

Электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных ионами иттербия

© О.В. Александров, А.О. Захарьин[¶], Н.А. Соболев*

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 июня 2001 г. Принята к печати 11 июля 2001 г.)

Установлено, что имплантация ионов иттербия с энергией 1 МэВ и дозой 10^{13} см⁻² в кремний и постимплантационный отжиг при температурах 600–1100°C приводят к образованию донорных центров. Концентрация донорных центров выше в образцах, дополнительно имплантированных ионами кислорода. Результаты указывают, что происходит образование по крайней мере двух типов донорных центров, обусловленных примесными атомами иттербия и кислорода. Определена зависимость подвижности электронов от концентрации электрически активных центров в слоях кремния, имплантированных ионами редкоземельной примеси иттербия, в диапазоне концентраций $7 \cdot 10^{15}$ – 10^{17} см⁻³.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к исследованию свойств кремния, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ) [1]. Это обусловлено перспективой применения структур, легированных РЗЭ, в кремниевой оптоэлектронике в качестве источников света. Так, наиболее исследованный РЗЭ эрбий излучает на длине волны 1.54 мкм, соответствующей минимуму потерь и дисперсии волоконно-оптических линий связи, что делает систему Si:Er перспективной для кремниевой оптоэлектроники. В кремнии, легированном гольмием, наблюдались фото- и электролюминесценция на длине волны 1.96 мкм [2,3]. Эффективность люминесценции зависит от спектра оптически и электрически активных центров, содержащих РЗЭ. Однако до сих пор нет ясного понимания процессов их образования. С этой точки зрения изучение электрических свойств Si, легированного разными РЗЭ, является актуальным для установления общих закономерностей процессов образования электрически и оптически активных центров в таких системах. В настоящее время помимо слоев Si:Er [4–6] изучены электрические свойства слоев кремния, легированного гольмием и диспрозием [7], а также имплантированного ионами иттербия и отожженного при температурах $T = 700$ и 900°C [8]. В настоящей работе исследуются электрофизические свойства слоев Si, имплантированных ионами РЗЭ иттербия и отожженных в широком диапазоне температур.

В качестве подложек использовались полированные пластины кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки, n -типа проводимости (n -Fz-Si) с удельным сопротивлением 80–140 Ом·см и методом Чохральского p -типа проводимости (p -Cz-Si) с удельным сопротивлением 20 Ом·см. Концентрация кислорода в исходном материале составляла $< 2 \cdot 10^{16}$ (n -Fz-Si) и $1.1 \cdot 10^{18}$ см⁻³ (p -Cz-Si). Ионы иттербия с энергией 1 МэВ и дозой $Q = 1 \cdot 10^{13}$ см⁻² имплантировались на установке High Voltage Engineering Europe 2КВ. В часть

пластин дополнительно имплантировались ионы кислорода с энергией 135 кэВ дозами $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{14}$ см⁻². Имплантация проводилась под углом 7° относительно поверхности пластин для предотвращения каналирования ионов, при этом температура подложки в процессе имплантации не превышала 50°C . Имплантация не сопровождалась аморфизацией материала. Изохронные отжиги в течение времени 30 мин проводились в диапазоне температур $T = 600$ – 1100°C в хлорсодержащей атмосфере. Концентрационные профили электрически активных центров $n(x)$ определялись методом вольт-фарадных характеристик (ВФХ) барьера Шоттки Hg-Si (ртутный зонд). Слоеое сопротивление R_s измерялось четырехзондовым методом. Измерение подвижности носителей заряда проводилось с помощью измерения эффекта Холла при комнатной температуре с последовательным удалением тонких (~ 0.02 мкм) слоев. Эффективный коэффициент активации электрически активных центров k определялся двумя способами: 1) как отношение количества донорных центров в слое, определяемого интегрированием профиля $n(x)$, к полной дозе имплантации ионов иттербия; 2) как отношение количества донорных центров в n -слое, определяемого из измерения слоеого сопротивления, к полной дозе имплантации ионов иттербия из соотношения $k = (e\mu R_s)^{-1}/Q$, где e — заряд электрона, μ — подвижность электронов ($\mu = 1350$ см²/В·с); этот способ применялся для расчета k после отжига при температурах 600 и 1100°C .

Постимплантационный отжиг слоев Si:Yb в диапазоне температур 600–1100°C приводит к образованию донорных центров, при этом в p -Cz-Si наблюдается p - n -конверсия типа проводимости имплантированного слоя. Ранее в [8] методом эффекта Холла наблюдалось образование донорных центров в слоях Si:Yb после отжига при 700 и 900°C . Концентрационные профили электрически активных центров $n(x)$ в исследуемых в настоящей работе слоях имеют вид кривых с максимумом (рис. 1, a, b). Максимальная концентрация

[¶] E-mail: zaharium@online.ru

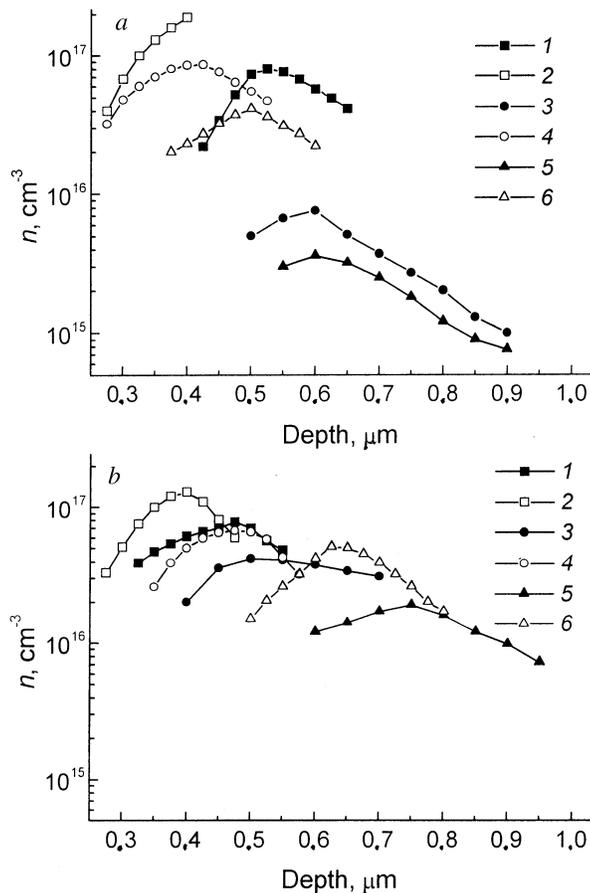


Рис. 1. Концентрационные профили электрически активных центров, измеренные методом ВФХ, после имплантации ионов иттербия (1, 3, 5) или соимплантации ионов иттербия и кислорода (2, 4, 6) в *n-Fz-Si* (a) и *p-Cz-Si* (b) с последующим изохронным отжигом в течение 0.5 ч. Температура отжига, °С: 1, 2 — 700; 3, 4 — 800, 5, 6 — 900.

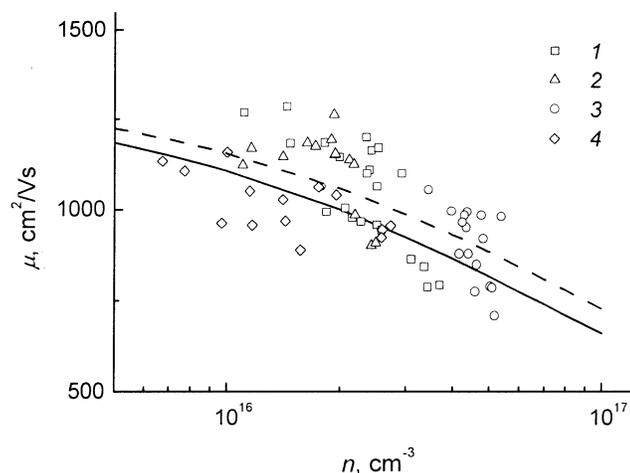


Рис. 2. Зависимость подвижности электронов от концентрации электрически активных центров в слоях кремния, имплантированных ионами иттербия дозой 10^{13} см^{-3} и кислорода дозой, см^{-2} : 1, 2 — 0; 3, 4 — 10^{14} . Температура отжига T , °С: 1, 3 — 700; 2 — 800; 4 — 900. Штриховая линия — Si:Yb, сплошная линия — кремний, легированный основными донорными примесями [9].

наблюдается после отжига при $T = 700^\circ\text{C}$. Увеличение температуры отжига сопровождается уменьшением концентрации введенных центров в максимуме n_{max} и смещением положения максимума x_{max} в глубь образца. При этом в образцах с дополнительно имплантированным кислородом значение n_{max} выше, а x_{max} находится ближе к поверхности во всем исследованном диапазоне температур отжига.

Значения параметров концентрационной зависимости подвижности электронов

Параметр	Si:Yb	Основные донорные примеси в кремнии [9]
$\mu_{\text{min}}, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{см}$	60	65
$\mu_{\text{max}}, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{см}$	1350	1330
$N_{\text{ref}}, \text{ см}^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{17}$	$8.5 \cdot 10^{16}$
α	0.72	0.72

Методом дифференциального эффекта Холла были измерены профили распределения концентрации электрически активных центров $n(x)$ и подвижности электронов $\mu(x)$. Из сопоставления этих данных построены зависимости подвижности электронов от концентрации электрически активных центров в слоях кремния, имплантированных ионами Yb с энергией 1 МэВ и дозой 10^{13} см^{-2} (рис. 2, точки 1, 2), а также дополнительно имплантированных ионами кислорода в разных дозах (рис. 2, точки 3, 4). Концентрационная зависимость подвижности $\mu(n)$ хорошо аппроксимируется формулой, использованной для описания аналогичной зависимости в слоях кремния, легированных основными легирующими примесями, [9]

$$\mu(n) = \mu_{\text{min}} + \frac{\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}}{1 + (n/N_{\text{ref}})^\alpha}$$

Параметры μ_{max} , μ_{min} , N_{ref} и α определялись с использованием метода наименьших квадратов. Найденные значения параметров зависимости для примеси Yb, а также параметры зависимости для основных донорных примесей (P, As, Sb), определенные в работе [9], приведены в таблице. Из рис. 2 и таблицы видно, что концентрационная зависимость подвижности электронов в Si:Yb (штриховая линия) в исследованном диапазоне концентраций ($7 \cdot 10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$) близка к соответствующей зависимости для основных донорных примесей (сплошная линия). Анализ экспериментальных данных показывает, что подвижность электронов практически не зависит от энергетического спектра электрически активных центров, который изменяется при дополнительной имплантации кислорода и варьирования температуры отжига [8]. Это позволяет считать, что, как и в случае основных донорных примесей, подвижность электронов при комнатной температуре в Si:Yb определяется рассеянием на изолированных электрически активных центрах и тепловых колебаниях решетки.

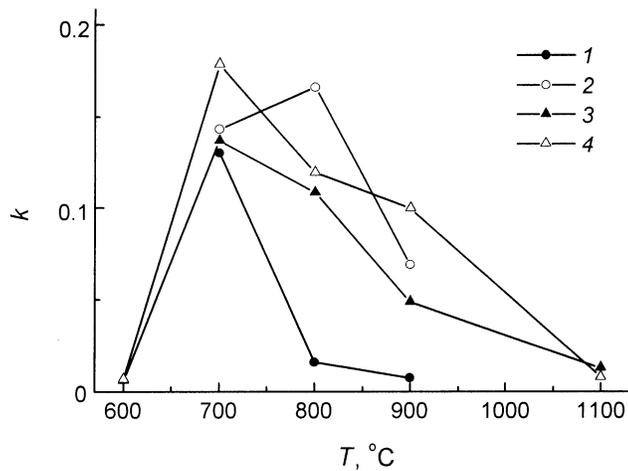


Рис. 3. Зависимости коэффициента активации электрически активных центров от температуры отжига в n -Fz-Si (1, 2) и p -Cz-Si (3, 4) после имплантации ионов иттербия (1, 3) и соимплантации ионов иттербия и кислорода (2, 4).

Зависимости коэффициента активации электрически активных центров k в слоях Si:Yb и Si:Yb:O от температуры изохронного отжига T приведены на рис. 3. Концентрация электрически активных центров в p -Cz-Si выше, чем в n -Fz-Si (см. рис. 3, кривые 1, 3). Максимальные значения k наблюдаются при 700°C и в p -Cz-Si составляют $\sim 14\%$ для Si:Yb и $\sim 18\%$ для Si:Yb:O от полной концентрации введенного иттербия. Дополнительная имплантация ионов кислорода увеличивает концентрацию вводимых электрически активных центров (см. рис. 3, кривые 2, 4).

После отжига при $T = 700^\circ\text{C}$ концентрация донорных центров в n -Fz-Si:Yb в несколько раз превышает концентрацию кислорода в исходном материале (см. рис. 1, а, кривая 1). Это позволяет считать, что доминирующие донорные центры не содержат атомов кислорода, а включают в свой состав атомы PЗЭ. В работе [8] было установлено, что отжиг имплантированных слоев при 700 и 900°C приводит к формированию двух типов центров: кислородные термодоноры и донорные центры, в состав которых входят атомы PЗЭ. Предполагалось, что в образовании кислородных термодоноров наряду с атомами кислорода участвуют собственные точечные дефекты решетки кремния (вакансии и(или) межузельные атомы кремния), возникающие во время отжига имплантационных дефектов. В пользу этого предположения свидетельствуют данные, приведенные на рис. 1 и 3. Повышение концентрации электрически активных центров в p -Cz-Si по сравнению с n -Fz-Si (рис. 3, кривые 1, 3) указывает на участие кислорода в образовании электрически активных центров. Отжиг при одной и той же температуре образцов Si:Yb и Si:Yb:O сопровождается увеличением концентрации введенных электрически активных центров и сдвигом их концентрационного профиля к поверхности при дополнительной импланта-

ции кислорода, что также свидетельствует об участии атомов кислорода в образовании донорных центров. На участие собственных точечных дефектов в образовании донорных центров указывает уменьшение концентрации введенных центров и сдвиг их концентрационного профиля от поверхности образца при увеличении температуры отжига одного и того же образца [5]. Поскольку диффузии атомов PЗЭ в исследованном диапазоне температур отжига не наблюдалось [5, 7], а энергетическое распределение кислородных термодоноров практически не зависело от типа имплантированных ионов Dy, Ho, Er и Yb [8], можно предположить, что атомы примесей PЗЭ не входят в состав кислородных термодоноров.

Таким образом, изучено влияние температуры отжига и примеси кислорода на электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных иттербием. Введение примеси Yb, так же как и других PЗЭ Er, Ho и Dy, сопровождается образованием донорных центров. Установлено, что подвижность электронов практически не зависит от спектра образовавшихся электрически активных центров, а определяется их суммарной концентрацией. Концентрационная зависимость подвижности $\mu(n)$ в слоях кремния, легированных иттербием, близка к соответствующей зависимости в слоях кремния, легированных основными донорными примесями.

Авторы выражают благодарность Е.О. Паршину, Р.В. Таракановой и Е.И. Шек за помощь в подготовке образцов.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 99-02-17750), INTAS (грант 99-01872) и РФФИ-БНТС Австрии (грант 01-02-02000 БНТС-а).

Список литературы

- [1] Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [2] Б.А. Андреев, Н.А. Соболев, Д.И. Курицын, М.И. Маковийчук, Ю.А. Николаев, Е.О. Паршин. ФТП, **33**, 420 (1999).
- [3] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. ФТП, **33**, 931 (1999).
- [4] F. Priolo, S. Coffa, G. Franzo, C. Spinella, V. Bellani. J. Appl. Phys., **74**, 4936 (1993).
- [5] О.В. Александров, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, А.В. Меркулов. ФТП, **30**, 876 (1996).
- [6] N.A. Sobolev, O.V. Alexandrov, E.I. Shek. MRS Symp. Proc., **442**, 237 (1997).
- [7] О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин. ФТП, **32**, 1029 (1998).
- [8] В.В. Емцев, В.В. Емцев (мл.), Д.С. Полоскин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, Й. Михель, Л.С. Киммерлинг. ФТП, **33**, 649 (1999).
- [9] D.M. Caughey, R.E. Thomas. Proc. IEEE, **55**, 2192 (1967).

Редактор Л.В. Шаронова

Electrophysical properties of silicon layers implanted with ytterbium ions

O.V. Alexandrov, A.O. Zakhar'in, N.A. Sobolev*

State Electrotechnical University,
197376 St.Petersburg, Russia

*Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract It has been established that the implantation of Er into silicon at an energy of 1 MeV and a dose of 10^{13} cm^{-2} , and subsequent annealing over the temperature range 600–1100°C result in formation of donor centers. The donor center concentration is higher in samples that were additionally implanted with oxygen ions. It has been shown that there are at least two types of donor centers associated with ytterbium and oxygen atoms. The dependence of the electron mobility on the electrically active center concentration is found for concentrations between $7 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in silicon layers implanted with ytterbium ions.