

Электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных ионами эрбия и кислорода в широком диапазоне доз и термообработанных в различных температурных режимах

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

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

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

(Получена 4 сентября 2001 г. Принята к печати 18 сентября 2001 г.)

Исследованы электрофизические свойства кремния, имплантированного ионами эрбия и кислорода в широком диапазоне доз. Определена зависимость подвижности электронов от концентрации электрически активных центров в слоях кремния, легированного эрбием в диапазоне концентраций $9 \cdot 10^{15} - 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При дозах имплантации ионов эрбия, превышающих пороговую дозу аморфизации, на концентрационных профилях распределения электрически активных центров $n(x)$ и атомов эрбия $C(x)$ наблюдаются изломы, связанные с особенностями процесса сегрегации Er при твердофазной эпитаксиальной перекристаллизации. Вблизи поверхности профили $n(x)$ и $C(x)$ практически совпадают. При дозах имплантации ионов эрбия выше порога аморфизации наблюдается линейный рост максимальной концентрации электрически активных центров при примерно постоянном эффективном коэффициенте их активации k . При концентрации эрбия свыше $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ происходит насыщение концентрации вводимых электрически активных центров и падение k .

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию свойств кремния, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ), в частности эрбием, а также структур на его основе (Si:Er), что вызвано перспективой их применения в кремниевой оптоэлектронике (см. обзоры [1,2]). Для производства светоизлучающих приборов на основе Si:Er необходимо повышать концентрацию оптически активных центров, концентрация которых коррелирует с концентрацией электрически активных центров [3,4]. Одним из путей повышения концентрации оптически и электрически активных центров является увеличение дозы имплантируемых ионов Er. Однако при дозах выше порога аморфизации Si наблюдается уменьшение концентрации электрически и оптически активных центров [5]. Это явление может быть связано с образованием эрбиевых преципитатов [6]. Пороговая концентрация эрбия, при которой начинается преципитация, составляет $1.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при температуре отжига 900°C [6]. Для повышения концентрации активных центров используется совместная с эрбием имплантация ионов кислорода. Закономерности активации электрически и оптически активных центров при имплантации ионов эрбия и кислорода исследовались в работах [3,7], при этом порог аморфизации не превышался вследствие либо использования малых доз [7], либо подогрева подложки [3]. В работе [8] было показано, что совместная имплантация ионов кислорода и эрбия позволяет повысить концентрацию электрически активных центров и при превышении порога аморфизации.

С целью выявления особенностей, связанных с аморфизацией, в настоящей работе исследуются электрофизические свойства слоев кремния, имплантированных совместно ионами эрбия и кислорода с дозами ниже и выше порога аморфизации.

Условия эксперимента

Совместная имплантация ионов эрбия с энергиями 0.5 или 1 МэВ и ионов кислорода с энергиями 70 или 135 кэВ соответственно проводилась при комнатной температуре в пластины кремния, легированного бором с удельным сопротивлением $7.5 - 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ориентации (100). Доза ионов эрбия $Q(\text{Er})$ варьировалась в диапазоне от $1 \cdot 10^{13}$ до $3.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, доза ионов кислорода превышала дозу ионов эрбия на порядок. Отжиг неаморфизованных имплантированных слоев кремния ($Q(\text{Er}) < 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) проводился в одну стадию в диапазоне температур $700 - 900^\circ\text{C}$ в хлорсодержащей атмосфере. Отжиг аморфизованных слоев ($Q(\text{Er}) \geq 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) проводился в две стадии: при 620°C в течение 1 ч для перекристаллизации аморфизованного слоя и при 900°C в течение 0.5 ч для формирования донорных центров. Распределение примеси Er по глубине определялось методом вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС) на установке Camera IMS 4f. Измерение концентрации и подвижности носителей заряда проводилось с помощью дифференциального эффекта Холла при комнатной температуре при последовательном удалении тонких ($\sim 0.02 \text{ мкм}$) слоев кремния. Профили распределений концентрации донорных центров по глубине определялись методом дифференциальной проводимости. Эффективный коэффициент активации электрически активных центров k рассчиты-

[¶] E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

вался как отношение количества донорных центров в слое, определяемое интегрированием профиля $n(x)$, к полной дозе имплантации ионов эрбия.

Экспериментальные результаты

В результате отжига в слоях кремния, имплантированных совместно ионами Er⁺ и O⁺, образуются донорные центры. Методом дифференциального эффекта Холла были измерены распределения электрически активных центров $n(x)$ и подвижности электронов $\mu(x)$ по глубине. Из сравнения профилей $n(x)$ и $\mu(x)$ были построены зависимости подвижности электронов от концентрации электрически активных центров (рис. 1). Используя метод наименьших квадратов, определена концентрационная зависимость подвижности электронов $\mu_{Er}(n)$ (рис. 1, штриховая линия), описывающая экспериментально определенные значения со среднеквадратичным отклонением $\pm 10\%$:

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

Найденные значения параметров μ_{\max} , μ_{\min} , N_{ref} и α зависимости $\mu_{Er}(n)$, а также параметры зависимости для примеси Yb $\mu_{Yb}(n)$ [9] и для основных донорных примесей (P, As, Sb) $\mu_{don}(n)$ [10] приведены в таблице. Из таблицы и рис. 1 видно, что определенная зависимость $\mu_{Er}(n)$ практически совпадает с известными эмпирическими зависимостями $\mu_{Yb}(n)$ (штрихпунктирная линия) и $\mu_{don}(n)$ (сплошная линия). В работах [11,12] было показано, что варьирование дозы имплантации ионов кислорода и температуры отжига сопровождается изменением спектра электрически активных центров в слоях Si, имплантированного ионами Er. Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных в настоящей работе и [11,12], показывает, что подвижность электронов в слоях Si, легированных Er, практически не зависит от энергетического спектра электрически активных центров.

На рис. 2 представлены профили распределения концентрации атомов эрбия $C(x)$ и электрически активных центров $n(x)$ после отжига слоев, имплантированных ионами эрбия с дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (кривые 1, 3) и ионами эрбия с дозой $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (кривые 2, 4) совместно с ионами кислорода. При дозах меньше порога

Значения параметров концентрационной зависимости подвижности электронов

Параметр	Si:Er	Si:Yb [9]	Основные донорные примеси в кремнии [10]
μ_{\min}	65	60	65
μ_{\max}	1320	1350	1330
N_{ref}	$1.06 \cdot 10^{17}$	$1.1 \cdot 10^{17}$	$8.5 \cdot 10^{16}$
α	0.87	0.72	0.72

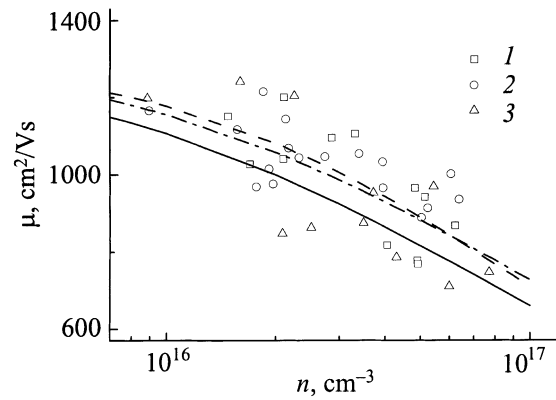


Рис. 1. Зависимость подвижности электронов от концентрации электрически активных центров в слоях кремния, имплантированных ионами эрбия с энергией 1 МэВ и кислорода с энергией 0.135 МэВ. Доза ионов эрбия — 10^{13} см^{-2} , доза ионов кислорода, см^{-2} : 1 — 10^{13} ; 2, 3 — $5 \cdot 10^{13}$. Температура отжига, °С: 1, 2 — 800; 3 — 900. Штриховая линия — найденная в настоящей работе зависимость $\mu_{Er}(n)$, штрихпунктирная линия — зависимость $\mu_{Yb}(n)$ из [9], сплошная линия — зависимость $\mu_{don}(n)$ из [10].

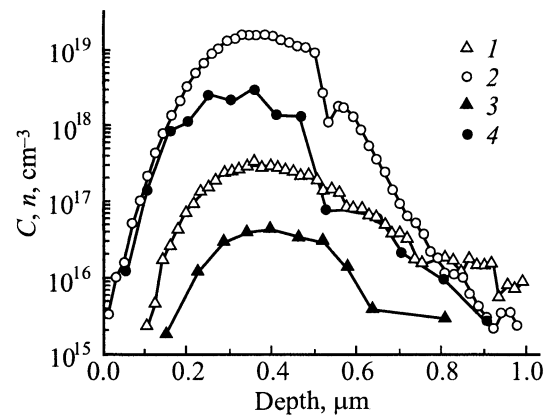


Рис. 2. Концентрационные профили атомов эрбия (1, 2) и электрически активных центров (3, 4) при имплантации ионов эрбия с энергией 1 МэВ и кислорода с энергией 0.135 МэВ. Доза ионов эрбия, см^{-2} : 1, 3 — 10^{13} ; 2, 4 — $4 \cdot 10^{14}$; доза ионов кислорода, см^{-2} : 1, 3 — 10^{14} ; 2, 4 — $4 \cdot 10^{15}$.

аморфизации по всей толщине имплантированного слоя концентрация электрически активных центров меньше концентрации введенных атомов Er. При превышении порога аморфизации ($Q(\text{Er}) \geq 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) на глубинах, больших 0.15 мкм, концентрация электрически активных центров также ниже концентрации введенных атомов эрбия. Кроме того, имеют место две особенности: на профилях $C(x)$ и $n(x)$ наблюдаются изломы на глубине, соответствующей первоначальной границе раздела аморфизованного и монокристаллического Si (рис. 2, кривые 2, 4), а вблизи поверхности профили $C(x)$ и $n(x)$ практически совпадают.

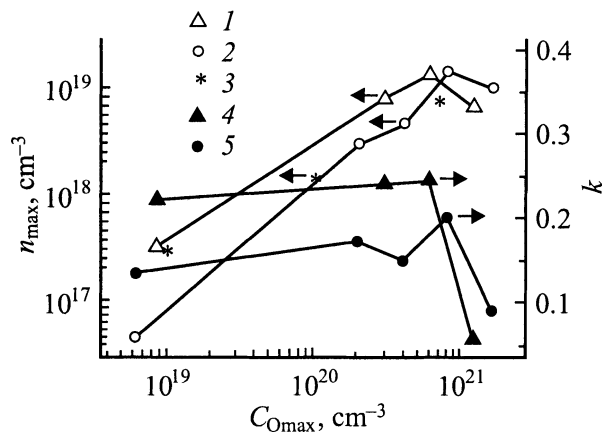


Рис. 3. Зависимость максимальной концентрации электрически активных центров (1–3) и эффективного коэффициента их активации (4–5) от концентрации имплантированного кислорода в максимуме концентрационного профиля. Энергия ионов эрбия, МэВ: 1, 4 — 0,5; 2, 5 — 1; 3 — 5 (3 — данные работы [3]).

Зависимости концентрации электрически активных центров в максимуме их распределений и эффективного коэффициента их активации от концентрации имплантированных ионов кислорода приведены на рис. 3. С увеличением доз имплантации ионов эрбия и кислорода концентрация в максимуме электрически активных центров n_{\max} растет примерно линейно до значений $\sim 1.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при обеих энергиях имплантации ионов эрбия 0,5 и 1 МэВ (рис. 3, кривые 1, 2 соответственно). На участке роста n_{\max} эффективный коэффициент активации электрически активных центров практически не меняется и составляет $k \approx 0.25$ и ≈ 0.17 при энергиях имплантированных ионов эрбия 0,5 и 1 МэВ соответственно (рис. 3, кривые 4, 5). При концентрации атомов кислорода в максимуме $C_{O \max}$ свыше $6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и соответствующей концентрации атомов эрбия в максимуме $C_{Er \max}$ свыше $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдается насыщение значений n_{\max} и резкое уменьшение значений коэффициента активации.

Обсуждение экспериментальных результатов

Одинаковые в пределах экспериментальной погрешности зависимости подвижности электронов от концентрации электрически активных центров в слоях Si, легированного Er, Yb и основными донорными примесями (см. рис. 1), объясняются, по-видимому, одинаковым механизмом рассеяния электронов в таких слоях — на ионизированных центрах и акустических фононах [13].

Появление излома на профилях $C(x)$ и $n(x)$ при дозах имплантации ионов Er, превышающих порог аморфизации, обусловлено особенностями процесса сегрегации

примеси Er на границе аморфный–монокристаллический кремний, когда на начальном этапе твердофазной эпитаксиальной перекристаллизации происходит накопление примеси Er вдвигающемся к поверхности переходном слое [14]. Этот же процесс способствует увеличению коэффициента активации электрически активных центров в приповерхностном слое (сближению профилей $C(x)$ и $n(x)$ на рис. 2, кривые 2, 4). По-видимому, имеет место постепенное накопление в переходном слое по мере его продвижения к поверхности собственных точечных дефектов, входящих в состав донорных центров (предположительно, собственных межузельных атомов кремния [15]). Возможное влияние оказывает пространственное разделение вакансий и собственных межузельных атомов при ионной имплантации. Согласно расчетам, проведенным в работе [16], при имплантации тяжелых ионов вакансии располагаются преимущественно вблизи поверхности, тогда как собственные межузельные атомы — преимущественно в объеме вблизи максимума распределения примеси. Накопление собственных точечных дефектов на движущейся межфазной границе позволяет объяснить высокий (до 0,8) коэффициент активации электрически активных центров, наблюдавшийся в [8] при кристаллизации толстых ($\sim 2.3 \text{ мкм}$) аморфизованных слоев кремния, полученных с помощью набора энергий и доз кислорода и эрбия при соотношении их концентраций 10:1.

Рост концентрации электрически активных центров с увеличением доз вводимых ионов эрбия и кислорода обусловлен образованием нескольких эрбий- и кислородсодержащих донорных центров [7, 11, 12]. Линейный рост с насыщением значений n_{\max} с увеличением дозы вводимого кислорода наблюдался ранее в отсутствие аморфизации кремния в работе [3]. Значения n_{\max} , полученные в работе [3] при соотношении концентраций примесей кислорода и эрбия 5–10 (точки 3 на рис. 3), близки к соответствующим значениям n_{\max} , полученным в настоящей работе при близком соотношении концентраций кислорода и эрбия (7–8). Из рис. 3 (кривые 1, 2) видно, что линейный характер роста сохраняется и в условиях превышения порога аморфизации вплоть до концентрации электрически активных центров $\sim 1.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при концентрации атомов кислорода в максимуме профиля $\sim 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и соответствующей концентрации атомов эрбия в максимуме $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В работе [3] была достигнута несколько большая концентрация электрически активных центров $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при более высоком соотношении между концентрациями примесей кислорода и эрбия (~ 40). Уменьшение n_{\max} при дальнейшем увеличении концентрации кислорода (рис. 3) можно связать с началом процесса преципитации примеси кислорода, концентрация которого превышает равновесную растворимость примерно на 3 порядка, а коэффициент диффузии достаточно велик ($D(O) \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$ при 900°C [17]).

Заключение

Установлено, что концентрационная зависимость подвижности электронов в имплантированных ионами эрбия и кислорода слоях практически совпадает с аналогичными зависимостями для кремния, легированного как редкоземельным элементом иттербием, так и основными донорными примесями. При этом подвижность не зависит от энергетического спектра электрически активных центров. При дозах имплантации ионов Er и O выше порога аморфизации на профилях распределения донорных центров $n(x)$ и эрбия $C(x)$ наблюдаются изломы, связанные с сегрегацией Er на границе аморфизованной–монокристаллический кремний при твердофазной эпитаксиальной перекристаллизации, а вблизи поверхности профили носителей $n(x)$ и примеси $C(x)$ практически совпадают. С повышением доз имплантации ионов Er и O свыше порога аморфизации наблюдается линейный рост концентрации донорных центров в максимуме концентрационного профиля вплоть до $1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, при примерно постоянном коэффициенте активации электрически активных центров, $k \approx 0.25$ и ≈ 0.17 при энергиях имплантации ионов эрбия 0.5 и 1 МэВ соответственно. При концентрациях атомов кислорода свыше $6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и эрбия свыше $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдается насыщение максимальной концентрации донорных центров и падение коэффициента активации.

Авторы выражают благодарность Е.О. Паршину, Р.В. Таракановой и А.В. Шестакову за помощь в подготовке образцов и Ю.А. Кудрявцеву за ВИМС измерения.

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] J. Michel, L.V.C. Assali, M.T. Morse, L.C. Kimerling. *Semiconductors and Semimetals* (San Diego, Academic Press, 1998) v. 49, 111.
- [3] F. Priolo, S. Coffa, G. Franzo, C. Spinella, A. Carnera, V. Bellani. *J. Appl. Phys.*, **74**, 4936 (1993).
- [4] J. Michel, J. Palm, X. Duan, E. Quелlette, S.F. Nelson, S.H. Ahm, L.C. Kimerling. *Mater. Sci. Forum.*, **258–263**, 1485 (1997).
- [5] J.L. Benton, J. Michel, L.C. Kimerling, D.C. Jacobson, Y.-H. Xie, D.S. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, J.M. Poate. *J. Appl. Phys.*, **70**, 2667 (1991).
- [6] D.J. Eaglesham, J. Michel, E.A. Fitzgerald, D.C. Jacobson, J.M. Poate, J.L. Benton, A. Polman, Y.-H. Xie, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2797 (1991).
- [7] О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек. *Изв. ГЭТУ*, **516**, 48 (1998).
- [8] S. Coffa, F. Priolo, G. Franzo, V. Bellani, A. Carnera, C. Spinella. *Phys. Rev. B*, **48**, 11 782 (1993).
- [9] О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев. ФТП, **36**, 134 (2002).
- [10] D.M. Caughey, R.E. Thomas. *Proc. IEEE*, **55**, 2192 (1967).
- [11] В.В. Емцев, В.В. Емцев (мл.), Д.С. Полоскин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, J. Michel, L.C. Kimerling. ФТП, **33**, 649 (1999).
- [12] V.V. Emtsev, V.V. Emtsev, Jr., D.S. Poloskin, E.I. Shek, N.A. Sobolev, J. Michel, L.C. Kimerling. ФТП, **33**, 1192 (1999).
- [13] G. Kaiblinger-Grujin, H. Kosina, S. Selberherr. *J. Appl. Phys.*, **83**, 3096 (1998).
- [14] О.В. Александров, Ю.А. Николаев, Н.А. Соболев. ФТП, **33**, 114 (1999).
- [15] О.В. Александров, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, А.В. Меркулов. ФТП, **30**, 876 (1996).
- [16] L. Pelaz, G.H. Gilmer, M. Jaraiz, S.B. Herner, H.-J. Gossmann, D.J. Eaglesham, G. Hobler, C.S. Rafferty, J. Barbolla. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1421 (1998).
- [17] R.A. Devine, D. Mathiot, W.L. Warren, B. Asper. *J. Appl. Phys.*, **79**, 2302 (1996).

Редактор Л.В. Беляков

Electrophysical properties of silicon layers implanted with erbium and oxygen ions over a wide dose range and treated with different temperature regimes

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

State Electrotechnical University,
197376 St.Petersburg, Russia
* A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract The electrophysical properties of silicon implanted with erbium and oxygen ions over a wide dose range have been studied. The mobility dependence on the electrically active center concentration has been obtained in erbium-doped silicon with a concentration varied over $9 \cdot 10^{15} - 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ range. In the concentration profiles of electrically active centers $n(x)$ and erbium atoms $C(x)$, were found irregularities related to some peculiarities of the Er segregation during solid phase epitaxial recrystallization that are regarded as peculiar to erbium ion implantation doses higher than the amorphization threshold. The $n(x)$ and $C(x)$ profiles practically coincide near the surface. A linear increase of a maximum concentration of electrically active centers and practically constant effective coefficient of their activation have been observed at the erbium ion implantation doses higher than the amorphization threshold. An increase in the electrically active center concentration gains saturation and k drops at the erbium concentration higher than $7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.