

## Погрешность определения состава загрузки для роста слитков мультикристаллического кремния

© И.С. Кутовой<sup>1</sup>, И.Н. Радченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Гелио-ресурс», Мытищи, 141000, Россия

<sup>2</sup> КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

*Описана методика и приведены результаты расчета погрешности определения целевой концентрации носителей заряда. Определены основные параметры, которые влияют на погрешность измерения удельного электрического сопротивления на слитке, полученном при использовании описанной в статье загрузки для его роста.*

**Ключевые слова:** мультикристаллический кремний, концентрация носителей заряда, удельное электрическое сопротивление, погрешность.

**Введение.** Мультикристаллический кремний до сих пор остается наиболее распространенным полупроводниковым материалом, используемым при изготовлении фотоэлектрических преобразователей, в том числе солнечных батарей наземного и космического базирования. В связи с этим при росте слитков одним из основных критериев их качества является точность достижения требуемых электрофизических параметров, в частности удельного электрического сопротивления  $\rho$ . Исходя из этого, одной из важнейших является задача определения погрешности вычисления  $\rho$  на этапе подготовки загрузки для роста слитка мультикристаллического кремния с заданными параметрами.

**Методика расчета.** Для снижения затрат в технологическом процессе получения кремниевых пластин применяют как чистый поликристаллический кремний, так и отходы производства «электронного» кремния. Основными компонентами загрузки при этом являются поли-кремний, скрап (тигельные остатки), переплавленные монокристаллы, отходы поликристаллического кремния (поликремниевые стержни с графитовыми электродами), а также возвратные отходы, представленные обрезью предыдущих процессов обработки слитков. Таким образом, загрузка для роста слитков является многокомпонентной, т. е. состоит из нескольких частей исходного кремния  $p$ - и  $n$ -типа проводимости.

В рамках данной статьи принято, что части загрузки  $n$ -типа легированы элементом VA группы (фосфором), а части  $p$ -типа — элементом IIIA группы (бором). После определения состава и массы частей загрузки, поступающих на выращивание, рассчитывают требуемое количество лигатуры, необходимое для достижения заданного значения  $\rho$  в слитке.

Лигатура и компоненты загрузки поступают с измеренными значениями удельного сопротивления, которые для дальнейших расчетов необходимо перевести в концентрации носителей заряда по соответствующим формулам стандарта ASTM F723. Аналогично, исходя из требуемого значения  $\rho$  в готовом слитке, следует определить целевую концентрацию  $C_{\text{цел}}$  носителей заряда.

Массу лигатуры, необходимую для достижения требуемой концентрации  $C_{\text{цел}}$ , рассчитаем по формуле [1]

$$M_{\text{лиг}} = \frac{M_{\text{заг}} C_{\text{цел}} - K_{\text{бор}} \sum_i M_{p_i} C_{p_i} - K_{\text{фос}} \sum_j M_{n_j} C_{n_j}}{C_{\text{лиг}} K_{\text{бор}}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{лиг}}$ ,  $M_{\text{заг}}$  — массы лигатуры и загрузки соответственно, кг;  $C_{\text{цел}}$  — расчетная целевая концентрация носителей заряда, ат/см<sup>3</sup>;  $M_{p_i}$ ,  $M_{n_j}$  — массы частей загрузки кремния  $p$ - и  $n$ -типа проводимости соответственно, кг;  $C_{p_i}$ ,  $C_{n_j}$  — концентрации носителей заряда в частях загрузки кремния  $p$ - и  $n$ -типа проводимости соответственно, ат/см<sup>3</sup>;  $C_{\text{лиг}}$  — концентрация носителей заряда в лигатуре, ат/см<sup>3</sup>;  $K_{\text{бор}}$ ,  $K_{\text{фос}}$  — коэффициенты распределения бора и фосфора в кремнии,  $K_{\text{бор}} = 0,8$ ,  $K_{\text{фос}} = 0,4$ ;  $i, j$  — число компонентов загрузки  $p$ - и  $n$ -типа проводимости соответственно.

Концентрацию  $C_{\text{цел}}$  определим из уравнения (1):

$$C_{\text{лиг}} = \frac{M_{\text{лиг}} C_{\text{лиг}} K_{\text{бор}} + K_{\text{бор}} \sum_i M_{p_i} C_{p_i} - K_{\text{фос}} \sum_j M_{n_j} C_{n_j}}{M_{\text{заг}}}, \quad (2)$$

т. е.

$$C_{\text{цел}} = f(M_{\text{лиг}}, C_{\text{лиг}}, M_{p_i}, C_{p_i}, M_{n_j}, C_{n_j}).$$

Согласно обычной методики вычисления погрешностей, абсолютная погрешность результата вычисления данной функции равна сумме произведений модуля частной производной функции по каждому из параметров и абсолютной погрешности определения этого параметра, т. е.

$$\Delta C_{\text{цел}} = |\Delta_1| + |\Delta_2| + |\Delta_3| + |\Delta_4| + |\Delta_5| + |\Delta_6|. \quad (3)$$

Символьное дифференцирование функции  $C_{\text{цел}}$  вида (2) с учетом многокомпонентности загрузки проведем с помощью программы Mathcad. В результате вычислений были получены выражения для учета вклада погрешностей по каждой переменной:

погрешности взвешивания лигатуры

$$\Delta_1 = \frac{C_{\text{лиг}} K_{\text{бор}}}{M_{\text{заг}}} \Delta_{M_{\text{лиг}}}; \quad (4)$$

погрешности определения концентрации лигатуры

$$\Delta_2 = \frac{M_{\text{лиг}} K_{\text{бор}}}{M_{\text{заг}}} C_{\text{лиг}} \Delta_{C_{\text{лиг}}}; \quad (5)$$

погрешности взвешивания частей загрузки  $p$ - и  $n$ -типа

$$\Delta_3 = \frac{K_{\text{бор}} \sum_i C_{p_i}}{M_{\text{заг}}} \Delta_{M_p} i; \quad (6)$$

$$\Delta_4 = \frac{K_{\text{фос}} \sum_j C_{n_j}}{M_{\text{заг}}} \Delta_{M_n} j;$$

погрешности определения концентраций носителей заряда в загрузках  $p$ - и  $n$ -типа

$$\Delta_5 = \frac{K_{\text{бор}} \sum_i M_{p_i}}{M_{\text{заг}}} \Delta_{C_p} C_{p_{\text{ср}}} i; \quad (7)$$

$$\Delta_6 = \frac{K_{\text{фос}} \sum_i M_{n_i}}{M_{\text{заг}}} \Delta_{C_n} C_{n_{\text{ср}}} j.$$

Здесь  $\Delta_{M_{\text{лиг}}}$  — погрешность взвешивания лигатуры, кг;  $\Delta_{M_n} = \Delta_{M_p}$  — погрешности взвешивания частей загрузки  $p$ - и  $n$ -типов, кг;  $\Delta_{C_p} = \Delta_{C_n} = \Delta_{C_{\text{лиг}}}$  — соответственно погрешности определения концентрации носителей заряда в лигатуре и в загрузках  $p$ - и  $n$ -типа проводимости, %;  $C_{p_{\text{ср}}}$ ,  $C_{n_{\text{ср}}}$  — средневзвешенные концентрации носителей заряда в загрузках  $p$ - и  $n$ -типов проводимости, ат/см<sup>3</sup>,

$$C_{p_{\text{ср}}} = \frac{\sum_i M_{p_i} C_{p_i}}{\sum_i M_{p_i}}; \quad C_{n_{\text{ср}}} = \frac{\sum_j M_{n_j} C_{n_j}}{\sum_j M_{n_j}}.$$

**Расчет погрешности.** Для реального процесса роста мультикристаллического кремния была использована многокомпонентная загрузка, состав которой и данные по концентрации носителей заряда в каждой из частей приведены в табл. 1. Для данного состава загрузки массу лигатуры рассчитывали по формуле (1) из условия получения слитка с  $\rho = 1,7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , что соответствует  $C_{\text{цел}} = 8,247 \cdot 10^{15} \text{ ат/см}^3$ .

## Состав загрузки для роста слитка мультикристаллического кремния

№	Тип проводимости	Масса, кг	Концентрация носителей заряда, ат/см <sup>3</sup>
1	<i>p</i>	80	$3,45 \cdot 10^{15}$
2	<i>p</i>	60	$3,22 \cdot 10^{16}$
3	<i>p</i>	30	$1,84 \cdot 10^{16}$
4	<i>n</i>	80	$1,4 \cdot 10^{14}$
5	<i>n</i>	20	$4,37 \cdot 10^{14}$
6	<i>n</i>	15	$1,13 \cdot 10^{15}$

Для данного состава загрузки масса лигатуры  $M_{\text{лиг}} = 23,09$  г. Погрешность взвешивания лигатуры, определяемая погрешностью прецизионных лабораторных весов,  $\Delta_{M_{\text{лиг}}} = 3 \cdot 10^{-5}$  кг. Погрешность взвешивания частей загрузки *p*- и *n*-типа, определяемая погрешностью весов с большей ценой деления, составила  $\Delta_{M_n} = \Delta_{M_p} = 0,02$  кг. Концентрацию носителей заряда рассчитывали в соответствии с методикой [1] по известным значениям  $\rho$ . Учитывая, что погрешность прибора для измерения удельного электросопротивления не превышала 5 %, а перевод значения  $\rho$  в концентрацию по ASTM F723 давал среднюю ошибку 2,5 %, общая суммарная погрешность составила

$$\Delta_{C_p} = \Delta_{C_n} = \Delta_{C_{\text{лиг}}} = 0,075.$$

С учетом приведенных приборных погрешностей взвешивания и определения концентрации носителей заряда был рассчитан вклад каждого из параметров в общую погрешность определения целевой концентрации. Результаты расчета по формулам (4)–(7) представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Вклад параметров  $M_{\text{лиг}}$ ,  $C_{\text{лиг}}$ ,  $M_{p_i}$ ,  $C_{p_i}$ ,  $M_{n_j}$ ,  $C_{n_j}$  в погрешность определения концентрации  $C_{\text{цел}}$**

Параметр	Погрешность	
	Обозначение	Значение, ат/см <sup>3</sup>
$M_{\text{лиг}}$	$\Delta_1$	$7,166 \cdot 10^{11}$
$C_{\text{лиг}}$	$\Delta_2$	$4,137 \cdot 10^{13}$
$M_{p_i}$	$\Delta_3$	$9,103 \cdot 10^{12}$
$M_{n_j}$	$\Delta_4$	$1,437 \cdot 10^{11}$
$C_{p_i}$	$\Delta_5$	$1,743 \cdot 10^{15}$
$C_{n_j}$	$\Delta_6$	$1,165 \cdot 10^{13}$

Таким образом, абсолютная и относительная погрешности определения целевой концентрации составили:

$$\Delta_{C_{\text{цел}}} = 1,8 \cdot 10^{15} \text{ ат/см}^{-3}; \quad \Delta_{C_{\text{цел}}}/C_{\text{цел}} = 21,9 \text{ \%}.$$

**Заключение.** В результате проведенных вычислений установлено, что при указанном в табл. 1 составе исходной загрузки учет всех вносимых погрешностей может приводить к изменению реальной концентрации  $C_{\text{цел}}$  в пределах  $(8,25 \pm 1,8) \cdot 10^{15} \text{ ат/см}^3$ . При этом реальное значение  $\rho$  при заданном  $\rho = 1,7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  попадает в диапазон значений  $1,44 \dots 2,18 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Как показал проведенный анализ, наибольший вклад в суммарную погрешность вносят погрешности определения концентраций носителей заряда в частях загрузки  $p$ - и  $n$ -типа и лигатуры. Их можно быть существенно уменьшить, обеспечив возможность прямого определения концентрации носителей заряда (без пересчета из удельного электрического сопротивления). Однако в реальных условиях производства мультикристаллического кремния с заданными параметрами представленная в статье методика является наиболее экспрессной и менее затратной.

Результаты измерения удельного электрического сопротивления на слитке мультикристаллического кремния, полученном при использовании данной загрузки, показали хорошее соответствие расчетным данным.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нашельский А.Я. *Производство полупроводниковых материалов*. Москва, Металлургия, 2003.

Статья поступила в редакцию 03.04.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кутовой И.С., Радченко И.Н. Погрешность определения состава загрузки для роста слитков мультикристаллического кремния. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/matsci/1262.html>

**Кутовой Игорь Станиславович** родился в 1957 г., окончил МИСиС в 1980 г. Начальник цеха роста слитков мультикристаллического кремния ООО «Гелио-Ресурс» (МО, г. Мытищи). Область научных интересов: технологии материалов электронной техники (теллурид кадмия, мышьяк, мультикристаллический кремний). e-mail: [rexkis@gmail.com](mailto:rexkis@gmail.com)

**Радченко Ирина Николаевна** родилась в 1961 г., окончила ЛПИ им. М.И. Калинина в 1984 г. Кан. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физическая электроника и физика твердого тела. e-mail: [rin-kf@yandex.ru](mailto:rin-kf@yandex.ru)

## Errors calculation in determining the target carrier density for multicrystalline silicon ingots growth

© I.S. Kutovoy<sup>1</sup>, I.N. Radchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Helio-Resources, Ltd, Moscow Region, Mytishi, 141000, Russia

<sup>2</sup> Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, 248000, Russia

*The article presents a description of methodology and gives the results of the calculation of errors in determining the target concentration of charge carriers. We identified the basic parameters affecting the accuracy of measurements of the electrical resistance at the bar, obtained by using the described in the article downloads for growth ingots.*

**Keywords:** multicrystalline silicon, carrier density, electrical resistivity, error.

### REFERENCES

- [1] Nashelsky A.Ya. *Proizvodstvo poluprovodnikovyykh materialov* [Production of semiconductive materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2003.

**Kutovoy I.S.** (b. 1957) graduated from MISIS in 1980. Foreman of multicrystalline silicon ingots growth of Helio-Resources, Ltd, Moscow region, Mytistchi. Author of several articles on electronic materials technology (cadmium telluride, arsenic, multicrystalline silicon). e-mail: rexxis@gmail.com

**Radchenko I.N.** (b. 1961) graduated from the Leningrad Polytechnic Institute named after M.I. Kalinin. Ph.D. (Phys.&Math.), Assoc. Professor of the Physics Department at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 scientific papers in the areas of electronics and solid-state physics. e-mail: rin-kf@yandex.ru