

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В γ -ЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Гринштейн П. М., Гучетль Р. И., Заблоцкий В. В.,
Иванов Н. А., Космач В. Ф., Леонов Н. Н., Петренко В. В.,
Стук А. А., Федоров В. В., Харченко В. А., Юрова Е. С.

Исследованы флуктуации удельного сопротивления в кремнии p -типа проводимости, легированном алюминием методом ядерных реакций под действием γ -квантов при концентрациях вводимых атомов до 10^{14} см $^{-3}$. Для ядерного легирования в качестве исходных использовались промышленные монокристаллы n - и p -типа проводимости диаметром от 30 до 82 мм. Облучение кремния γ -квантами тормозного излучения проводилось на линейном ускорителе электронов «Факал» при максимальной энергии γ -квантов ~ 35 МэВ. С помощью четырехзондового метода и метода сопротивления растекания в точечном контакте были измерены профили распределения величин удельного сопротивления на торцевых поверхностях монокристаллов γ -легированного кремния (ГЛК). Рассмотрена зависимость величин разброса удельного сопротивления ГЛК от типа проводимости исходных материалов и степени легирования. Показано, что методика γ -легирования позволяет получать монокристаллы кремния p -типа проводимости с макро- и микро неоднородностями удельного сопротивления на уровне нескольких процентов.

Одним из перспективных видов излучений для ядерного легирования кремния акцепторной примесью являются γ -кванты с энергиями ~ 20 МэВ [1, 2]. γ -Кванты таких энергий благодаря своей большой проникающей способности и наличию разработанных методов создания протяженных равномерных полей тормозного излучения [3, 4] могут быть использованы для однородного объемного легирования алюминием монокристаллов кремния произвольного диаметра. Настоящая работа посвящена изучению флуктуаций удельного сопротивления ρ в γ -легированном кремнии (ГЛК) с концентрацией введенных атомов алюминия N_{Al} до 10^{14} см $^{-3}$. Целью этих исследований являлось выяснение возможности реализации на базе ускорителей электронов способа γ -легирования для получения кремния p -типа проводимости с повышенной объемной однородностью удельного сопротивления.

Для ядерного легирования в качестве исходных использовались промышленные монокристаллы кремния n - и p -типа проводимости диаметром от 30 до 82 мм, выращенные методом бестигельной зонной плавки в вакууме или аргоне. Облучение тормозными квантами проводилось на ускорителе «Факал» [5] при энергиях электронов 30–35 МэВ и средних токах пучка электронов до 500 мкА с применением конвертора из вольфрама [3]. Равномерность облучения по сечению и длине монокристалла кремния обеспечивалась с помощью стандартных методов формирования полей тормозного излучения, применяемых в медицинской радиологии, радиационной дефектоскопии и химии [3, 4].

Монокристаллы кремния, облученные тормозными квантами, отжигались на установке, предназначенной для термообработки нейтронно-легированного кремния [6] в хлорсодержащей атмосфере. Величина концентраций введенных атомов алюминия принималась равной разности концентраций носителей заряда в γ -легированном и исходном кремнии. Концентрация носителей заряда определялась на установке Холла с постоянным магнитным полем и

постоянным током через образец с автоматизированной системой управления на базе микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28». Профили радиального распределения удельного сопротивления на торцевых поверхностях монокристаллов кремния измерялись четырехзондовым методом с погрешностью $\sim 5\%$. Микро-

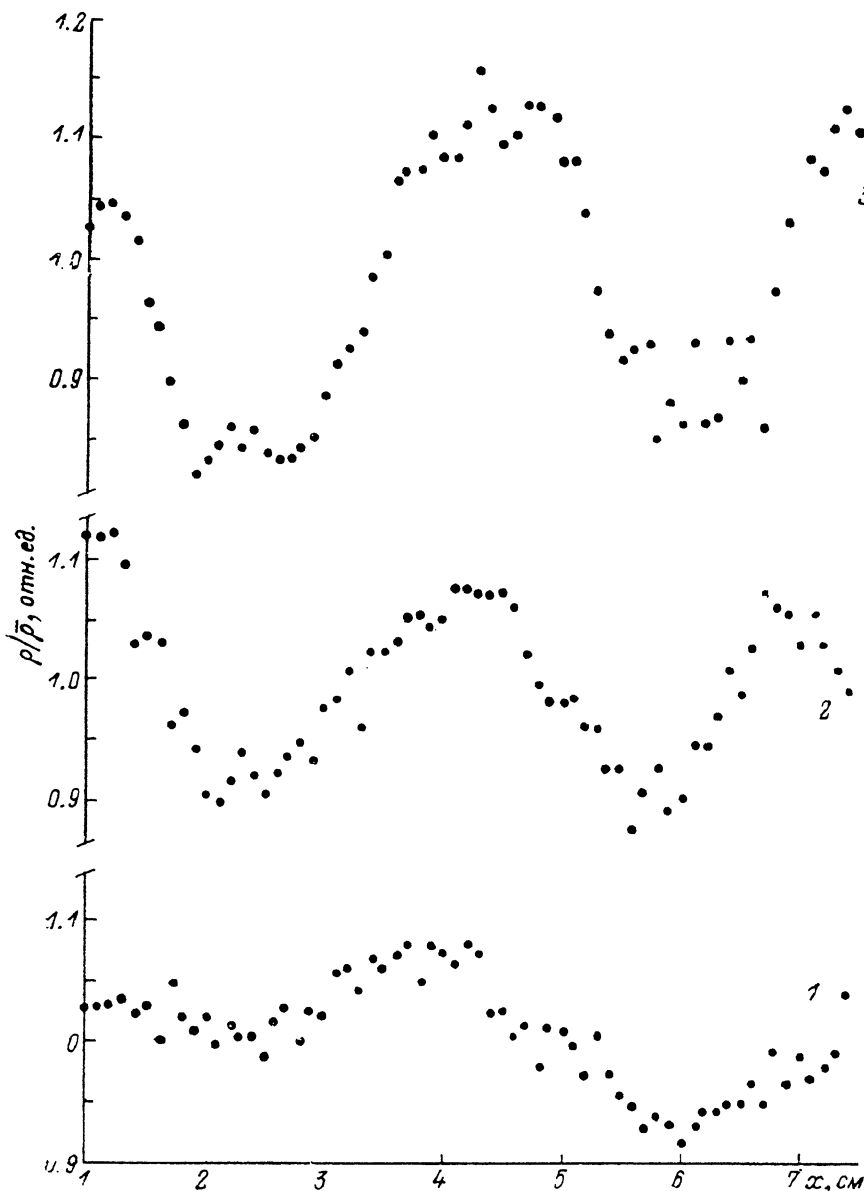


Рис. 1. Радиальные распределения удельного сопротивления в пластинах ГЛК, полученных из одного и того же исходного монокристалла кремния n -типа проводимости при различных значениях степени легирования G .

G : 1 — 3.2, 2 — 2.3, 3 — 1.6; $\bar{\rho}_{ГЛК}$, Ом · см: 1 — 1047, 2 — 1579, 3 — 2800.

распределения ρ определялись на установке ASR-100C методом сопротивления растекания в точечном контакте при размере чувствительной области ~ 10 мкм, точности измерений до 1% и их относительной погрешности $\pm 15\%$ [7, 8]. В качестве экспериментальной оценки величины неоднородности удельного сопротивления $\delta\rho^{\text{эксп}}$ использовалось относительное среднеквадратичное отклонение:

$$\delta\rho_{\text{эксп}} = \frac{1}{\bar{\rho}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\rho_i - \bar{\rho})^2}{N-1}}, \quad \bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i}{N}, \quad (1)$$

где N — число измерений.

Пространственное распределение концентрации носителей заряда по объему полупроводников, легированных методом ядерных реакций, обусловлено пространственным распределением примесей, содержащихся в исходном материале и образованных в результате облучения. Вследствие этого величина неоднородности удельного сопротивления в монокристаллах ГЛК $\delta\rho_{\text{ГЛК}}$ должна зависеть от типа примеси (донорной или акцепторной) и величины флуктуаций ρ в исходном кремнии $\delta\rho_{\text{исх}}$, неравномерности введения атомов алюминия δN_{Al} и степени легирования G , равной отношению концентрации введенных атомов алюминия к концентрации основных носителей заряда в исходном материале. В соответствии с результатами работы [8], в которой исследовались неоднородности распределения удельного сопротивления в нейтронно-легированном кремнии, расчетные значения $\delta\rho_{\text{ГЛК}}^{\text{расч}}$ в ГЛК p -типа проводимости могут быть вычислены с помощью следующих выражений: для исходного кремния p -типа проводимости

$$\delta\rho_{\text{ГЛК}}^{\text{расч}} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{(\delta\rho_{\text{исх}})^2 \beta^2 + (\delta N_{\text{Al}})^2 (\alpha - \beta)^2}, \quad (2a)$$

для исходного кремния n -типа проводимости

$$\delta\rho_{\text{ГЛК}}^{\text{расч}} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{(\delta\rho_{\text{исх}})^2 \beta^2 + (\delta N_{\text{Al}})^2 (\alpha + \gamma)^2}, \quad (2b)$$

где $\beta = \mu_p^{\text{ГЛК}} / \mu_p^{\text{исх}}$, $\gamma = \mu_p^{\text{ГЛК}} / \mu_n^{\text{исх}}$ — отношения подвижностей дырок в ГЛК и основных носителей заряда в исходном кремнии, $\alpha = \rho_{\text{исх}} / \rho_{\text{ГЛК}}$ — отношение величин удельного сопротивления в исходном и γ -легированном кремнии. $\alpha = \beta(G+1)$ в выражении (2a) и $\alpha = \gamma(G-1)$ в выражении (2b).

Величины неоднородностей распределения удельного сопротивления по сечению монокристаллов ГЛК p -типа проводимости

№ слитка	Исходный тип проводимости		$\delta\rho_{\text{исх}} \%$	$\delta N_{\text{Al}} \%$	$\delta\rho_{\text{ГЛК}}^{\text{расч}} \%$	$\delta\rho_{\text{ГЛК}}^{\text{эксп}} \%$	
1	}	p	1.9	4.5	4.5	3.0	2.7
2			2.4	6.4	4.5	3.5	3.7
3			5.3	19.6	4.5	4.7	4.9
4			14.8	28.9	6.0	5.9	6.3
5	}	n	0.1	10.2	6.0	29.2	10.6
6			0.23	15.7	4.3	15.8	7.2
7			1.4	10.3	6.0	7.0	3.4
8			4.2	28.3	6.0	6.4	3.9

В таблице приведены экспериментальные и расчетные значения неоднородностей радиальных распределений ρ по сечению слитков ГЛК p -типа проводимости для различных исходных монокристаллов кремния и разных степеней легирования G . При вычислении $\delta\rho_{\text{ГЛК}}^{\text{расч}}$ значения δN_{Al} принимались равными разбросу величины потока тормозных квантов по сечению облучаемых монокристаллов. Для иллюстрации зависимости величин флуктуаций ρ от степени легирования на рис. 1 представлены радиальные распределения удельного сопротивления на торцевых поверхностях пластин ГЛК из одного и того же исходного монокристалла, облученных различными потоками тормозных квантов. Из таблицы и рис. 1 видно, что с увеличением степени легирования значения $\delta\rho_{\text{ГЛК}}^{\text{расч}}$ уменьшаются приблизительно пропорционально G^{-1} и в случае ис-

ходного кремния p -типа проводимости экспериментальные и расчетные значения $\delta \rho_{\text{ГЛК}}$ близки друг к другу. Для исходных монокристаллов n -типа проводимости $\delta \rho_{\text{ГЛК}}^{\text{эксп}}$ оказываются существенно (в 2—3 раза) меньше расчетных значений $\delta \rho_{\text{ГЛК}}^{\text{расч}}$. Отметим, что такие же различия в экспериментальных и расчетных значениях флуктуаций ρ наблюдаются и при нейтронном трансмутационном легировании исходного кремния p -типа проводимости [8].

Для исследования микрораспределений удельного сопротивления в ГЛК было проведено облучение исходных монокристаллов тормозными квантами без использования методик формирования равномерных полей. В этом случае

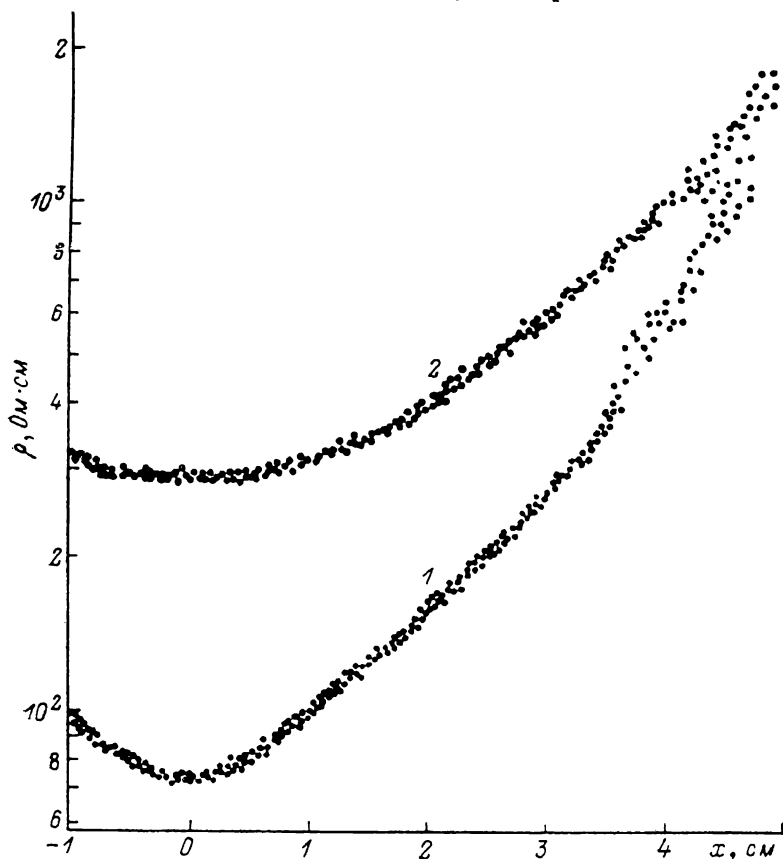


Рис. 2. Профили микрораспределения удельного сопротивления на торцевых поверхностях пластин ГЛК из исходного кремния n - (1) и p -типа (2) проводимости.

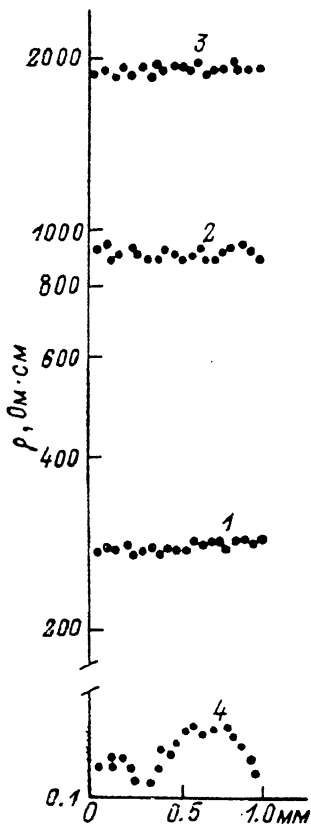
вследствие сильной угловой анизотропии пучка тормозных квантов [3, 4] распределение концентрации введенных атомов алюминия в поперечном сечении монокристалла является существенно неоднородным: максимальные значения N_{Al} достигаются вблизи оси пучка тормозного излучения, и с удалением от этой оси величина N_{Al} резко уменьшается. Благодаря этому в одном сеансе облучения оказывается возможным получение образцов ГЛК с различными степенями легирования из одного и того же исходного монокристалла. На рис. 2 приведены профили микрораспределений удельного сопротивления на торцевых поверхностях пластин ГЛК, ось симметрии которых в процессе облучения совпадала с осью пучка γ -квантов. Из этого рисунка видно, что с уменьшением удельного сопротивления и соответственно с увеличением степени легирования микронеоднородности ρ уменьшаются. Для оценки значений микронеоднородности распределения атомов алюминия были проведены серии однозондовых измерений с шагом 50 мкм вдоль дорожек длиной 1 мм таким образом, чтобы уменьшить влияние неравномерности потока тормозных квантов. Примеры регистрограмм микронеоднородности для различных значений α приве-

дены на рис. 3. Здесь же для сравнения представлена регистрограмма, измененная в бестигельном кремнии с $\rho \approx 0.14$ Ом·см, легированном алюминием обычным металлургическим методом. Из рис. 3 видно, что с ростом степени легирования микронеоднородность ρ уменьшается и при $\alpha \sim 20$ стремится к 1%. По результатам этих измерений с помощью выражения (2а) были вычислены значения микронеоднородности распределения введенных атомов алюминия δN_{Al} , величина которых при уровне значимости 0.05 составила 1.3 ± 0.3 %.

Таким образом, проведенные исследования показали, что радиационная и термическая обработка, применяемая при ядерном легировании с помощью γ -квантов, не приводит к возникновению в ГЛК дополнительных структурных нарушений, ухудшающих однородность распределения величин удельного сопротивления. Методика γ -легирования кремния позволяет путем выбора соответствующих исходных материалов и степени легирования получать монокристаллы кремния p -типа проводимости с макро- и микронеоднородностями удельного сопротивления на уровне нескольких процентов.

Рис. 3. Регистрограммы микронеоднородности удельного сопротивления в ГЛК при различных значениях α (1–3) и в кремнии, легированном алюминием металлургическим методом (4).

α : 1 — 24.1, 2 — 7.7, 3 — 3.5; $\delta\rho$, %: 1 — 1.0, 2 — 1.3, 3 — 1.7, 4 — 8.8.



Список литературы

- [1] Арифов У. А., Синюков В. А., Масагутов В. С., Михаэлян В. М., Коростелев Ю. А., Лютович А. С. // Кристаллизация тонких пленок. Ташкент, 1970. С. 133–135.
- [2] Заблочкий В. В., Иванов Н. А., Космач В. Ф., Леонов Н. Н., Остроумов В. И. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 4. С. 625–628.
- [3] Ковалев В. П. Вторичные излучения ускорителей электронов. М., 1979. 198 с.
- [4] Чепель Л. В. Применение ускорителей электронов в радиационной химии. М., 1975. 145 с.
- [5] Шабалин Е. П. // Атомная энергия. 1982. Т. 52. В. 2. С. 92–100.
- [6] Смирнов Л. С., Соловьев С. П., Стась В. Ф., Харченко В. А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск, 1981. 182 с.
- [7] Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М., 1985. 264 с.
- [8] Юрова Е. С., Федоров В. В., Мороховец М. А., Гребеницкова О. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 5. С. 933–937.

Ленинградский
политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получена 16.12.1988
Принята к печати 20.02.1989