

05;06;12

©1994 г.

## ОДНОРОДНОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫСОКООМНОГО КРЕМНИЯ *n*-ТИПА ПРОВОДИМОСТИ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ФОТОЯДЕРНОГО ТРАНСМУТАЦИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*В.В.Заблоцкий, Н.А.Иванов, Н.Н.Леонов, В.В.Петренко*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251, Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 29 ноября 1993 г.)

Исследовано распределение удельного сопротивления по поперечному сечению высокоомных монокристаллов кремния *n*-типа проводимости, полученных с помощью метода фотоядерного трансмутационного легирования (ФТЛ) путем компенсации исходной примеси фосфора акцепторной примесью алюминия. Облучение слитков кремния диаметром до 76 мм с удельным сопротивлением от 1 до 2 кОм·см проведено на пучке тормозного излучения линейного ускорителя электронов "Факел". Рассмотрены случаи равномерного и неравномерного по сечению слитков введения трансмутационной примеси. Определены требования к величинам и флуктуациям удельного сопротивления исходного кремния, необходимые для получения ФТЛ кремния с заданной степенью неоднородности. Показано, что применение метода неравномерного облучения, учитывающего систематическое неоднородное распределение удельного сопротивления по сечению монокристаллов исходного кремния, позволяет значительно снизить требования к однородности исходных материалов и обеспечить получение ФТЛ кремния с удельным сопротивлением  $\approx 5$  кОм·см при неоднородности на уровне 10%.

Повышение величины и однородности удельного сопротивления — *p* полупроводникового кремния позволяет значительно улучшить параметры изделий в области СВЧ техники, фотоприемников и детекторов ядерных излучений. Выполнение этого требования зависит от возможности обеспечения надежного контроля введения и объемного распределения в кремнии малых (порядка  $5 \cdot 10^{11}$  атом/см<sup>3</sup>) концентраций легирующих примесей. Для получения высокоомного кремния наряду с совершенствованием технологии зонной очистки [1,2] представляется перспективным развитие метода трансмутационного легирования [3], который не имеет принципиальных ограничений на минимальную величину концентрации атомов вводимых примесей при любых диаметрах монокристаллов.

В работе [4] было показано, что монокристаллы *p*-типа проводимости с  $\rho$  в диапазоне от 10 до 30 кОм·см и с флуктуациями удельного

сопротивления  $\delta\rho$  на уровне, не превышающем 10%, могут быть получены с помощью фотоэверного трансмутационного легирования (ФТЛ) кремния акцепторной примесью алюминия. Установлено также, что применение данного способа для получения высокоомного кремния с электронной проводимостью на основе исходных более низкоомных монокристаллов  $n$ -типа приводит к увеличению неоднородности распределения удельного сопротивления. Целью настоящей работы являлось рассмотрение возможностей улучшения однородности распределения удельного сопротивления в высокоомном ФТЛ кремнии с электронным типом проводимости.

В качестве исходных использовались монокристаллы кремния  $n$ -типа диаметром до 76 мм с удельным сопротивлением в диапазоне от 1 до 2 кОм·см, выращенные методом бестигельной зонной плавки и имеющие кристаллографическую ориентацию  $\langle 111 \rangle$ . Облучение кремния гамма-квантами проводилось на пучке тормозного излучения линейного ускорителя "Факел" Российского научного центра "Курчатовский институт" [4]. Облученные слитки подвергались термообработке в хлорсодержащей среде. Удельное сопротивление слитков измерялось четырехзондовым методом.

На первом этапе было проведено облучение исходного кремния гамма-квантами, неравномерность потока которых по сечению слитков не превышала 3–5%, что приводило к такой же величине неравномерности распределения концентрации образованных атомов алюминия  $\delta N_{Al}$ . В этом случае, который будем называть случаем равномерного облучения при условии независимости пространственных распределений атомов исходной и трансмутационной примесей, величина флуктуации удельного сопротивления в ФТЛ кремнии  $n$ -типа  $\delta\rho_{фтл}$  может быть определена с использованием выражения для дисперсии  $\rho_{фтл}$  как функции случайных величин  $n_{исх}$  и  $\Delta\rho$  [5]

$$\delta\rho_{фтл} = a^{-1} \sqrt{(\delta\rho_{исх})^2 \beta^2 + [\delta(\Delta\rho)]^2 (\beta - \alpha)^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha = \rho_{исх}/\rho_{фтл}$ ;  $\beta = \mu_{фтл}/\mu_{исх}$  — отношения соответственно величин удельного сопротивления и подвижностей электронов в исходном и ФТЛ кремнии;  $n_{исх}$  — концентрация носителей заряда в исходном кремнии;  $\delta(\Delta\rho)$  — неоднородность приращения концентрации дырок  $\Delta\rho$ , образованных в результате трансмутационного легирования.

При выводе формулы (1) полагалось, как и в работе [5], что  $\delta\rho_{исх} = \delta n_{исх}$ .

На рис. 1 представлены профили распределения удельного сопротивления вдоль диаметра исходных слитков и полученных на их основе образцов ФТЛ кремния с различной концентрацией введенной акцепторной примеси алюминия, а также результаты расчета профилей удельного сопротивления для случая равномерного введения акцепторов в исходный кремний. В таблице приведены экспериментальные значения средних величин  $\bar{\rho}$  и флуктуаций  $\delta\rho$  в исходном и ФТЛ кремнии, определенные по результатам измерения профилей распределения удельного сопротивления, и значения  $\delta\rho_{фтл}$ , вычисленные с помощью выражения (1) в предположении  $\beta = 1$  и  $\delta(\Delta\rho) = \delta N_{Al}$ . Для экспериментальных оценок  $\delta\rho$  использовалось относительное среднеквадратичное отклонение.

Параметры исходного и ФТЛ кремния после равномерного (слитки 1 и 2) и неравномерного (слитки 3 и 4) облучений

Номер слитка	Диаметр, мм	Исходный кремний		ФТЛ кремний			
		$\bar{\rho}$ , кОм·см	$\delta\rho, \%$	$\alpha^{-1}$	$\bar{\rho}$ , кОм·см	$\delta\rho, \%$	
						эксперимент	расчет
1 *	26	1.44	4.5	3.9	5.65	19.0	19.7
				6.3	9.0	26.2	32.0
				96.2	138.5**	53.0	-
2	76	2.7	12.1	13.3	35.8	94.0	170.0
3	76	1.01	8.6	4.0	4.02	9.6	-
4	76	2.05	15.1	3.9	8.1	39.0	-

\* Три строки соответствуют разным образцам ФТЛ кремния из слитка 1.

\*\* ФТЛ кремний имел дырочный тип проводимости.

Из таблицы и рис. 1 видно, что при величинах удельного сопротивления в ФТЛ кремнии менее 10 кОм·см экспериментальные значения флуктуаций и их профилей хорошо согласуются с расчетными данными. Видно также, что величины флуктуаций  $\delta\rho$  в ФТЛ кремнии превышают разброс удельного сопротивления в исходных слитках и с увеличением  $\bar{\rho}_{\text{фтл}}$  возрастают приблизительно пропорционально  $\alpha^{-1}$ . Например, при  $\bar{\rho}_{\text{исх}} \approx 1.5$  кОм·см и  $\delta\rho_{\text{исх}} \approx 5\%$  величины флуктуаций в образцах с удельным сопротивлением  $\approx 10$  кОм·см достигают 30%. Наблюдаемый рост  $\delta\rho_{\text{фтл}}$  является характерным следствием увеличения неоднородности удельного сопротивления при повышении степени равномерной компенсации материала [1,3].

Расхождение экспериментальных и расчетных данных при более высоких значениях удельного сопротивления в значительной степени обусловлено возрастанием погрешности расчета величин  $\rho_{\text{фтл}}$  с уменьшением разностной концентрации носителей заряда. Кроме того, при увеличении концентрации вводимого алюминия следует иметь в виду возможность конверсии типа проводимости на участках с наибольшими значениями  $\rho_{\text{исх}}$ , что существенно влияет на профиль распределения  $\rho_{\text{фтл}}$  и также делает некорректным использование выражения (1).

Анализ полученных результатов показывает, что метод ФТЛ позволяет обеспечить надежное введение в кремний акцепторной примеси с концентрациями на уровне  $5 \cdot 10^{11}$  атом/см<sup>3</sup> при неравномерности распределения алюминия по сечению слитков на уровне 3–5%. Для оценок разброса удельного сопротивления при  $\rho_{\text{фтл}} \leq 10$  кОм·см может быть использовано выражение (1). Из этого выражения следует, что для получения ФТЛ кремния с удельным сопротивлением  $\approx 10$  кОм·см и  $\delta\rho \approx 10\%$  исходный кремний с  $\rho_{\text{исх}} \approx 2$  кОм·см должен иметь  $\delta\rho_{\text{исх}} \leq 2\%$ . Отметим, что производство такого материала само по себе является сложной проблемой [1,2] и типичные значения  $\delta\rho$  в монокристаллах диаметром 50–100 мм при  $\rho \approx 1 \div 3$  кОм·см составляют, как правило, не менее 5–10%. Вследствие этого при равномерном облучении гамма-квантами получение высокоомного кремния *n*-типа с

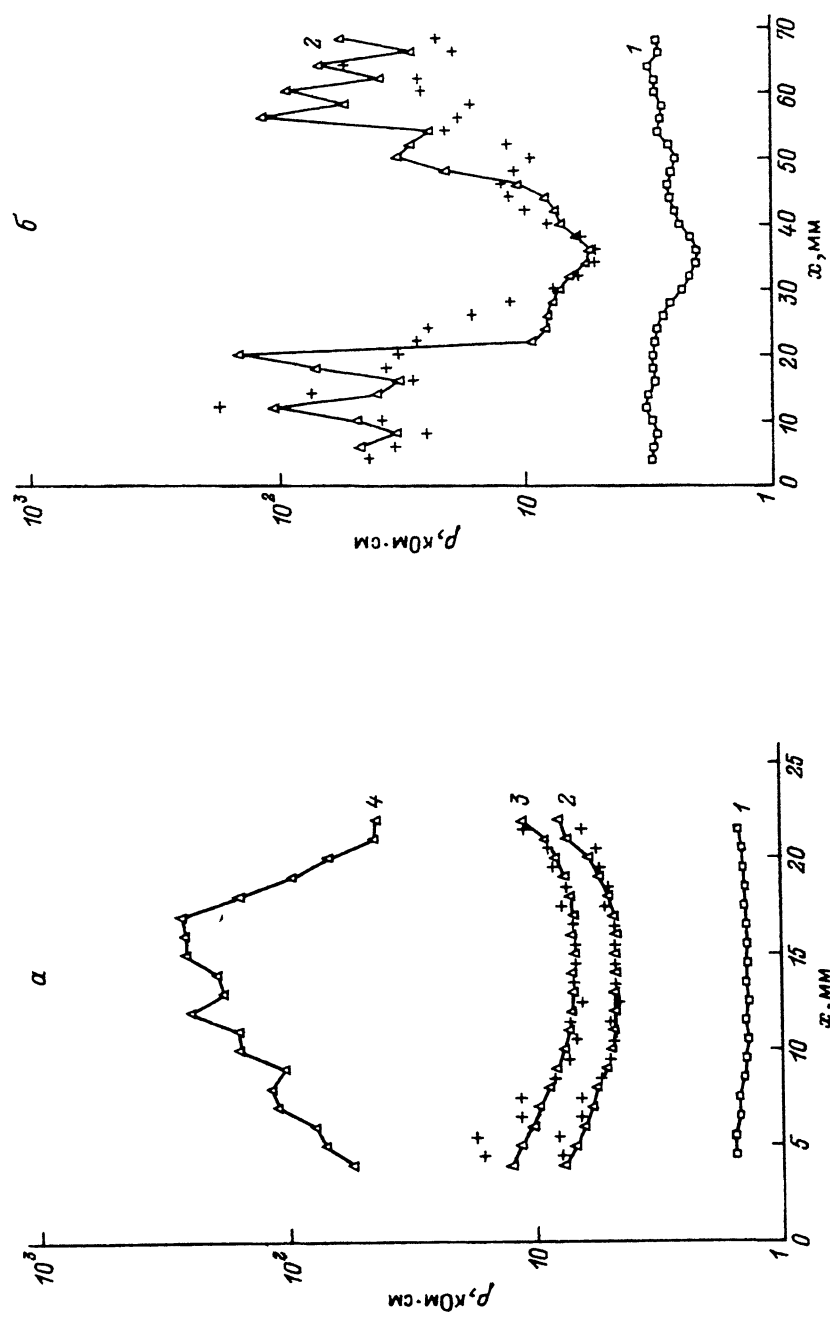


Рис. 1. Профиль распределения удельного сопротивления вдоль диаметра слитков 1 (а) и 2 (б).  
 1 — до облучения, 2-4 — после облучения; + — расчет.

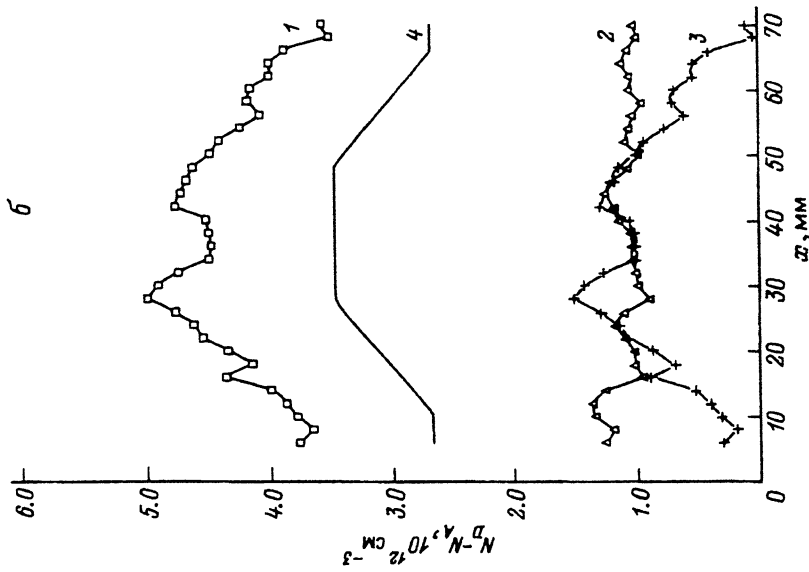
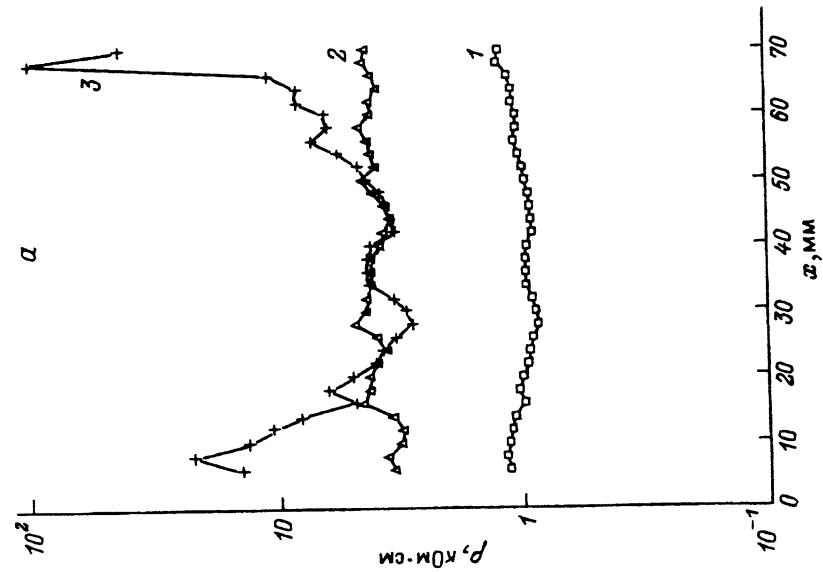
флуктуациями  $\delta\rho \approx 10\%$  возможно лишь при подборе исходных слитков по величинам  $\rho$  и  $\delta\rho$  в соответствии с выражением (1).

Однако представляется возможным существенно снизить требования к однородности исходного кремния вследствие наличия систематической неравномерности в распределении удельного сопротивления по сечению исходных слитков [1,2]. Из приведенных на рис. 1–3 профилей распределений  $\rho$  видно, что значительный вклад в неоднородность удельного сопротивления в исходных монокристаллах вносит различие в величинах  $\rho$  в центре и на краю слитков. С учетом таких систематических неравномерностей было проведено облучение исходного кремния неоднородными потоками гамма-квантов. Радиальный профиль потока гамма-квантов и соответственно радиальное распределение концентрации атомов вводимой примеси алюминия определялись индивидуально для каждого исходного слитка в зависимости от вида радиального профиля распределения концентрации электронов по сечению монокристалла (рис. 2,б и 3,б). Путем неоднородного введения атомов алюминия предполагалось достижение средних значений удельного сопротивления по сечению слитков ФТЛ кремния в диапазоне от 5 до 10 кОм·см.

На рис. 2,а и 3,а представлены экспериментальные профили распределения удельного сопротивления в слитках 3 и 4 (см. таблицу) до и после неравномерного облучения (кривые 1 и 2) и расчетные профили  $\rho_{\text{ФТЛ}}$  для случая равномерного облучения (кривая 3). Соответствующие им профили распределения разностной концентрации носителей заряда приведены на рисунках 2,б и 3,б, где также показаны профили распределения концентрации введенной примеси алюминия (кривая 4). Из этих рисунков следует, что неравномерное облучение по сравнению с равномерным позволяет существенно снизить неоднородность распределения удельного сопротивления в высокоомном ФТЛ кремнии.

Величины флуктуаций удельного сопротивления на уровне 10% в ФТЛ кремнии с удельным сопротивлением  $\approx 5\text{кОм}\cdot\text{см}$  были получены в тех случаях, когда исходные монокристаллы имели плавный и аксиально-симметричный профиль распределения концентрации носителей заряда с абсолютными значениями случайных флуктуаций, значительно меньшими конечной концентрации электронов (рис. 2). В тех случаях, когда исходные слитки не имели хорошей аксиальной симметрии и/или содержали большие случайные флуктуации удельного сопротивления, разброс  $\rho$  в ФТЛ кремнии достигал существенно больших значений (рис. 3). Отметим, что с увеличением удельного сопротивления в ФТЛ кремнии проявляется периодическая с шагом 12–15 мм структура областей с более высокими значениями  $\rho_{\text{ФТЛ}}$ , обусловленная, по всей видимости, стадией выращивания исходных слитков.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что при равномерном облучении гамма-квантами величины флуктуаций удельного сопротивления в ФТЛ кремнии  $n$ -типа проводимости увеличиваются с ростом  $\rho_{\text{ФТЛ}}$  и получение высокоомного кремния с малым разбросом удельного сопротивления на основе слитков с  $\rho_{\text{исх}} \approx 2\text{кОм}\cdot\text{см}$  становится возможным лишь при очень высокой степени однородности исходного кремния ( $\delta\rho_{\text{исх}} \approx 2\%$ ). Применение мето-



**Рис. 2.** Профиль распределения удельного сопротивления (а) и разности концентрации ионизованных примесей ( $\bar{n}$ ) вдоль диаметра слитка 3.  
 1 — до облучения, 2 — после неравномерного облучения, 3 — расчет для случая равномерного облучения, 4 — профиль распределения концентрации введенного алюминия.

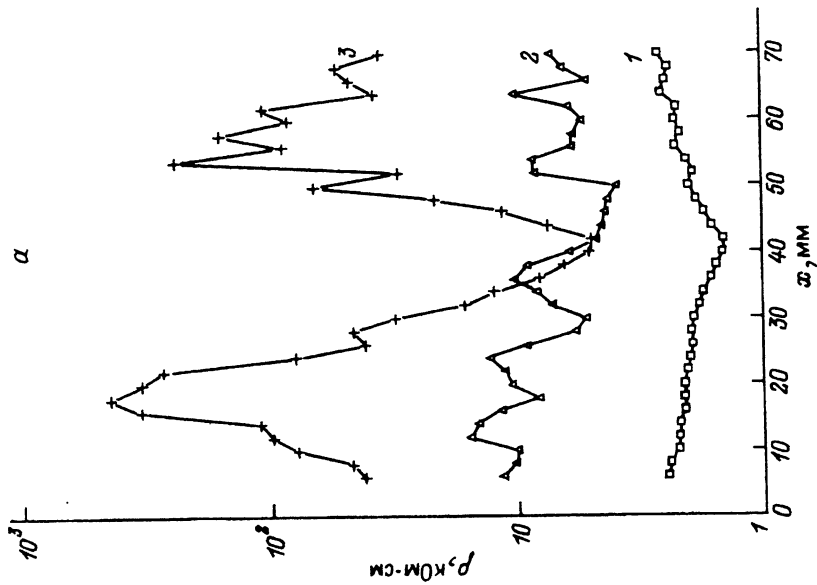
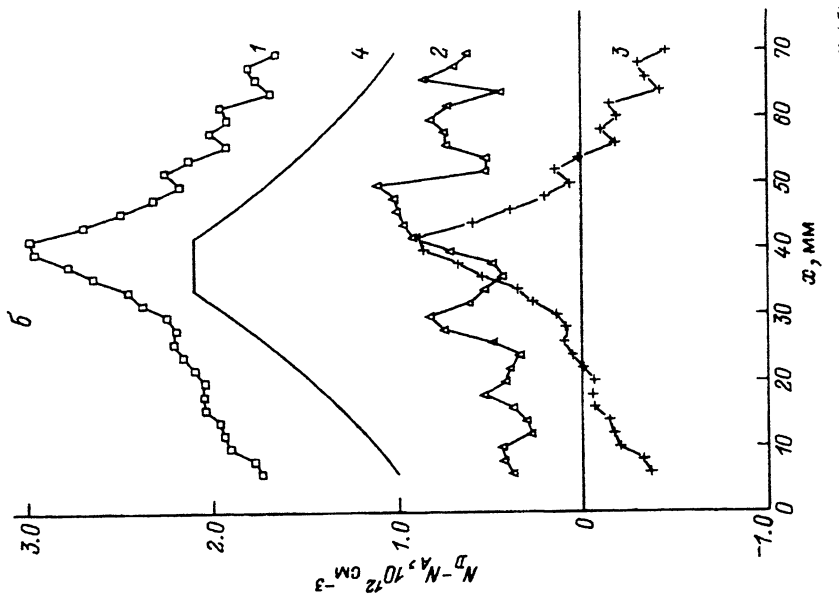


Рис. 3. Профили распределения удельного сопротивления ( $\alpha$ ) и разностной концентрации ионизованных примесей ( $\sigma$ ) вдоль диаметра слитка 4.  
 1-4 — то же, что и на рис. 2.

дики неравномерного облучения и использование в качестве исходных слитков с плавным и аксиально-симметричным профилем радиального распределения удельного сопротивления позволяют существенно снизить требования к однородности исходных материалов и обеспечить получение кремния с удельным сопротивлением  $\approx 5 \text{ кОм}\cdot\text{см}$  и флуктуациями  $\delta\rho$  на уровне 10%.

#### Список литературы

- [1] *Von Ammon W., Herzer H.* // Nucl. Instr and Meth. Phys. Res. 1984. Vol. A226. N 1. P. 94–102.
  - [2] *Dreier P.* // Nucl. Instr and Meth. Phys. Res. 1990. Vol. A288. N 1. P. 272–277.
  - [3] *Смирнов Л.С., Соловьев С.П., Стась В.Ф., Харченко В.А.* Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск, 1981, 182 с.
  - [4] *Заблоцкий В.В., Иванов Н.А., Космач В.Ф. и др.* // Атомная энергия. 1991. Т. 71. № 6. С. 561–563.
  - [5] *Юрова Е.С., Федоров В.В., Морозовец М.А., Гребенникова О.М.* // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 5. С. 933–937.
-