

06:07:09

Дислокационная фотолюминесценция в кремнии, имплантированном ионами фтора

© Н.А. Соболев¹, А.Е. Калядин¹, В.И. Сахаров¹, И.Т. Серенков¹,
Е.И. Шек¹, К.В. Карабешкин¹, П.А. Карасев², А.И. Титов²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2016 г.

Установлено, что имплантация ионов фтора с энергией 85 keV и дозой $8.3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ в монокристаллический Si не приводит к формированию аморфного слоя. Последующий отжиг при температуре 1100°C в хлорсодержащей атмосфере сопровождается появлением D1- и D2-линий дислокационной люминесценции. Интенсивность обеих линий уменьшается с увеличением времени отжига от 0.25 до 3 h. С увеличением температуры измерения от 80 до 200 K интенсивности этих линий уменьшаются, а положения их максимумов сдвигаются в длинноволновую сторону.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.01.44084.16420

Перспективным путем для создания кремниевых светоизлучающих структур (СИС) на длину волны $\sim 1600 \text{ nm}$ для кремниевой оптоэлектроники является использование так называемой дислокационной люминесценции. Это название появилось исторически, поскольку впервые этот вид люминесценции наблюдался 40 лет назад в образцах кремния с большой плотностью дислокаций в работе [1], авторы которой и связали его с рекомбинационным излучением на дислокациях. Состояние дел по развитию этого направления на 2010 год было обобщено в нашем обзоре [2]. Анализ полученных данных показал, что с точки зрения совместимости технологий формирования светодиодных (СД) структур с дислокационной люминесценцией и изготовление интегральных схем одним из наиболее перспективных методов является ионная имплантация. Физические основы инженерии дефектов в технологии СД с дислокационной электролюминесценцией были заложены при исследовании

кремния, имплантированного редкоземельными ионами Er, Ho и Dy [2]. Однако имплантация тяжелых ионов требует использования специальных высоковольтных (1–2 MeV) ускорителей. Поэтому представляет интерес изготовлен СИС с помощью имплантации легких ионов с энергиями 40–100 keV, широко применяемыми в микроэлектронике. Среди наиболее интересных результатов в этом направлении следует отметить работу [3], в которой с помощью имплантации ионов Si с энергией 100 keV были изготовлены СД с высокой интенсивностью дислокационной электролюминесценции при комнатной температуре. Цель настоящей работы заключалась в исследовании возможности создания СИС с дислокационной люминесценцией с помощью имплантации ионов фтора.

Имплантация ионов фтора с энергией 85 keV (проецированная длина пробега $R_p = 186$ nm) и дозой $8.3 \cdot 10^{14}$ cm⁻² проводилась в пластины выращенного методом Чохральского Si *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 4.5 \Omega \cdot$ cm. Использовались пластины с полированной поверхностью и ориентацией поверхности (100). Температура мишени не превышала 50°C. Последующий отжиг осуществлялся в хлорсодержащей атмосфере (ХСА) при температуре 1100°C в течение времени 0.25–3 h. ХСА представляла собой поток кислорода, насыщенный парами четыреххлористого углерода с концентрацией 0.5 mol.%. Дефектная структура образцов исследовалась методом обратного рассеяния протонов с энергией 227 keV с использованием электростатического анализатора. Измерение энергетических спектров обратнорассеянных протонов проводилось в случайном и каналирующем режимах. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась твердотельным лазером на длине волны 532 nm (диаметр луча ~ 2 mm, мощность накачки варьировалась в диапазоне 0.2–8.8 mW) и регистрировалась в диапазоне длин волн 1000–1650 nm при температурах 10–200 K с помощью автоматизированного монохроматора МДР-25 и фотоприемника InGaAs. Образец помещался в криостат УТРЕКС (разработка Института физики НАНУ, Киев, Украина), что позволяло поддерживать температуру с точностью ± 0.2 K. Спектральное разрешение системы составляло 7 nm. Спектры были скорректированы с учетом спектральной характеристики фотоприемника и всего оптического тракта.

Спектры обратного рассеяния протонов в образце после имплантации ионов фтора, измеренные в случайном и каналирующем режимах, приведены на рис. 1 (кривые 1 и 2). Анализ спектров показывает, что

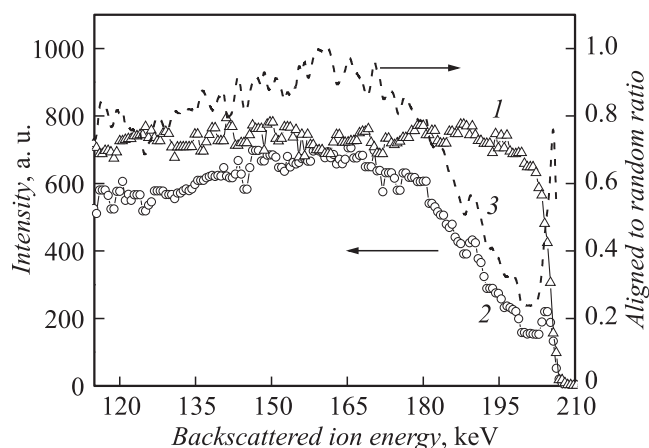


Рис. 1. Спектры обратного рассеяния протонов в образце после имплантации ионов фтора, измеренные в случайном (1) и каналирующем (2) режимах (левая шкала). Отношение интенсивностей, измеренных в каналирующем и случайном режимах, представлено кривой 3 (правая шкала).

аморфизации имплантированного слоя не происходит: максимальная степень аморфизации, характеризующаяся отношением измеренных в каналирующем и случайном режимах интенсивностей (рис. 1, кривая 3), составляет $\sim 95\%$.

Спектры ФЛ для образцов, имплантированных ионами фтора и отожженных при 1100°C в ХСА в течение $0.25\text{--}3\text{ h}$ представлены на рис. 2. ФЛ измерялась при 10 K . Во всех спектрах доминируют две линии с длинами волн 1532 и 1420 nm , принадлежащие так называемым $D1$ - и $D2$ -центрам дислокационной люминесценции [2]. Полуширины этих линий составляют $\sim 16\text{ nm}$, что соответствует их значениям в образцах, полученных с помощью других технологических методов [2]. В спектрах ФЛ также наблюдается менее интенсивная линия с длиной волны 1476 nm , которая может принадлежать кислородному преципитату [4]. Линии краевой люминесценции также отсутствуют, что свидетельствует о достаточно большой концентрации центров безызлучательной рекомбинации. Важно отметить, что, как и в случае образцов, имплантированных ионами Er , Ho , Yb , Si и O [2],

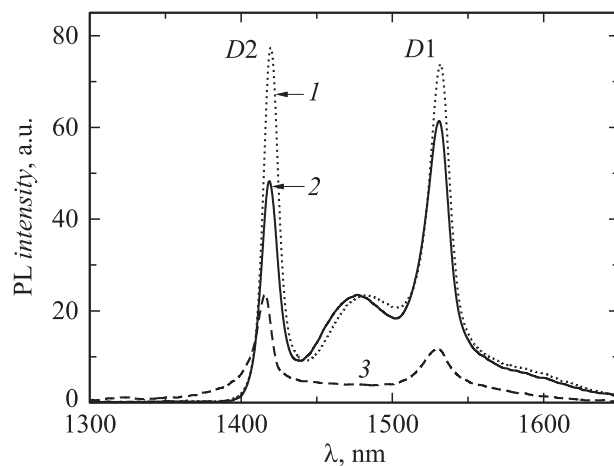


Рис. 2. Спектры ФЛ для образцов, имплантированных ионами фтора и отожженных при 1100°C в ХСА в течение 0.25 (1), 0.5 (2) и 3 (3) h. ФЛ измерялась при температуре 10 К. Мощность накачки, mW: 0.26 (1,2) и 8.8 (3).

не происходит образования $D3$ - и $D4$ -центров, связанных с введением дислокаций, в отличие от случаев пластически деформированного кремния (путем четырехточечного изгиба [1], одноосного сжатия [5], изгиба [6] и облучения малоэнергетическими электронами [7]) или формирования кислородных преципитатов [4,8]. После коротких отжигов в течение 0.25–0.5 h интенсивности $D1$ - и $D2$ -линий примерно одинаковы (рис. 2, кривые 1 и 2). Увеличение длительности отжига сопровождается значительным снижением интенсивностей $D1$ - и $D2$ -линий. Чтобы после отжига в течение 3 h значения интенсивностей этих линий были соизмеримы со значениями после коротких отжигов, пришлось увеличить мощность накачки более чем в 30 раз (рис. 2, кривая 3). Уменьшение интенсивностей $D1$ - и $D2$ -линий с увеличением времени отжига указывает на снижение концентрации люминесцентных центров, поскольку хорошо известно, что концентрация центров безызлучательной рекомбинации уменьшается с ростом длительности постимплантационного отжига [2]. Ранее было установлено, что атомы фтора, введенные с помощью имплантации, быстро диффундируют к поверхности [9].

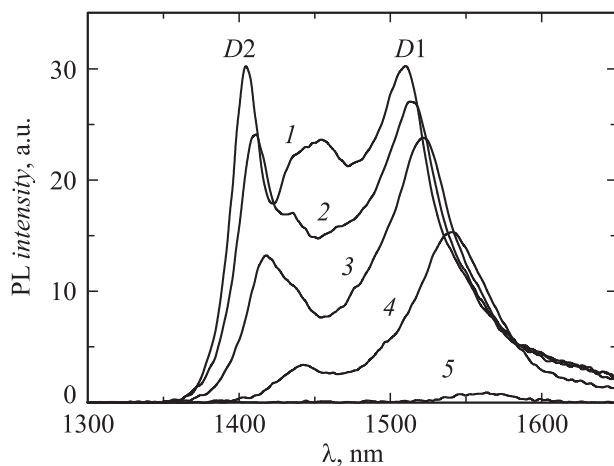


Рис. 3. Спектры ФЛ для образцов, имплантированных ионами фтора и отожженных при 1100°C в ХСА в течение 0.5 h, при разных температурах измерения: 80 (1), 100 (2), 120 (3), 160 (4) и 200 (5). Мощность накачки 8.8 mW.

По-видимому, эффект уменьшения интенсивности линий $D1$ и $D2$ с ростом длительности отжига обусловлен уходом атомов фтора из объема образцов, вызывающим уменьшение концентрации протяженных дефектов и снижение уровня напряжений в областях, где формируются $D1$ - и $D2$ -центры. В случае образцов, имплантированных ионами Er, Ho и Dy, имел место обратный эффект: с увеличением длительности отжига интенсивность $D1$ - и $D2$ -линий возрастала [2]. Это обусловлено малой подвижностью (низкими значениями коэффициентов диффузии) атомов редкоземельных примесей.

Спектры ФЛ для образцов, имплантированных ионами фтора и отожженных при 1100°C в ХСА в течение 0.5 h, при мощности накачки 8.8 mW и температурах измерения 80–200 K приведены на рис. 3. С увеличением температуры интенсивности $D1$ - и $D2$ -линий уменьшаются, а положение их максимумов сдвигается в длинноволновую сторону. Интенсивность $D2$ -линии снижается более быстро по сравнению с интенсивностью $D1$ -линии и уже практически не регистрируется при 200 K. Обнаруженное поведение спектров ФЛ при увеличении температуры в образцах, имплантированных ионами фтора,

соответствует имеющимся данным для образцов с дислокационной люминесценцией, полученных другими методами [2].

Наличие *D1*- и *D2*-линий дислокационной люминесценции во всех исследованных образцах позволяет предположить, что имплантация ионов фтора и последующий отжиг приводят к введению протяженных структурных дефектов, которые образуют или способствуют образованию оптически активных центров. Наблюдавшееся снижение интенсивности ФЛ от времени отжига указывает на то, что с увеличением времени отжига уменьшается концентрация люминесцентных центров. Конечно, структура этих центров может отличаться от центров, образующихся в случае имплантации ионов *F*, *Н*, *Dу*, *Si* и *O*. Природу образующихся протяженных структурных дефектов, механизмы их формирования и трансформации в процессе отжига предстоит выяснить в дальнейшем.

Таким образом, установлено, что имплантация ионов фтора с энергией 85 keV и дозой $8.3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ в монокристаллический *Si* не приводит к формированию аморфного слоя. Последующий отжиг при температуре 1100°C в ХСА сопровождается появлением *D1*- и *D2*-линий дислокационной люминесценции. В отличие от образцов, имплантированных ионами редкоземельных ионов, интенсивность этих линий уменьшается с ростом длительности постимплантационного отжига. С увеличением температуры измерения от 80 до 200 К интенсивности этих линий уменьшаются, а положения их максимумов сдвигаются в длинноволновую сторону, что наблюдалось во всех образцах с дислокационной люминесценцией, изготовленных с помощью разных технологических методов.

Работа Н.А. Соболева, К.В. Карабешкина, П.А. Карасева и А.И. Титова частично была поддержана РФФИ (грант № 14-08-01256).

Список литературы

- [1] Дроздов Н.А., Патрин А.А., Ткачев В.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23. С. 651.
- [2] Соболев Н.А. // ФТП. 2010. Т. 44. С. 3.
- [3] Соболев Н.А., Калядин А.Е., Коновалов М.В. и др. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 2. С. 241.
- [4] Binetti S., Pizzini S., Leoni E. et al. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. P. 2437.

- [5] *Sauer R., Weber J., Stolz J.* et al. // *Appl. Phys. A.* 1985. V. 36. P. 1.
- [6] *Sobolev N.A., Emel'yanov A.M., Shek E.I.* et al. // *Phys. Stat. Sol. (c)*. 2005. V. 2. P. 1842.
- [7] *Xiang L., Li D., Jin L.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 033 518.
- [8] *Bothe K., Falster R.J., Murphy J.D.* // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101(3). P. 032 107.
- [9] *Michel J., Palm J., Gan F.* et al. // *Mater. Sci. Forum.* 1995. V. 196–201. P. 585.