

Дислокационная люминесценция, возникающая в монокристаллическом кремнии после имплантации ионов кремния и последующего отжига

© Н.А. Соболев[¶], А.М. Емельянов, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, Е.И. Шек, Д.И. Тетельбаум⁺

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

⁺ Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 11 сентября 2006 г. Принята к печати 3 октября 2006 г.)

Установлено, что имплантация ионов кремния с энергией 100 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в выращенный методом бестигельной зонной плавки Si *n*-типа проводимости не приводит к формированию аморфного слоя. Последующий отжиг в хлорсодержащей атмосфере при температуре 1100°C сопровождается появлением дислокационной люминесценции. Интенсивность доминирующей линии D1 с максимумом на длине волны $\sim 1.54 \text{ мкм}$ возрастает с увеличением времени отжига от 15 до 60 мин.

PACS: 61.72.Tt, 78.55.Ap, 78.55.Qr

1. Введение

По сравнению со светодиодами (СД) с краевой или эрбиевой люминесценцией кремниевые СД с дислокационной люминесценцией характеризуются наилучшим сочетанием таких параметров, как внешняя квантовая эффективность электролюминесценции η и быстродействие. Так, на сегодняшний день получены СД с $\eta \approx 0.1\%$ и быстродействием $\sim 2 \text{ мкс}$ [1]. Для создания светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией широко используются методы одноосного сжатия [1], лазерной перекристаллизации [2], жидкофазной эпитаксии [3], деформации путем изгиба [4] и формирования кислородных преципитатов [5]. Неоднородное введение структурных дефектов по площади образца, низкая воспроизводимость процессов и образование достаточно большого количества центров, излучающих в диапазоне 1.1–1.6 мкм (целая серия линий, получивших названия D1–D15 [2–6]), в той или иной степени присущи этим методам. Предложенный и достаточно подробно исследованный нами способ создания СД с дислокационной люминесценцией, основанный на имплантации высокоэнергетических ($\sim 1 \text{ МэВ}$) тяжелых ионов эрбия и последующего высокотемпературного отжига в окисляющей атмосфере [7,8], свободен от вышеуказанных недостатков и сопровождается появлением только двух линий — D1 ($\sim 1.54 \text{ мкм}$) и D2 ($\sim 1.42 \text{ мкм}$). Несомненный интерес представляет исследование возможности получения светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией методом имплантации относительно легких ионов. Недавно нами было обнаружено возникновение дислокационной люминесценции в Si после имплантации ионов кислорода с энергиями 100–1500 кэВ и последующего отжига в хлорсодержащей атмосфере при

температуре 900°C в течение 4 ч [9]. При ионном облучении кремния сверхбольшими дозами ионов инертных газов (на примере Ne) обнаружена фотолюминесценция (ФЛ) в диапазоне длин волн 700–1000 нм [10], свидетельствующая о формировании нанокристаллической структуры, что должно способствовать образованию при отжиге протяженных дефектов. Подобная структура может формироваться и при имплантации ионов Si. Цель настоящей работы заключалась в исследовании возможности создания светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией с помощью имплантации ионов Si.

2. Экспериментальные условия

Имплантация ионов кремния с энергией 100 кэВ (проецированная длина пробега $R_p = 137 \text{ нм}$) и дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ проводилась в пластины выращенного методом бестигельной зонной плавки Si *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Температура мишени не превышала 50°C. Последующий отжиг осуществлялся в хлорсодержащей атмосфере при температуре 1100°C в течение времени 15–60 мин. Хлорсодержащая атмосфера представляла собой поток кислорода, насыщенный парами четыреххлористого углерода с концентрацией 0.5 мол%. Использовались пластины с полированной поверхностью и ориентацией поверхности (100).

Дефектная структура образцов исследовалась методом обратного рассеяния протонов с энергией 231 кэВ. Измерение энергетических спектров обратно рассеянных протонов проводилось в случайном и каналирующем режимах. ФЛ в диапазоне длин волн 1.00–1.65 мкм измерялась при температуре 78 К с помощью автоматизированного монохроматора МДР-23, InGaAs-фотодиода и селективного вольтметра. Фотолюминесценция возбу-

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

ждалась излучением красного СД марки У-336Б мощностью 400 мВт. Спектральное разрешение системы составляло 7 нм. Спектры были скорректированы с учетом спектральной характеристики фотоприемника и всего оптического тракта.

3. Результаты и обсуждение

Спектры обратного рассеяния протонов в образце после имплантации ионов кремния, измеренные в случайном и каналирующем режимах, приведены на рис. 1 (кривые 1 и 2). Анализ спектров показывает, что аморфизации имплантированного слоя не происходит: уровень имплантационных нарушений, характеризующийся отношением измеренных в каналирующем и случайном режимах интенсивностей, составляет $\sim 80\%$. Поскольку пороговая доза аморфизации для ионов кремния с

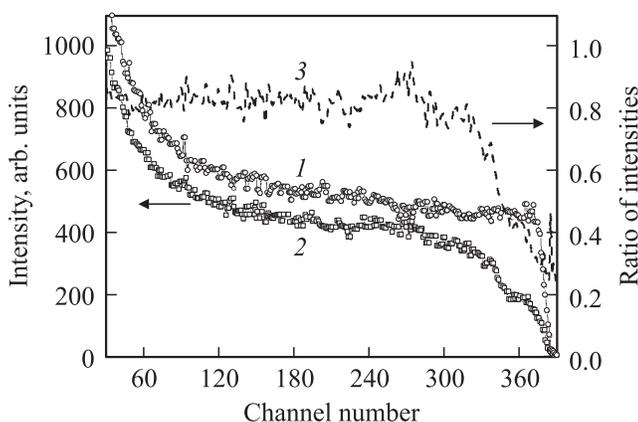


Рис. 1. Спектры обратного рассеяния протонов в образце после имплантации ионов кремния, измеренные в случайном (1) и каналирующем (2) режимах (левая шкала). 3 — отношение интенсивностей, измеренных в каналирующем и случайном режимах (правая шкала).

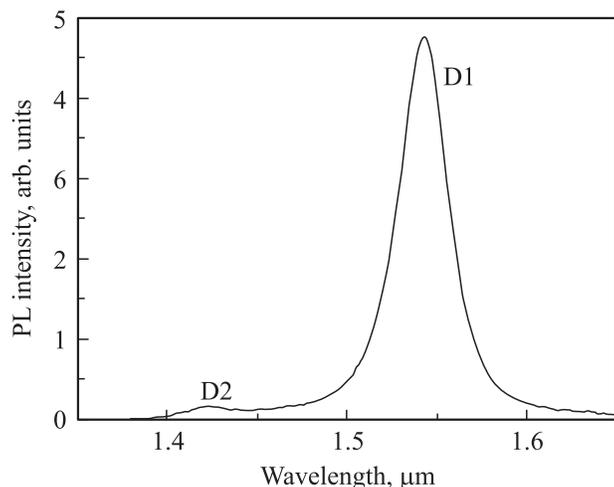


Рис. 2. Спектр фотолуминесценции (PL) образца после имплантации ионов кремния и отжига при 1100°C в течение 0.5 ч.

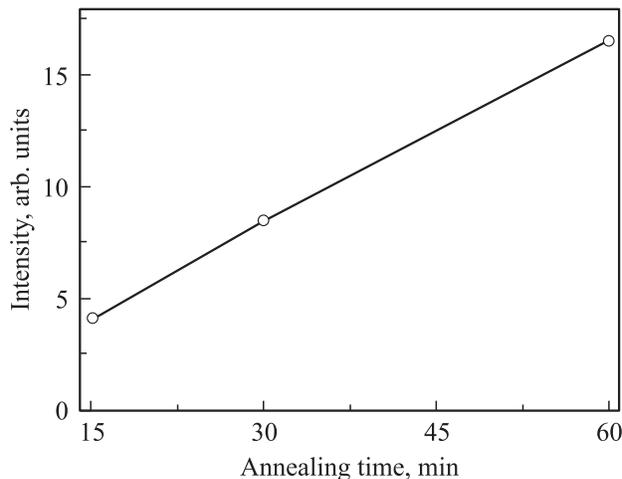


Рис. 3. Зависимость интенсивности линии D1 от времени отжига.

энергией ~ 100 кэВ составляет $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ [11], это достаточно неожиданный результат, который нуждается в дальнейшем изучении. Ранее отсутствие аморфизации при сверхбольших дозах („эффект больших доз“) было обнаружено и обсуждалось в случае имплантации ионов III и V групп Периодической таблицы Д.И. Менделеева [12,13].

Спектр ФЛ образца после имплантации ионов кремния и отжига при 1100°C в течение 0.5 ч представлен на рис. 2. Наблюдаются две линии с максимумами при 1.542 и 1.422 мкм, принадлежащие так называемым D1- и D2-центрам [7]. Важно отметить, что, как и в случае имплантации ионов Er [7] и (или) кислорода [9], происходит образование только D1- и D2-центров и не наблюдается введения других связанных с появлением дислокаций линий, например D3 и D4, как в случаях деформации [1,4] или формирования кислородных преципитатов [5].

Зависимость интенсивности доминирующей линии D1 от времени отжига показана на рис. 3. Имеет место практически линейное возрастание интенсивности ФЛ с увеличением времени отжига от 15 до 60 мин. Наличие линий дислокационной люминесценции во всех образцах позволяет предположить, что имплантация ионов кремния и последующий отжиг приводят к введению протяженных структурных дефектов, которые образуют оптически активные центры или способствуют их образованию. Причем линейная зависимость интенсивности ФЛ от времени отжига указывает, что при увеличении времени отжига растет концентрация люминесцентных центров. Конечно, эти центры могут отличаться от центров, образующихся в случае имплантации ионов Er [7] или кислорода [9]. Природу образующихся протяженных структурных дефектов, механизмы их формирования и трансформации в процессе отжигов предстоит выяснить в дальнейшем.

4. Заключение

Таким образом, обнаружено, что имплантация при комнатной температуре ионов кремния с дозой, превышающей порог аморфизации на несколько порядков, не приводит к аморфизации подложки Si. Последующий отжиг в хлорсодержащей атмосфере при температуре 1100°C в течение 15–60 мин приводит к появлению двух линий дислокационной люминесценции с максимумами на длинах волн ~ 1.54 и ~ 1.42 мкм. Интенсивность доминирующей линии D1 линейно возрастает со временем отжига.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 04-02-16935 и № 04-02-16493) и Регионального центра коллективного пользования „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Список литературы

- [1] V. Kveder, V. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Zeibt, W. Schreter. Appl. Phys. Lett., **84**, 2106 (2004).
- [2] E.O. Sveinbjornsson, J. Weber. Appl. Phys. Lett., **69**, 2686 (1996).
- [3] S. Binetti, M. Donghi, S. Pizzini, A. Castaldini, A. Cavallini, B. Fraboni, N.A. Sobolev. Sol. St. Phenomena, **57–58**, 197 (1997).
- [4] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, O.V. Feklisova, E.B. Yakimov, T.V. Kotereva. Phys. Status Solidi C, **2**, 1842 (2005).
- [5] S. Pizzini, E. Leonti, S. Binetti, M. Acciarri, A. Le Donne, B. Pichaud. Sol. St. Phenomena, **95–96**, 273 (2004).
- [6] R. Sauer, J. Weber, J. Stolz, E.R. Weber, K.-H. Küsters, H. Alexander. Appl. Phys. A, **36**, 1 (1985).
- [7] N.A. Sobolev, O.B. Gusev, E.I. Shek, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, A.M. Emel'yanov. Appl. Phys. Lett., **72**, 3326 (1998).
- [8] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, Yu.A. Nikolaev, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, M.I. Makovijchuk, E.O. Parshin, S. Pizzini. Mater. Sci. Eng. B, **91–92**, 167 (2002).
- [9] Н.А. Соболев, Б.Я. Бер, А.М. Емельянов, А.П. Коварский, Е.И. Шек. ФТП, **41** (3), 295 (2007).
- [10] А.А. Ежеский, М.Ю. Лебедев, С.В. Морозов. ФТТ, **47**, 22 (2005).
- [11] Е.И. Зорин, П.В. Павлов, Д.И. Тетельбаум. *Ионное легирование полупроводников* (М., Энергия, 1975).
- [12] Н.Н. Герасименко, А.В. Двуреченский, С.И. Романов, Л.С. Смирнов. ФТП, **7**, 2195 (1973).
- [13] Д.И. Тетельбаум, А.И. Герасимов. ФТП, **38**, 1301 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Dislocation-related luminescence in single crystal silicon caused by silicon ion implantation and subsequent annealing

N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, E.I. Shek, D.I. Tele'baum⁺

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ Physical Technical Research Institute
of Nizhnii Novgorod State University,
603950 Nizhnii Novgorod, Russia

Abstract Implantation of silicon ions with an energy of 100 keV and a dose of $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ into float zone *n*-Si was found to do not result in the formation of an amorphous layer. Subsequent annealing in a chlorine containing atmosphere at temperature of 1100°C leads to the appearance of dislocation-related luminescence. An intensity of the dominant D1 line with a maximum at a wavelength of $\sim 1.54 \mu\text{m}$ increases with an increasing annealing time from 15 through 60 min.