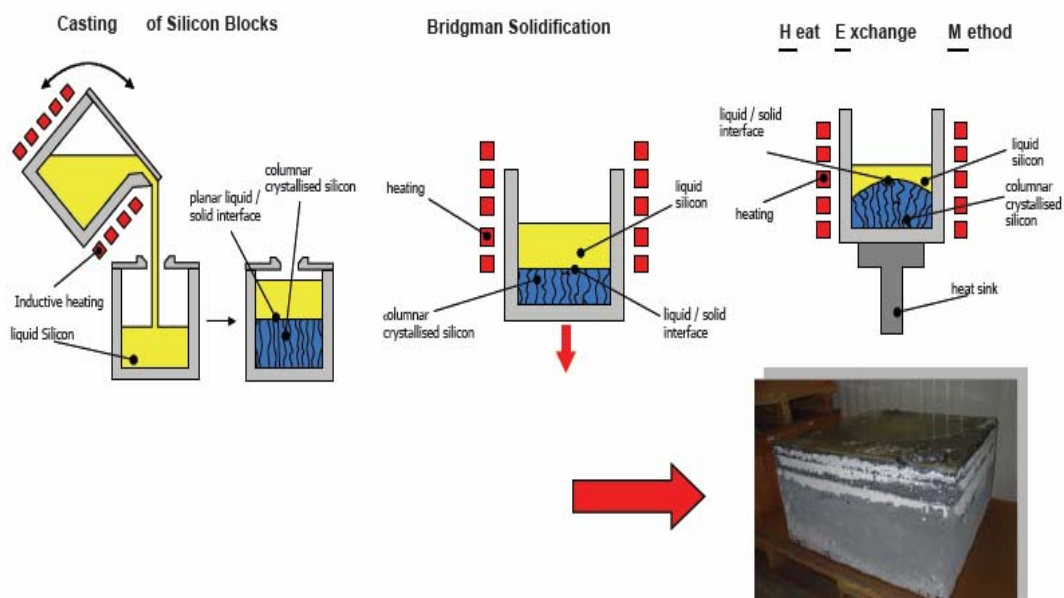
Поскольку практически все известные примесные элементы в кремнии имеют коэффициенты распределения меньше единицы, их отеснение в жидкую фазу происходит достаточно эффективно: суммарное содержание остаточных примесей в мультикремнии обеспечивается на уровне  $1 \dots 0,1 \text{ ppm}_w$ . В частности, содержание *Cu, Cr, Mn, Co* – 0,1; *P, Na, Mg, Ti, Ca* – 0,2; *Al, K, Fe, Ni, Zn* – 0,5; *Ba* – 0,6; *B, C* – 1; *O* – 10 ppm. В отдельных

случаях кристаллизационную очистку могут производить многократно. В табл. 3 приведены величины концентрации примесей в мультикремнии после одно-, двух- и трехкратной перекристаллизации.

**Таблица 3** – Концентрация примесей в мультикремнии [12]

Количество перекристаллизаций	Концентрация примесей, ppm <sub>w</sub>												
	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Ti</i>	<i>Mn</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	<i>B</i>	<i>P</i>
1	40,0	26,0	7,0	1,0	1,2	8,0	5,0	1,3	5,0	2,0	13,0	10,5	81
2	39,3	25,8	6,9	1,0	1,1	8,0	5,0	1,2	5,0	2,0	13,0	10,5	78
3	39,1	25,4	6,8	0,9	1,0	7,8	5,0	1,1	4,9	2,0	12,8	10,5	76

Промышленное производство мультикремния осуществляют высокопроизводительными методами «беззатравной направленной кристаллизации» (рис. 1). Наибольшее распространение имеет метод НЕМ (Heat Exchange method), который проводится в среде инертного газа. В современных установках масса загрузки в тигель может составлять от 300...450 до 800 кг. Наиболее известные производители оборудования – фирмы «GT-Solar» (США), «ALD», «Centroterm» (Германия), «Jinggong» (КНР).

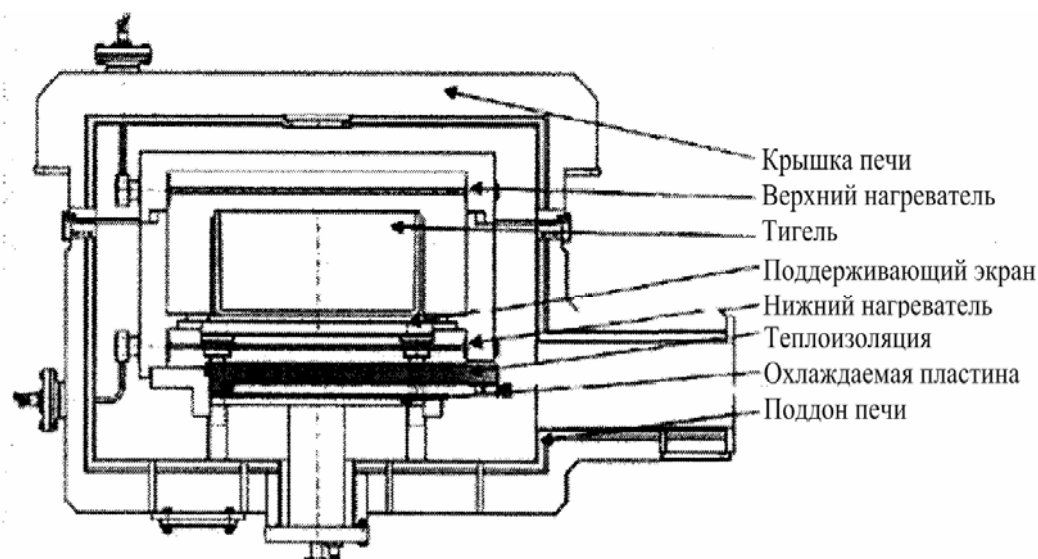


**Рисунок 1** – Технологии мультикремния на основе UMG-Si [13]

Расплавление кремния осуществляется в прямоугольных кварцевых тиглях с толщиной стенок ~30 мм. Внутренняя поверхность тиглей покрывается слоем нитрида кремния толщиной ~300 мкм. Кварцевый тигель используют на одну плавку. Покрытие нитридом кремния внутренней поверхности тигля позволяет на порядок снизить концентрацию металлических примесей в слитке мультикремния и повысить в нем время жизни неравновесных носителей заряда. Кристаллизацию расплава осуществляют с малой скоростью (0,25...0,33 мм/мин). При кристаллизации поверхность раздела твердой и жидкой фаз (фронт кристаллизации) поддерживается выпуклой в сторону расплава, чтобы избежать нежелательной («паразитной») кристаллизации от стенок тигля, а также образования пустот и раковин в объеме слитка. Процесс производят в проточной среде

аргона. Выращенный слиток охлаждают в ростовой камере до температуры  $\sim 300$  °С и затем вместе с кварцевым тиглем, с использованием специальных захватных устройств, выгружают на воздух, где охлаждают до комнатной температуры. Поверхность слитка со всех сторон обрезают на  $\sim 30$  мм (области с максимальным содержанием примесей). Затем осуществляют раскрой слитка на блоки заданного сечения ( $156 \cdot 156$  мм<sup>2</sup>) и резку блоков на пластины толщиной  $200 \pm 20$  мкм.

Схематически устройство установки SCU-400 фирмы «ALD» (Германия) изображено на рис. 2, а ее технические характеристики и некоторые качественные параметры производимого мультикремния представлены в табл. 4.



**Рисунок 2** – Схема установки SCU-400 фирмы «ALD»(Германия)

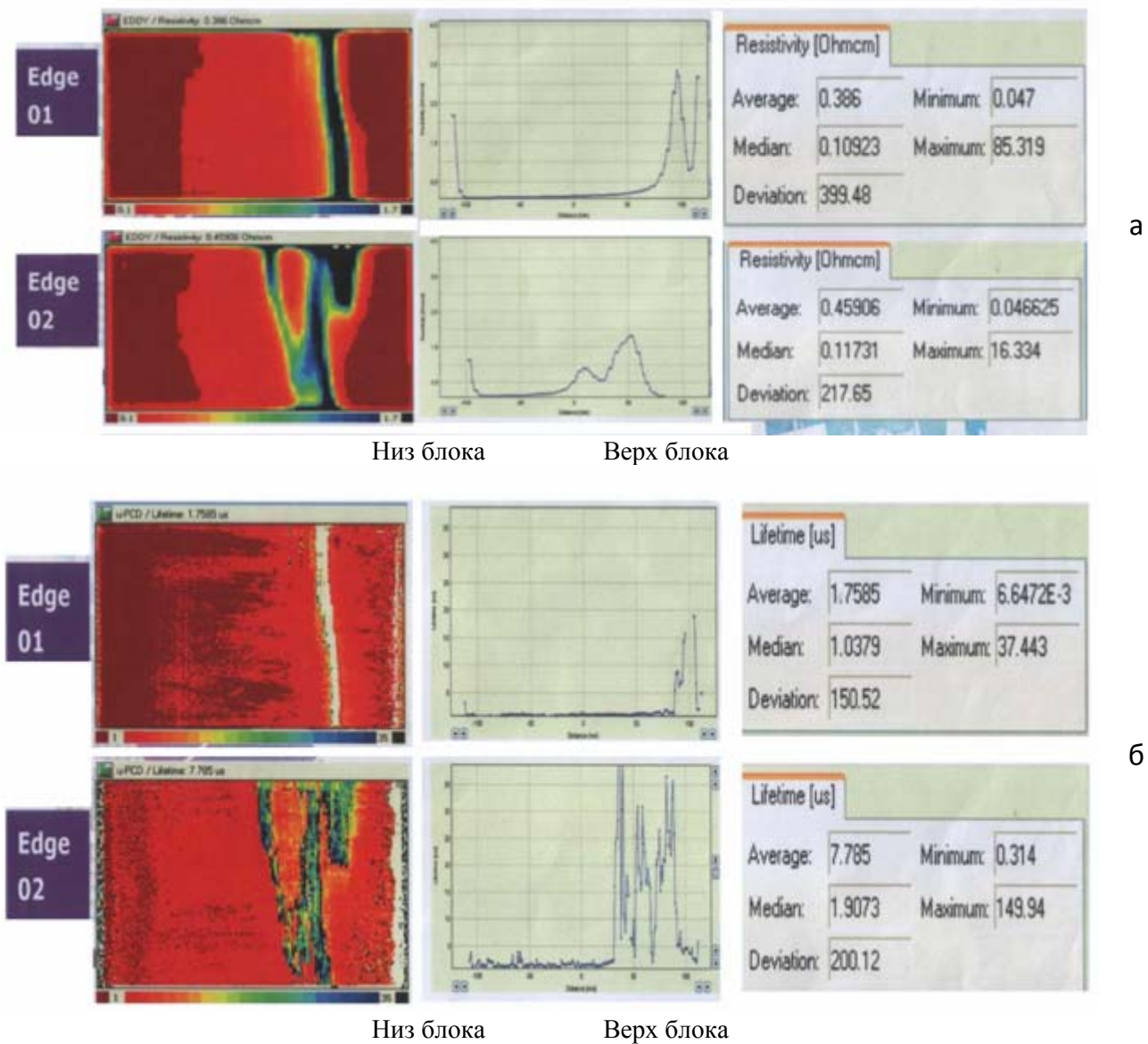
**Таблица 4** – Характеристики слитка мультикристаллического кремния

Параметр (показатель)	Размерность	Численное значение
Масса слитка	кг	400
Высота слитка	мм	240
Поверхность слитка	мм <sup>2</sup>	840
Высота блока	мм	220
Количество блоков в слитке	шт	25
Площадь пластины	мм <sup>2</sup>	156
Толщина пластины	мкм	$200 \pm 20$
Толщина реза	мкм	200
Выход при проволочной резке	%	90
Диффузионная длина	мкм	30...50
Удельное электрическое сопротивление	Ом см	0,5...3,0
Концентрация кислорода	см <sup>-3</sup>	$1 \cdot 10^{18}$
Концентрация углерода	см <sup>-3</sup>	$5 \cdot 10^{17}$
Длительность цикла	ч	50

Мультикремний на основе *UMG-Si* в настоящее время обеспечивает КПД промышленных ФЭП ( $156 \cdot 156$  мм<sup>2</sup>) на уровне 12...14 %, а поликристаллический (технология «Сименс») – 14,5...15,5 %. Наиболее высокий КПД – 16,5 % получен на мультикремнии фирмы «Элкем» (Норвегия) [14] с содержанием примесей: *B* – 0,35; *P* – 0,70; *Fe* < 0,05; *Al* – 0,10; *Ti* – 0,005 ppm<sub>w</sub>.

Использование мультикристаллического кремния признано наиболее целесообразным по соображениям: стоимость – качество. Однако этот материал нуждается в дальнейшем усовершенствовании. Выход годного из одного слитка (240 кг, 16 блоков) в

ряде случаев зафиксирован на уровне 25...30 %. Причины брака – протяженная область *n*-типа в верхней части слитка, малая область *p*-типа с удельным электрическим сопротивлением 0,5...3,0 Ом·см и  $\tau_{\text{низ}} > 8...10$  мкс (рис. 3), наличие включений углерода в виде «линз» карбида кремния (рис. 4), различное расположение, размер кристаллитов для центральных и периферийных блоков и др.



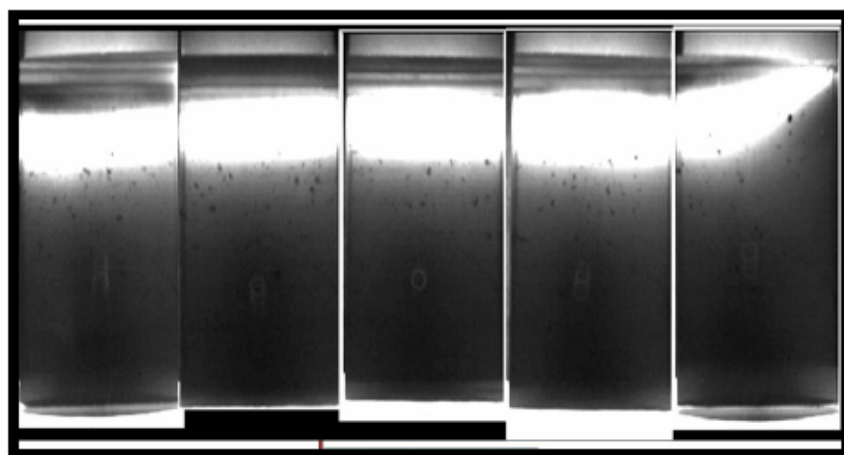
**Рисунок 3** – Распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) (а) и времени жизни неравновесных носителей заряда ( $\tau_{\text{низ}}$ ) (б) по высоте блока мультикремния (масса загрузки 240 кг, 16 блоков)

Нестабильность свойств мультикремния во времени, обусловленная присутствием существенно больших концентраций примесей и структурных дефектов, чем у монокристаллов, также является причиной «деградации характеристик ФЭП, обусловленной светом» (Light induced degradation – LID) [8,9]. Параметр LID с недавнего времени входит в число основных, гарантируемых производителями, качественных параметров кремния «солнечного качества».

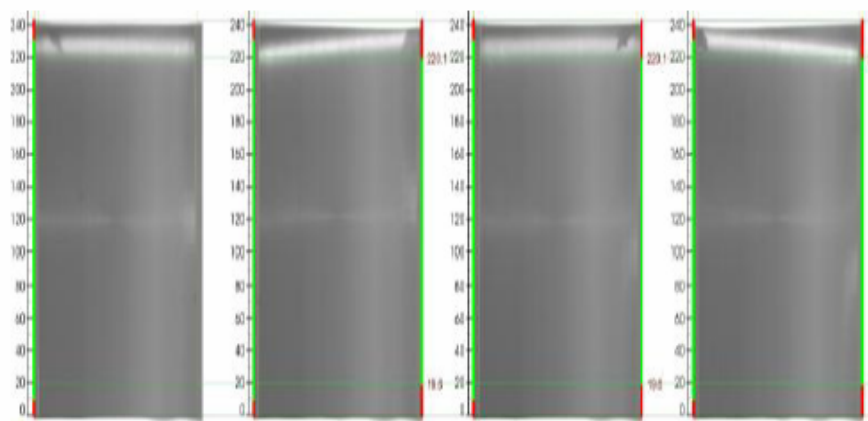
Измерение УЭС и  $\tau_{\text{низ}}$  (рис. 3) произведены соответственно четырехзондовым методом и методом СВЧ-релаксометрии вдоль боковой поверхности блока мультикремния с шагом 5 мм. Сырье – 100 % UMG-Si. Начало измерений (низ блока) соответствует области кристаллизации первых порций расплава.

Большинство аналитиков [16...18] сходятся во мнении, что доля мультикристаллического кремния в технологии наземных ФЭП по мере сближения стоимости электроэнергии, производимой традиционными и альтернативными методами, будет возрастать. Наряду с постоянным совершенствованием технологии и конструкции ФЭП, развитие солнечной энергетики будет сопровождаться и ростом потребления более дешевых сортов кремния, в том числе рафинированного *UMG-Si*.

Актуальными направлениями исследований в ближайшее время будут процессы управления дефектно-примесным взаимодействием в мультикристаллическом кремнии.



Вид верхней части слитка после ИК-сканирования



Вид нижней части слитка после ИК-сканирования  
Количество включений *SiC* существенно меньше,  $R_s \sim 3 \dots 10 \text{ кОм-см}^2$

**Рисунок 4** – Включения *SiC* в объеме слитка мультикремния [9]

Межзеренные границы в мультикремнии, вследствие наличия в их окрестности высокой плотности дислокаций и «примесных облаков» *Fe*, *Mn*, *Cr*, *Ti*, могут обладать рекомбинационной активностью. Это обусловит уменьшение  $\tau_{\text{ннз}}$ , будет снижать скорость движения основных носителей, шунтировать *p-n* переходы [19]. Поэтому «инженерия дефектов» [20,21], подразумевающая использование межзеренных границ и дислокационных сеток внутри кристаллитов для геттерирования фоновых рекомбинационно активных примесей, позволит активно влиять на эффективность ФЭП. Процессы образования геттера могут быть совмещены с операциями диффузии и металлизации, что не повлечет за собой коренных изменений технологического маршрута и условий эксплуатации автоматизированных линий по производству ФЭП.

*Заключение.* Дальнейшие направления рафинирования кремния, предназначенного для использования в изделиях электроники и ФЭП, по-видимому, уже не будут напрямую связаны с методами металлургической очистки. Перспективными могут стать методы геттерирования примесей металлов «оборванными» связями межзеренных границ и дислокаций в мультикремнии [20], методы сложного легирования примесями-геттерами

(например,  $P+B$ ,  $Zr+B$ ,  $N_2+B$ ), легирующими элементами (в частности,  $Ge$ ,  $P+B$ ,  $Ga$ ) [22,23], обеспечивающие повышение времени жизни неравновесных носителей заряда, снижающие либо предотвращающие деградацию характеристик ФЭП при эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колобов Г. А. Рафинирование кремния (Сообщение 1) / Г. А. Колобов, Т. В. Критская // Металургия: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 77-83.
2. Критская Т. В. Рафинирование кремния (Сообщение 2) / Т. В. Критская, Г. А. Колобов // Металургия: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2010. – Вип. 21. – С. 99-104.
3. Березос В. А. Рафинирование кремния способом электронно-лучевой плавки / В. А. Березос, А. Г. Ерохин // Современная электрометаллургия. – 2009. – № 3. – С. 29-31.
4. Поведение и состояние бора в шлаках  $CaO-SiO_2$  при рафинировании кремния для солнечных элементов / L. Teixeira, V. Augusto, Y. Tokuda [ и др.] // ISIJ Int., 2009. – 49. - № 6. – С. 777-782.
5. Металлургический кремний повышенной чистоты для фотоэнергетики / Т. С. Турмагамбетов, Х. А. Абдуллин, Б. Н. Мукашев [ и др.] // Цветные металлы. – 2010. – № 4. – С. 85-88.
6. Василевич В. П. Фторидно-гидридная технология получения гранулированного кремния солнечного качества из вторичного продукта переработки апатита / В. П. Василевич, А. П. Достанко, О. Л. Кайдов // Материалы совещания «Кремний-2004», (5-9 июля 2004 г., г. Иркутск, Россия). – Иркутск: Ин-т геологии СО РАН. – С. 10-17.
7. Воротынец В. М. Технологии производства полупроводникового кремния: мировые тренды и российские перспективы / В. М. Воротынец // VII Международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2010». (6-9 июля 2010 г., г. Н. Новгород, Россия). – Тез. докл. – С. 77.
8. А.с. 327429 СССР, МПК С 30 В 15/00. Способ получения монокристаллов кремния / Бевз В. Е., Данилейко Н. Н., Голубов А. И. [и др.] (СССР), ЗТМК. – № 4533700 / 98-43/26; заявл. 30.07.90.
9. А.с. 330731 СССР, МПК С 30 В 15/00. Устройство для выращивания монокристаллов кремния / Бевз В. Е., Данилейко Н. Н., Войчук Ф. С. [и др.] (СССР), ЗТМК. – № 4533699 / 98-42/26; заявл. 30.07.90.
10. Критская Т. В. Управление свойствами и разработка промышленной технологии монокристаллического кремния для электроники и солнечной энергетики: дис. доктора техн. наук: 05.16.03 / Критская Татьяна Владимировна. – Запорожье. – 2006. – 375 с.
11. Бельский С. С. Совершенствование процессов рафинирования при карботермическом получении кремния высокой чистоты / Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук по спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. С. Бельский. – Иркутск. – 2009. – 16 с.
12. Lee Tae-Yong. PV System Deployment and Industry Development Strategies in Korea // World Green Energy Forum 8 th October, 2008. Korea.
13. Промышленное производство мультикристаллического кремния в России: состояние, проблемы перспективы / Н. А. Потолоков, Н. М. Решетников, И. С. Кутовой [и др.] // VII Международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2010» (6-9 июля 2010 г., г. Н. Новгород, Россия). – Тез. докл. – С. 70.
14. Ulset T. Update on Elkem Solar grade silicon production and application experience / T. Ulset // PHOTON's 8th Solar Silicon Conference April 27, 2010, Stuttgart, Germany.
15. Johnson R. Calisolar : Solar Cells Based on Smart Silicon / R. Johnson // PHOTON's 8th Solar Silicon Conference April 27, 2010, Stuttgart, Germany.
16. Наумов А. В. Рынок солнечной энергетики: кризис и прогнозы / А. В. Наумов // Материалы электронной техники. – 2009. – № 2 (46). – С. 8-12.
17. Наумов А. В. Современное состояние рынка поликремния / А. В. Наумов // VII Международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики



- кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2010» (6-9 июля 2010 г., г. Н. Новгород, Россия). – Тез. докл. – С. 58.
18. Кузнецов Ф. А. Перспективы развития солнечной электроэнергетики. Роль Азии / Ф. А. Кузнецов, М. Ф. Резниченко – Там же. – С. 80.
  19. Metal precipitation and grain boundaries in silicon: Dependence on grain boundary character and dislocation decoration / T. Buonassisi, A. A. Istratov, M. D. Pickett [et al] // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89. – P. 0402102.
  20. Кведер В.В. Инженерия дефектов в кремнии для фотовольтаики / В. В. Кведер // Там же. – Тез. докл. – С. 49.
  21. Gettering in Silicon Photovoltaics: Current State and Future Perspectives / M. Seibt, A. Sattler, C. Rudolf [et al.] // Phys. Stat. Sol. (a). – 2006. – Vol. 203. – P. 696-699.
  22. Быткин С. В. Сравнительный анализ электрофизических параметров монокристаллов кремния, подвергнутых длительному хранению при 300 К / С. В. Быткин, Т. В. Критская / VI Международная конференция и V Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2009» (7-10 июля 2009 г., г. Новосибирск, Россия). – Тез. докл. – С. 54-56.
  23. Критская Т. В. Особенности технологий фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния / Т. В. Критская, Р. Меркер // VII Международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2010» (6-9 июля 2010 г., г. Н. Новгород, Россия). – Тез. докл. – С. 64.

Стаття надійшла до редакції 27.12.2010 р.  
Рецензент, проф. Ю.В. Трубіцин