

Влияние электрически неактивных примесей на образование донорных центров в слоях кремния, имплантированных эрбием

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

Государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

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

(Получена 18 ноября 1999 г. Принята к печати 22 ноября 1999 г.)

Исследовано влияние дополнительной имплантации электрически неактивных примесей углерода, кислорода, азота и фтора на образование донорных центров в кремнии, имплантированном эрбием. Показано, что дополнительная имплантация приводит к увеличению концентрации донорных центров, образующихся при отжиге. Изменение концентрации донорных центров зависит от типа вводимой примеси. Результаты указывают, что электрически неактивные примеси участвуют в образовании донорных центров.

Введение

При легировании кремния редкоземельным элементом Er методом ионной имплантации образуются электрически и оптически активные центры [1–4]. Оптически активные центры ответственны за фото- и электролюминесценцию на длине волны 1.54 мкм, соответствующей минимуму потерь и дисперсии в линиях волоконно-оптической связи, что делает систему Si:Er перспективной для кремниевой оптоэлектроники. Обнаружено, что интенсивность люминесценции коррелирует с концентрацией Er-содержащих донорных центров, образующихся в имплантированных слоях кремния после термического отжига [5,6]. В связи с этим большой интерес представляет исследование совместной имплантации ионов редкоземельных элементов и электрически неактивных примесей (C, O, N, F), приводящей к повышению интенсивности фотолуминесценции [6–9]. Было обнаружено, что имплантация примеси O приводит к увеличению концентрации донорных центров (N_d) в слоях Si, имплантированных редкоземельными элементами Er, Ho, Dy, Yb [5,10–12], а имплантация ионов углерода приводит к увеличению N_d в слоях Si, имплантированных Er [5].

В настоящей работе исследуется влияние отжига на электрические свойства слоев кремния, имплантированных ионами Er и электрически неактивными примесями C, O, N и F, повышающими интенсивность фотолуминесценции.

Экспериментальные условия

В качестве подложки использовались пластины кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\sim 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Ионы Er^+ с энергией 1 МэВ и дозой $Q_{\text{Er}} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ имплантировались на установке High Voltage Engineering Europe K2MV. Соимплантация ионов O, C, N, F проводилась с дозой $Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, энергии ионов находились в диапазоне 135–180 кэВ. Энергии выбирались таким образом, чтобы проецируемые длины пробега ионов соимплантируемых примесей

и эрбия совпадали ($R_p \approx 0.32 \text{ мкм}$). Изохронные отжиги в течение 30 мин проводились в интервале температур $T = 700 \div 900^\circ\text{C}$ в хлорсодержащей атмосфере (1 мол% CCl_4 в O_2). Слоевое сопротивление R_s измерялось четырехзондовым методом. Концентрационные профили носителей заряда по глубине $n(x)$ определялись методом вольт-фарадных характеристик барьера Шоттки Hg–Si (ртутный зонд). Эффективный коэффициент активации электрически активных центров рассчитывался из соотношения $k = (e\mu_e R_s)^{-1} / Q_{\text{Er}}$, где e — заряд электрона, μ_e — подвижность электронов ($\mu_e = 1350 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$).

Результаты

Отжиг кремния, имплантированного ионами Er совместно с ионами электрически неактивных примесей N, F, C и O, приводит к образованию слоя n -типа проводимости, т. е. к образованию донорных центров. Отжиг при $T = 700^\circ\text{C}$ для всех исследованных примесей приводит к повышению концентрации образующихся донорных центров (рис. 1), причем концентрация растет в последовательности $\text{Er} \rightarrow \text{F} \rightarrow \text{N} \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{O}$, где Er означает имплантацию одного эрбия, а последующие обозначения элементов — примесь, соимплантированную с эрбием. Максимальное значение эффективного коэффициента активации ($k = 0.215$) наблюдается в Si:(Er,O) (кривая 3). С повышением температуры отжига до $T = 800^\circ\text{C}$ в Si:(Er,O), Si:(Er,N) и Si:(Er,C) эффективный коэффициент активации остается практически неизменным (кривые 3–5). В образцах Si:Er и, особенно, Si:(Er,F) наблюдается понижение концентрации вводимых донорных центров (кривые 1, 2). Повышение температуры отжига до $T = 900^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению значений эффективного коэффициента активации в образцах со всеми имплантированными примесями. В образцах Si:(Er,F) образование донорных центров вообще не наблюдается ($k \approx 0$).

Профили распределений донорных центров по глубине имеют вид кривых с максимумом (рис. 2). Соимплантация всех дополнительных примесей приводит к увеличе-

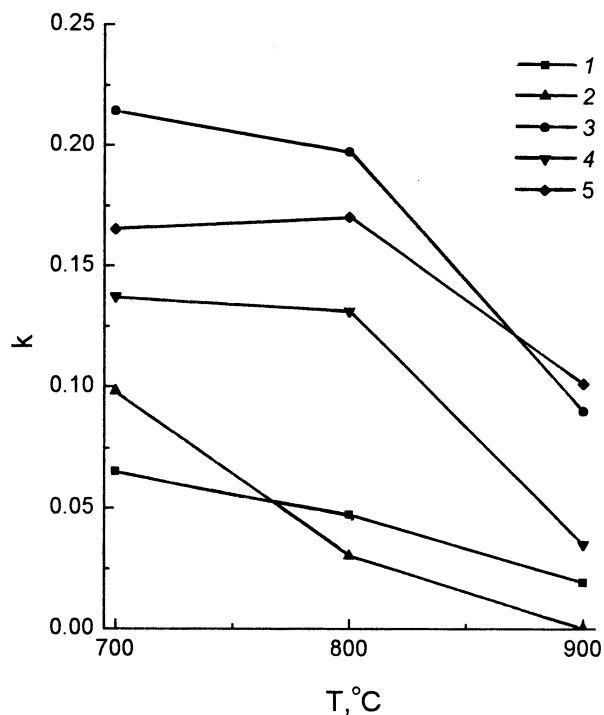


Рис. 1. Зависимости коэффициента активации от температуры отжига при имплантации эрбия (1), эрбия и фтора (2), эрбия и кислорода (3), эрбия и азота (4), эрбия и углерода (5).

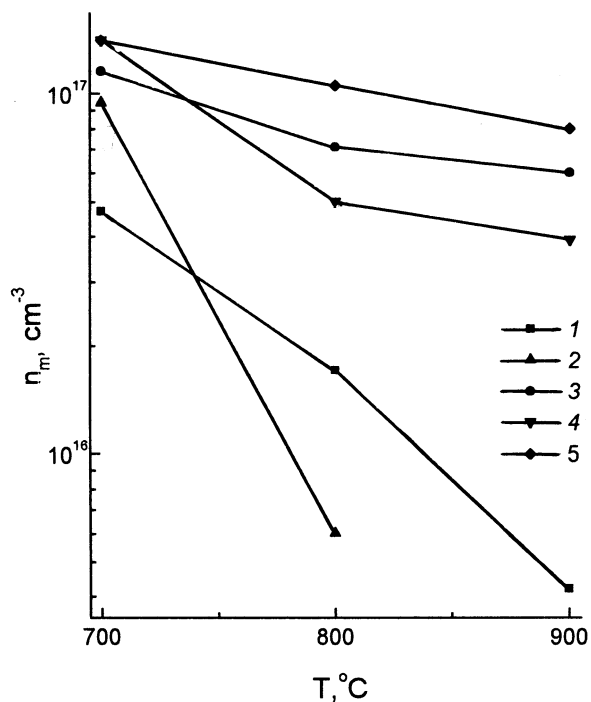


Рис. 3. Зависимости максимальной концентрации донорных центров от температуры отжига в Si:Er (1), Si:(Er,F) (2), Si:(Er,O) (3), Si:(Er,N) (4), Si:(Er,C) (5).

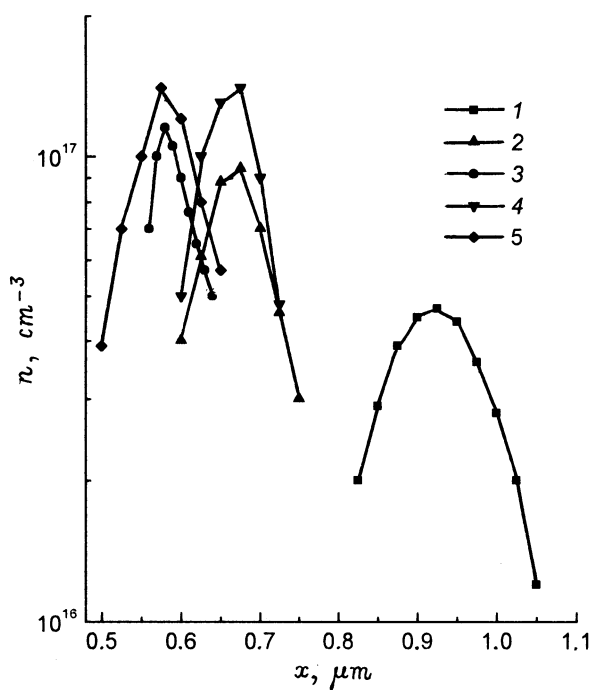


Рис. 2. Концентрационные профили донорных центров в Si:Er (1), Si:(Er,F) (2), Si:(Er,O) (3), Si:(Er,N) (4), Si:(Er,C) (5) после имплантации и отжига при $T = 700^\circ\text{C}$ в течение 0.5 ч.

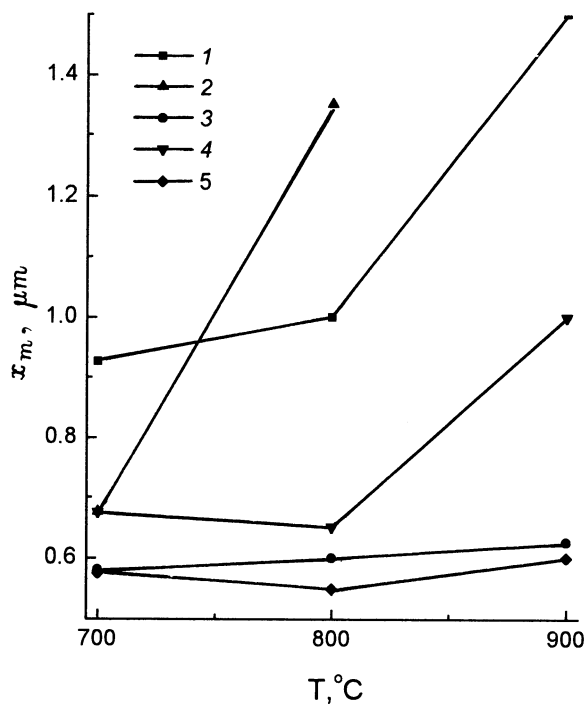


Рис. 4. Зависимости положения максимума концентрации донорных центров от температуры отжига в Si:Er (1), Si:(Er,F) (2), Si:(Er,O) (3), Si:(Er,N) (4), Si:(Er,C) (5).

нию максимальной концентрации донорных центров n_m (рис. 3). При этом положения максимумов распределений x_m (рис. 4) смещаются к поверхности — в сторону максимумов концентраций имплантированных примесей ($R_p \approx 0.32$ мкм). Впервые подобное смещение профилей распределений донорных центров при совместной имплантации Er с кислородом было обнаружено в [10].

Повышение температуры отжига приводит к уменьшению значений n_m во всех исследованных образцах. Наиболее быстрое уменьшение значений n_m отмечено в Si:(Er,F) (рис. 3, кривая 2) и Si:Er (рис. 3, кривая 1), что хорошо коррелирует с поведением $k(T)$ в этих образцах (рис. 1).

На рис. 4 представлены зависимости положений максимумов профилей донорных центров x_m от температуры отжига. При повышении температуры отжига от 700 до 800°C резкий рост x_m наблюдается только в Si:(Er,F) (кривая 2). Повышение температуры отжига до 900°C практически не влияет на положения максимумов профилей распределения донорных центров в Si:(Er,O) и Si:(Er,C) (кривые 3, 5), а в случае Si:Er и Si:(Er,N) (кривые 1, 4) приводит к заметному увеличению x_m .

Обсуждение

Таким образом, в результате исследований выявлены следующие общие закономерности, наблюдаемые для всех соимплантированных электрически неактивных примесей: во-первых, увеличение k , n_m и уменьшение x_m при соимплантации электрически неактивных примесей по сравнению с имплантацией одного Er, и, во-вторых, уменьшение k , n_m и увеличение x_m при увеличении температуры отжига, причем скорость этих изменений различна для разных примесей.

Ранее в работе [3] был сделан вывод, что в образовании донорных центров в имплантированных слоях кремния кроме атомов Er принимают участие собственные точечные дефекты, возникающие во время отжига имплантационно введенных дефектов. Уменьшение k и n_m , а также сдвиг x_m в глубь образца с повышением температуры отжига объяснялись тем, что при повышении температуры отжига выше 700°C все большая часть избыточных собственных точечных дефектов уходит на поверхность. В количественной модели, развитой в работе [10], предполагалось, что донорными центрами являются комплексы атомов эрбия с собственными межузельными атомами. По-видимому, и при совместной имплантации Er с электрически неактивными примесями C, O, N, F собственные точечные дефекты, образующиеся при отжиге, участвуют в образовании донорных центров. Появлением дополнительных имплантационно введенных дефектов при соимплантации и соответственно дополнительных собственных точечных дефектов при последующих отжигах объясняется повышение k и n_m (рис. 1 и 3). В пользу такого объяснения свидетельствует также и сдвиг максимумов распределений донорных центров к

поверхности (рис. 2). Собственные точечные дефекты, образующиеся при распаде имплантационно введенных дефектов, участвуют в образовании донорных центров и при соимплантации электрически неактивных примесей.

В то же время, обнаружены различия в поведении донорных центров в зависимости от вида соимплантированной примеси, причем эти различия связаны с особенностями поведения этих примесей в кремнии. Быстрое уменьшение k и n_m с увеличением температуры отжига при соимплантации ионов F можно объяснить его склонностью к выходу из решетки кремния путем обратной диффузии вследствие малой растворимости. Так, по данным работ [13,14], после отжига при $T = 800^\circ\text{C}$ в кремнии остается $\sim 80\%$ введенного фтора, а при повышении температуры отжига до $T = 1000^\circ\text{C}$ фтор в имплантированном слое уже не обнаруживается. Примесь N при $T > 800^\circ\text{C}$ уходит из имплантированного слоя в глубь образца [15], чем можно объяснить значительное увеличение x_m при $T = 900^\circ\text{C}$ (рис. 4, кривая 4). Примеси C и O при отжиге в исследуемом интервале температур перераспределяются внутри имплантированного слоя, не уходя из него [16]. Это объясняет слабое влияние температуры отжига на положение максимума распределения донорных центров. Примесь O склонна к образованию комплексов как с атомами Si (термодоноры типа SiO_x), так и с атомами Er (Er–O) [17]. На образование двух типов донорных центров (эрбий- и кислородосодержащих) указывают и результаты работы [18]. Уменьшение k после отжига при $T > 700^\circ\text{C}$, по-видимому, свидетельствует о низкой термической устойчивости термодоноров и(или) комплексов Er–O. Интересным результатом является уменьшение k и n_m при соимплантации примеси F до значений, ниже соответствующих имплантации одного Er при $T \geq 800^\circ\text{C}$ (кривые 2 на рис. 1, 3). Этот результат можно объяснить тем, что выход атомов F из решетки Si способствует повышению концентрации вакансий и соответственно уменьшению концентрации собственных межузельных атомов кремния, входящих, согласно [3,10], в состав донорных центров.

Заключение

Таким образом, показано, что соимплантация электрически неактивных примесей C, N и F, так же как и соимплантация примеси O, приводит к увеличению эффективного коэффициента активации, максимальной концентрации донорных центров и к сдвигу максимумов распределений донорных центров к поверхности по сравнению с имплантацией одного Er. С увеличением температуры отжига эффективный коэффициент активации и максимальная концентрация донорных центров уменьшаются, а положение максимума распределений донорных центров смещается в глубь образца для всех соимплантированных примесей, причем темп этих изменений различный для разных примесей. Поведение

концентрации донорных центров при отжигах в слоях Si:Er с соимплантацией электрически неактивных примесей C, O, N и F коррелирует с известным индивидуальным поведением этих примесей. Полученные результаты указывают на участие в образовании донорных центров не только Er и собственных точечных дефектов, но и имплантируемых электрически неактивных примесей.

Авторы благодарны Е.О. Паршину и А.В. Шестакову за проведение имплантации. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 99-02-17750).

Список литературы

- [1] H. Ennen, J. Schneider, G. Pomrenke, A. Axmann. Appl. Phys. Lett., **43**, 943 (1983).
- [2] Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [3] О.В. Александров, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, А.В. Меркулов. ФТП, **30**, 876 (1996).
- [4] J. Michel, L.V.C. Assali, M.T. Morse, L.C. Kimerling. *Semiconductors and Semimetals* (San Diego, Academic Press, 1998) v. 49, p. 111.
- [5] F. Priolo, S. Coffa, G. Franzo, C. Spinella, A. Carnera, V. Bellani. J. Appl. Phys., **74**, 4936 (1993).
- [6] J. Michel, J. Palm, X. Duan, E. Quellette, S.F. Nelson, S.H. Ahm, L.C. Kimerling. Mater. Sci. Forum. **258–263**, 1485 (1997).
- [7] P.N. Favennec, H.L. Haridon, D. Moutonnet, M. Salvi, M. Gauneau. Japan. J. Appl. Phys., **29**, L524 (1990).
- [8] J. Michel, J.L. Benton, R.F. Ferrante, D.S. Jacobson, D.S. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, J.M. Poate, L.C. Kimerling. J. Appl. Phys., **70**, 2672 (1991).
- [9] S. Libertino, S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. J. Appl. Phys., **78**, 3867 (1995).
- [10] N.A. Sobolev, O.V. Alexandrov, E.I. Shek. MRS Symp. Proc., **442**, 237 (1997).
- [11] О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин. ФТП, **32**, 1029 (1998).
- [12] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Р.Н. Кютт, Ю.А. Николаев, Е.И. Шек, О.В. Александров, А.О. Захарьин, В.И. Вдовин, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин, А.Н. Якименко. *Матер. совещ. "Нанофотоника"* (Нижний Новгород, 1999) с. 71.
- [13] Byoung-Bon Yu, N. Konuma, Eichi Arai. J. Appl. Phys., **70**, 2408 (1991).
- [14] J. Michel, J. Palm, F. Gan, F.Y.G. Ren, B. Zheng, S.T. Dunham, L.C. Kimerling. Mater. Sci. Forum. **196–201**, 585 (1995).
- [15] R.S. Hockett. Appl. Phys. Lett., **54**, 1793 (1989).
- [16] H. Koyama. J. Appl. Phys., **51**, 3202 (1980).
- [17] В.Ф. Мастеров, Ф.С. Насрединов, П.П. Серегин, Е.И. Теруков, М.М. Мездрогина. ФТП, **32**, 708 (1998).
- [18] V.V. Emtsev, V.V. Emtsev Jr., D.S. Poloskin, E.I. Shek, N.A. Sobolev. J. Luminesc., **80**, 374 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of electrical non-active impurities on the formation of donor centers in erbium implanted silicon layers

O.V. Aleksandrov, A.O. Zachar'in, N.A. Sobolev*, Yu.A. Nikolaev*

State Electrotechnical University,
197376 St. Petersburg, Russia

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

Abstract The influence of additional implantation of electrical non-active impurities (C, O, N and F) on the formation of donor centers in erbium implanted silicon has been studied. The additional implantation leads to an increase in the concentration of donor centers generated by annealing. The variation of the donor center concentration depends on the impurity introduced. The results show the role of electrical non-active impurities in the process of donor center formation.