

Образование донорных центров при отжиге кремниевых светоизлучающих структур, имплантированных ионами кислорода

© Н.А. Соболев*[¶], Д.В. Данилов*⁺, О.В. Александров*, А.С. Лошаченко*⁺, В.И. Сахаров*,
И.Т. Серенков*, Е.И. Шек*, И.Н. Трапезникова*

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

⁺ Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока,
Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия

• Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
(СПбГЭТУ),
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 10 июля 2014 г. Принята к печати 25 августа 2014 г.)

Обнаружено, что имплантация кремния ионами кислорода и последующий отжиг при высоких температурах сопровождаются образованием электрически активных донорных центров и $p-n$ конверсией типа проводимости кремния. Их концентрация и пространственное распределение зависят от температуры отжига. Результаты объясняются взаимодействием атомов кислорода с собственными точечными дефектами, образующимися при отжиге имплантационных нарушений.

1. Введение

В настоящее время проводятся обширные исследования по созданию светоизлучающих структур для кремниевой оптоэлектроники [1]. При изготовлении кремниевых светоизлучающих структур с помощью имплантации ионов Eg и последующего отжига было обнаружено образование донорных центров [2–4]. Часто при этом концентрация образовавшихся донорных центров превышала концентрацию акцепторных примесей в исходных кристаллах, и происходила $p \rightarrow n$ конверсия типа проводимости кремниевого слоя. Были проведены исследования по влиянию условий имплантации, температуры, времени и среды отжига на обнаруженный эффект. Характерными свойствами таких образцов явились высокие скорость введения и концентрация образующихся термодоноров (на уровне $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ за характерное время ~ 30 мин при температурах $\sim 700^\circ\text{C}$). Другой отличительной особенностью этих термодоноров является относительно высокая температура ($\sim 1000^\circ\text{C}$), при которой они выживают в отличие от классических кислородных термодоноров. Измерение вольт-фарадных характеристик в таких структурах показало, что концентрационные профили электронов в n -слое имеют вид кривых с максимумом, и по мере повышения температуры концентрация в максимуме понижается [5]. При измерении эффекта Холла в широком диапазоне температур в имплантированных ионами эрбия образцах было выявлено образование трех групп энергетических уровней в нижней половине запрещенной зоны кремния с энергиями ионизации ~ 0.02 , ~ 0.15 и ~ 0.38 эВ [6]. Авторы показали, что мелкие термодоноры сформированы из атомов кислорода и собственных точечных дефектов (СТД), а две другие группы включают в свой состав

атомы кислорода и редкоземельные ионы. Аналогичная картина образования трех семейств термодоноров с несколько отличающимися значениями энергетических положений уровней наблюдалась при имплантации других редкоземельных ионов: Dy, Ho и Yb в кремний и последующем высокотемпературном отжиге [7]. В последнее время проводятся активные исследования по созданию светоизлучающих структур с так называемой дислокационной люминесценцией, в частности путем имплантации ионов кремния [1,8] или кислорода [1,9]. В настоящей работе изучена возможность образования термодоноров после имплантации ионов кислорода и последующего отжига при формировании светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией.

2. Экспериментальные условия

В качестве подложек использовались пластины Cz-Si p -типа проводимости ориентации $\langle 100 \rangle$ толщиной 300 мкм, диаметром 100 мм, с удельным сопротивлением 12 Ом·см (марки КДБ-12). Измерение ИК поглощения в исходном образце показало, что концентрация кислорода $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а концентрация углерода была ниже предела измерения $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для получения однородного профиля распределения примеси кислорода имплантировались ионы с тремя разными дозами и энергиями: $350/1.5 \cdot 10^{15} + 225/0.9 \cdot 10^{15} + 150/0.7 \cdot 10^{15} \text{ кэВ/см}^{-2}$. Длины проецированного пробега ионов равнялись 0.34, 0.49 и 0.71 мкм соответственно [10]. Имплантация проводилась на имплантере High Voltage Engineering Europe (Голландия). Для предотвращения каналирования подложка отклонялась на угол 7° относительно пучка ионов. Согласно расчету по программе SRIM [10], концентрация кислорода на глубине от 0.42 до 0.63 мкм была постоянной на

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

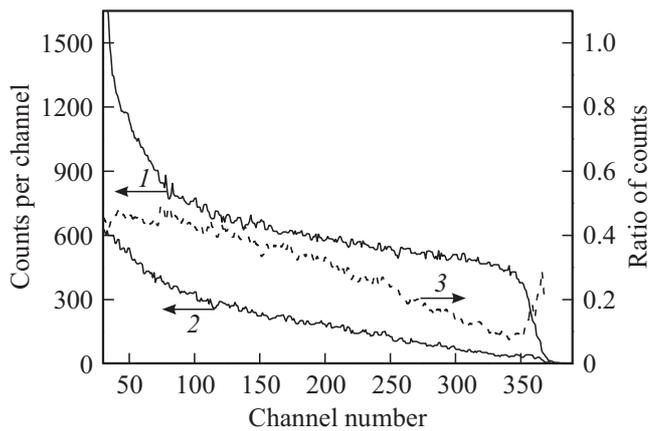


Рис. 1. Спектры RBS протонов, измеренные в случайном (1) и каналирующем (2) режимах, и отношение амплитуд каналирующего и случайного RBS сигналов (3) для имплантированного p -Cz-Si:O образца.

уровне $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Ширина на полувысоте распределения кислорода находилась в диапазоне 0.26–0.85 мкм. Спектры обратного резерфордского рассеяния (RBS) протонов с энергией 227 кэВ в образце после имплантации ионов O, измеренные в случайном и каналирующем режимах, приведены на рис. 1 (кривые 1 и 2 соответственно). Анализ спектров показывает, что аморфизации имплантированного слоя не происходит: степень аморфизации, характеризующаяся отношением измеренных в каналирующем и случайном режимах интенсивностей (кривая 3), существенно меньше единицы. Расчет профиля концентрации точечных дефектов, нормированной на концентрацию атомов в решетке Si, по данным RBS спектра показал, что максимальный уровень радиационных нарушений достигает 16%.

Изохронные (в течение 30 мин) отжиги имплантированных образцов проводились при температурах 700, 900 и 1000°C в хлорсодержащей атмосфере. Последняя представляла собой поток кислорода, насыщенный парами четыреххлористого углерода с молярной концентрацией 1%. Тип проводимости поверхностного слоя контролировался с помощью термозонда. Концентрационные профили носителей заряда определялись из вольт-фарядных характеристик барьера Шоттки Hg-Si (ртутный зонд) при комнатной температуре на частоте тестирующего сигнала 1 МГц.

3. Результаты и обсуждение

Измерения, проведенные с помощью термозонда, показали, что имплантация ионов кислорода и последующий отжиг приводили к образованию в приповерхностной области слоя n -типа проводимости, т. е. наблюдалась $p \rightarrow n$ конверсия типа проводимости кремния. Измеренные концентрационные профили электронов приведены на рис. 2. Концентрационные профили имеют вид кривых с максимумами. При увеличении температуры отжига

концентрация в максимуме уменьшается от значения $2.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (для 700°C отжига) до $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (для 1000°C отжига). При увеличении температуры изохронного отжига глубина, на которой находятся максимумы $n(x)$, увеличивается от 0.47 мкм при 700°C до 0.73 мкм при 1000°C.

Интересно отметить, что приведенные на рис. 2 профили донорных центров практически подобны и близки профилям донорных центров в образцах кремния, имплантированных ионами эрбия и отожженных в аналогичных температурно-временных режимах в работе ([5], рис. 1, кривые 2–4). Это позволяет предположить по аналогии с работой [5], что донорные центры сформированы из атомов кислорода с участием STD. При низких температурах отжига концентрация образующихся донорных центров наибольшая. По мере повышения температуры отжига, когда отжигается все большая часть имплантационных нарушений, концентрация точечных дефектов уменьшается, а их подвижности увеличиваются, в результате наблюдается уменьшение концентрации донорных центров. При этом положение максимальной концентрации доноров отодвигается от поверхности за счет ушедших на нее неравновесных собственных точечных дефектов. При дальнейшем увеличении температуры отжига все большая часть неравновесных собственных точечных дефектов успевает уходить на стоки. В результате наблюдается уменьшение максимальной концентрации доноров и сдвиг максимума в глубину. Расположение образовавшихся донорных центров практически совпадает с областью, в которой формировалась большая часть выявленных при электронномикроскопических исследованиях структурных дефектов, в первую очередь преципитатов кислорода и дислокационных петель [1]. Это является дополнительным свидетельством участия атомов кислорода и собственных точечных дефектов решетки кремния в образовании

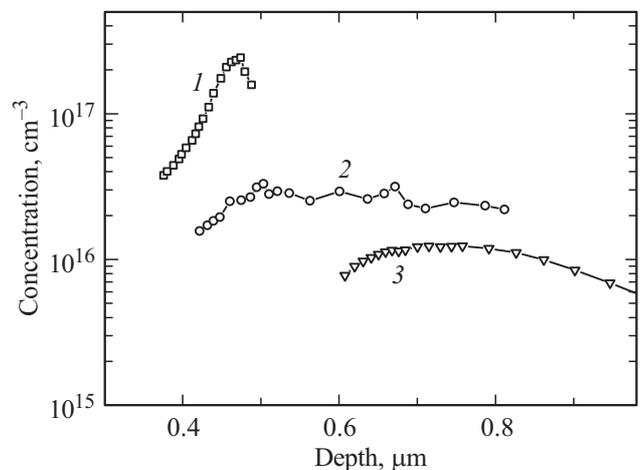


Рис. 2. Концентрационные профили электронов в n -слое кремния после имплантации ионов кислорода и отжига в течение 0.5 ч при разных температурах, °C: 1 — 700, 2 — 900, 3 — 1000.

донорных центров. Дополнительным фактором, свидетельствующим в пользу участия атомов кислорода в образовании донорных центрах, являются данные работы [11], в которой дополнительная имплантация ионов кислорода и отжига при 700°C привели к образованию так называемых двойных кислородных термодоноров (так называемых Thermal Double Donors).

Таким образом, установлено, что при отжиге имплантированного ионами кислорода кремния в образовании донорных центров, кроме атомов кислорода, участвуют собственные точечные дефекты. Сопоставление полученных результатов по исследованию люминесцентных, структурных и электрофизических свойств имплантированного ионами кислорода кремния в процессе отжига однозначно свидетельствует, что процессы трансформации структурных дефектов, люминесцентных и электрически активных центров надо рассматривать как единое целое.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ КО (грант № 13-02-92622).

Список литературы

- [1] Н.А. Соболев. ФТП, **10**, 23 (2010).
- [2] F. Widdershoven, J.P.M. Naus. Mater. Sci. Eng., B, **4**, 71 (1989).
- [3] J.L. Benton, J. Michel, L.C. Kimerling. D.S. Jacobson, Y.-H. Xie, D.S. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, J.M. Poate. J. Appl. Phys., **70**, 2667 (1991).
- [4] F. Priolo, S. Coffa, G. Franzo, C. Spinella, A. Carnera, 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] 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).
- [7] В.В. Емцев, В.В. Емцев (мл.), Д.С. Полоскин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, Й. Михель, Л.С. Кимерлинг. ФТП, **33**, 649 (1999).
- [8] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, Е.И. Шек, Д.И. Тетельбаум. ФТП, **41**, 555 (2007).
- [9] Н.А. Соболев, Б.Я. Бер, А.М. Емельянов, А.П. Коварский, Е.И. Шек. ФТП, **41**, 295 (2007).
- [10] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. Nucl. Instr. Meth. B, **268**, 1818 (2010).
- [11] V.V. Emtsev, jr., C.A.J. Ammerlaan, B.A. Andreev, G.A. Oganessian, D.S. Poloskin, E.I. Shek, N.A. Sobolev. Sol. St. Phenomena, **82–84**, 93 (2002).

Редактор Т.А. Полянская

The formation of donor centers during annealing of silicon light-emitting structures implanted with oxygen ions

N.A. Sobolev*, D.V. Danilov*⁺, O.V. Aleksandrov*, A.S. Loshachenko*⁺, V.I. Sakharov*, I.T. Serenkov*, E.I. Shek*, I.N. Trapeznikova*

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

⁺ Fok Institute of Physics, St. Petersburg State University, 198504 St. Petersburg, Russia

• Saint Petersburg Electrotechnical University „LETI“, 197376 St. Petersburg, Russia

Abstract We found out that oxygen ion implantation of silicon and subsequent annealing at high temperatures result in the formation of electrically active donor centers and the $p \rightarrow n$ conversion of the type of a conductivity in Si. Their concentration and space distribution depend on an annealing temperature. The results are associated by the interaction of the oxygen atoms with the intrinsic point defects producing at annealing of implantation damage.