

УДК 621.315.592

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ D1 В КРЕМНИИ, ПОДВЕРГНУТОМ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Si⁺, И МОДЕЛЬ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

© 2014 г. С. Н. Нагорных¹, В. И. Павленков², Д. И. Тетельбаум³,
А. Н. Михайлов³, А. И. Белов³, Д. С. Королев¹, А. Н. Шушунов³,
А. И. Бобров¹, Д. А. Павлов¹, Е. И. Шек⁴

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
ул. Минина, д. 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

²Арзамасский филиал Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
ул. К. Маркса, д. 36, г. Арзамас, Нижегородская область, 607220, Россия

³Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
просп. Гагарина, д. 23, корп. 3, Нижний Новгород, 603950, Россия

⁴Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
Политехническая ул., д. 26, 194021, Санкт-Петербург, Россия

Путем последовательного удаления слоев с кремния, в котором наблюдается дислокационная фотолюминесценция после ионной имплантации Si⁺ (100 кэВ, $1 \cdot 10^{15}$ см⁻²) с последующим высокотемпературным отжигом в хлорсодержащей атмосфере, установлено, что основная доля центров дислокационной люминесценции при ~1,5 мкм (линия D1) сосредоточена в области пробега ионов Si⁺. Методом электронной микроскопии поперечного среза показано, что введенные имплантационной обработкой (имплантация и последующий отжиг) дислокации проникают до глубин ~1 мкм. Предложена феноменологическая модель дислокационной фотолюминесценции для линии D1, базирующаяся на предположении, что за эту линию ответственны расположенные в атмосферах дислокаций К-центры и модифицированные А-центры. Температурная зависимость интенсивности линии D1, рассчитанная на основе модели, описывает экспериментальные данные.

Ключевые слова: кремний, ионная имплантация, дислокации, дислокационная люминесценция, модель фотолюминесценции

Введение

Среди многочисленных задач современной электроники и коммуникационной техники актуальной проблемой является создание на базе кремния источника излучения с длиной волны $\lambda \sim 1,5$ мкм, т. е. в области минимального поглощения в кварцевых световодах. Предложено несколько подходов к решению этой проблемы. Один из наиболее совместимых с традиционной технологией микроэлектроники подходов — это формирование в кремнии систем дислокаций путем ионной имплантации с последующим высокотемпературным отжигом в окислительной атмосфере [1].

Теоретическому и экспериментальному исследованию дис-

локационной люминесценции (ДЛ) посвящено достаточно большое число работ (см., например, обзор [1]). Несмотря на это, ясность в вопросе механизма ДЛ до сих пор не достигнута, особенно в отношении линии люминесценции D1 ($\lambda = 1,5$ мкм).

Ранее было установлено, что одним из эффективных ионно-лучевых способов создания структур с ДЛ является имплантация в кремний ионов Si⁺ средних энергий [2—4]. Изучены спектры фотолюминесценции, зависимость интенсивности люминесценции от интенсивности накачки, дозы ионов, термического бюджета при отжигах, а также роль стабилизации температуры во время облучения. Методом просвечивающей электронной микроскопии определена

Нагорных Сергей Николаевич¹ — доцент, к.ф.-м.н., e-mail: algoritm@sandy.ru; **Павленков Владимир Иванович**² — зам. декана, к.ф.-м.н., e-mail: pavlenkov.arz@rambler.ru; **Тетельбаум Давид Исаакович**³ — ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., e-mail: tetelbaum@phys.unn.ru; **Михайлов Алексей Николаевич**³ — зав. лабораторией, к.ф.-м.н., e-mail: mian@nifti.unn.ru; **Белов Алексей Иванович**³ — научный сотрудник, к.ф.-м.н., e-mail: belov@nifti.unn.ru; **Королев Дмитрий Сергеевич**¹ — ассистент, аспирант, e-mail: dmkorolev@mail.ru; **Шушунов Андрей Николаевич**³ — младший научный сотрудник, e-mail: anshu@nifti.unn.ru; **Бобров Александр Игоревич**¹ — инженер, аспирант, e-mail: bobrov@phys.unn.ru; **Павлов Дмитрий Алексеевич** — зав. кафедрой, д.ф.-м.н., e-mail: pavlov@unn.ru; **Шек Елена Ильинична**⁴ — старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., e-mail: shek@pop.ioffe.rssi.ru

структура имплантированных слоев [5]; исследовано также влияние дополнительного ионного легирования на структуру и ДЛ после постимплантационного высокотемпературного отжига [4].

Хотя связь линии D1 с наличием дислокаций не вызывает сомнений, существует обоснованное мнение, что за эту линию ответственны не сами дислокации (по крайней мере, не только они), а те или иные точечные дефекты в атмосферах или на ядрах дислокаций — центры дислокационной люминесценции (ЦДЛ) [6, 7].

В случае имплантации Si^+ и отжигов в окислительной атмосфере, когда в приповерхностном слое кремния присутствуют собственные межузельные атомы (СМА), наиболее вероятными кандидатами в компоненты ЦДЛ являются СМА и атомы кислорода. А из других элементов — углерод как постоянная фоновая примесь и, возможно, водород. Исходное распределение СМА в случае имплантации Si^+ совпадает с распределением имплантированных ионов. Система дислокаций в подвергнутых имплантации образцах формируется в основном в процессе отжига и проникает на большую глубину. В этом случае для суждения о природе ЦДЛ полезную информацию

может дать изучение распределения интенсивности ДЛ по глубине.

Цель работы — исследование изменения интенсивности ДЛ кремния, подвергнутого ионной имплантации Si^+ с последующим отжигом в окислительной хлорсодержащей атмосфере (ХСА), сравнение этого распределения с исходным распределением ионов Si^+ и найденным методом электронной микроскопии пространственным положением дислокаций.

Образцы и методы исследования

Использовали образцы кремния марки КЭФ-4,5 с ориентацией поверхности (001). Поверхность подвергали химико-механической полировке в режиме, который применяют для подготовки подложек, предназначенных для эпитаксии. Образцы имплантировали ионами Si^+ с энергией 100 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на установке ИЛУ-200. Принимали меры для устранения возможности нагрева образцов ионным пучком. При этом температура при имплантации не превышала комнатную более чем на 10°C . По данным обратного резерфордского рассеяния [3], при близких режимах достигалась аморфизация облученного слоя. После имплантации образцы отжигали в ХСА при 1373 К в течение 30 мин. Толщина окисленного при отжиге слоя составляла $\sim 100 \text{ нм}$, что соответствует толщине слоя кремния, вошедшего в состав оксида, $\sim 40 \text{ нм}$.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измеряли при 77 К с использованием полупроводникового лазера, излучающего на длине волны 985 нм. Мощность лазерного излучения составляла $\sim 0,5 \text{ Вт}$.

Послойное химическое травление проводили в полирующем травителе состава $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} (40 : 1 : 1)$. Толщину стравленных слоев определяли по высоте ступеньки методом атомно-силовой микроскопии.

Структуру имплантированных образцов исследовали методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (СПЭМ) поперечного сечения на микроскопе JEOL JEM-2100F, работающем при ускоряющем напряжении 200 кэВ. Подготовку поперечного среза проводили по стандартной технологии на оборудовании фирмы Gatan.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а приведена зависимость интенсивности линии D1 ДЛ от толщины удаленного с поверхности слоя. Интенсивность линии D1 резко снижается после удаления слоя толщиной $\sim 150 \text{ нм}$. С учетом слоя Si, вошедшего в состав оксида, это значение близко к глубине залегания максимума концентрации атомов имплантированного Si без учета их перераспределения при отжиге (рис. 1, б). На той же глубине наблюдается минимальная скорость травления. Приведенные данные по ДЛ свидетельствуют о том, что большая часть ЦДЛ, излучающих линию D1,

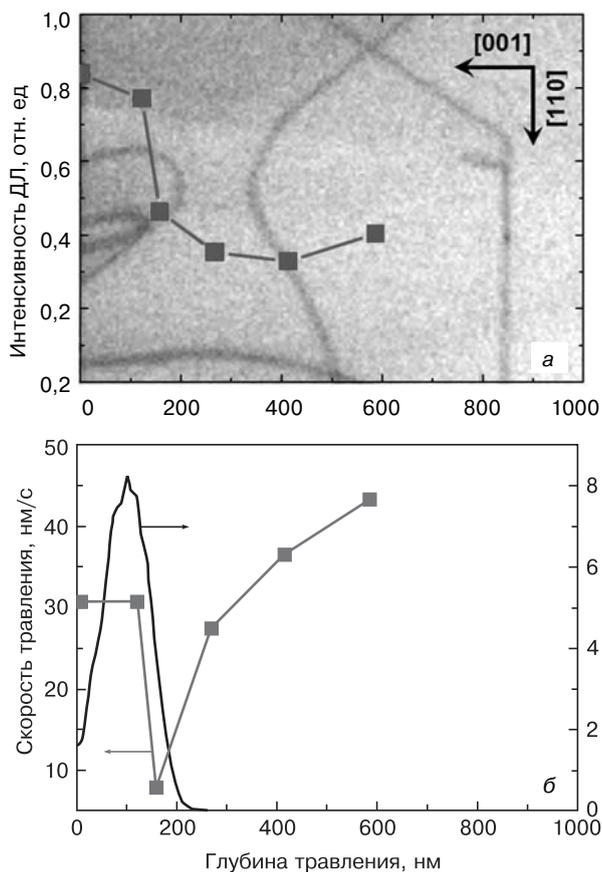


Рис. 1. Зависимость интенсивности линии D1 ДЛ от глубины травления, совмещенная с изображением СПЭМ, (а) и зависимость скорости травления от глубины, совмещенная с расчетным распределением имплантированного кремния (б) [9]

Fig. 1. (a) DL D1 Line Intensity as a Function of Etching Depth Superimposed with the STEM Image and (b) Etching Rate vs Depth Superimposed with the Simulated Implanted Silicon Distribution

формируется в непосредственной близости от мест остановки имплантированных атомов. Поскольку на тех же глубинах до отжига и в начальной стадии отжига максимальна концентрация СМА, естественно предположить, что СМА входят в состав ЦДЛ. Тот факт, что на той глубине, где расположен максимум концентрации имплантированных атомов Si, происходит также замедление процесса травления, можно объяснить следующим образом. Первый этап химического травления — это окисление за счет реакции между кремнием и травителем [8]. Окисление сопровождается генерацией СМА [8], которые для продолжения процесса должны отводиться из зоны реакции. По-видимому, наличие исходного пере-сыщения по СМА тормозит реакцию окисления при травлении. Это торможение наиболее выражено в области максимума распределения СМА, что и приводит к наличию «провала» на зависимости скорости травления от глубины.

На рис. 1, а также приведено полученное методом СПЭМ изображение поперечного среза образца, подвергнутого имплантации Si^+ и последующему отжигу. На рис. 1, а видны дислокации на разных глубинах, простирающиеся до глубины 0,85 мкм. Вероятно, именно в атмосферах переползающих дислокаций находятся упомянутые выше ЦДЛ. Сопоставляя СПЭМ-изображение с распределением интенсивности ДЛ (см. рис. 1, а), можно сделать предположение, что лишь малая доля запасенных в процессе имплантации СМА при отжиге продиффундировала на глубины до ~1 мкм и была захвачена проникающими до этих глубин дислокациями. Остальные СМА захватываются полями упругих напряжений сегментов дислокаций, находящихся вблизи области пробега ионов, и там входят в состав образующихся малоподвижных ЦДЛ.

Таким образом, СМА играют двоякую роль: они обеспечивают переползание дислокаций и форми-

рование дефектных комплексов ЦДЛ в атмосферах дислокаций. Окислительная атмосфера при отжиге поддерживает избыток СМА. Присутствие хлора в ХСА приводит к очистке поверхности от «случайных» примесей типа металлов и инъекции вакансий [10], которые, как об этом сказано ниже, также входят в состав ЦДЛ.

Чтобы пролить свет на природу ЦДЛ (в отсутствие соответствующих данных для случая имплантации ионов Si^+), воспользовались экспериментальной температурной зависимостью, которая была получена для полосы D1 ДЛ. Спектр этой полосы представлен в работе [11] для кремния, имплантированного ионами Er^+ и отожженного приблизительно в тех же условиях, что и наши образцы. Эту зависимость попытались аппроксимировать кривой, рассчитанной по приведенной ниже модели.

Предположим, что в качестве ЦДЛ служат К-центр (V_2CO_i) и модифицированный А-центр (VOH_2), сведения о которых приведены в работе [12]. Примесно-дефектный состав указанных центров не противоречит условиям экспериментов:

- кислород и водород содержатся в исходных образцах и могут проникать из атмосферы отжига;
- углерод — постоянная неконтролируемая примесь в кремнии и может вноситься также при имплантации в условиях не слишком высокого вакуума (как, впрочем, и водород);
- вакансии и СМА генерируются при имплантации (вакансии, как указано выше, инжектируются также при отжиге в ХСА).

Согласно работе [12], К-центр и модифицированный А-центр создают один и тот же уровень в запрещенной зоне кремния ($E_c - 0,31$ эВ). Для совпадения теоретической кривой с расчетной предположили, что положения уровней К-центра и модифицированного А-центра не совсем одинаковы и различаются приблизительно на 0,01 эВ. Это предположение не противоречит данным работы [12] с учетом погрешностей и того факта, что ЦДЛ расположены в атмосферах дислокаций. Использование в качестве «кандидатов» в ЦДЛ других центров [12] не дает согласия со спектральным положением линии D1.

Система энергетических уровней, участвующих в процессе ДЛ, с учетом термовозбуждений представлена на рис. 2. Здесь уровень 1 совпадает с потолком валентной зоны, уровни 2 и 3 относятся к указанным выше дефектам. Уровень 4 совпадает с дном зоны проводимости. Стрелками на рис. 2 указана предполагаемая схема переходов. Переходы $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$ происходят с вероятностями A_{12} и A_{13} , зависящими от интенсивности лазерной накачки, и соответствуют забросу электрона при возбуждении лазером на некоторый высоколежащий уровень с последующим быстрым безызлучательным переходом (в общем случае многоступенчатым) на уровни 2 и 3. Переходы $2 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 4$ и $3 \rightarrow 4$ являются термоактивационными и характеризуются кинетическими коэффициентами

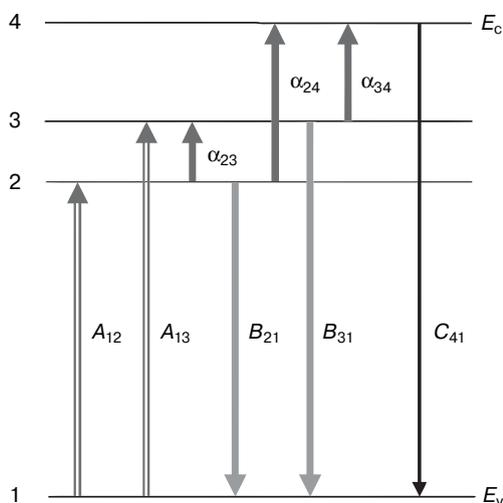


Рис. 2. Схема энергетических уровней в кремнии, принятая при интерпретации температурной зависимости ДЛ (линия D1)

Fig. 2. Energy Diagram of Silicon Accepted for the Interpretation of the DL Temperature Function (D1 line)

$$\alpha_{23} = P_{23} \exp(-E_{23}/kT); \alpha_{24} = P_{24} \exp(-E_{24}/kT);$$

$$\alpha_{34} = P_{34} \exp(-E_{34}/kT),$$

где E_{23}, E_{24}, E_{34} — разности энергий соответствующих уровней; P_{23}, P_{24}, P_{34} — не зависящие от температуры параметры; T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана. Переход $4 \rightarrow 1$ считаем не зависящим от температуры.

Будем полагать, что наблюдаемая ДЛ есть суперпозиция излучательных переходов с уровней 2 и 3 в валентную зону с кинетическими коэффициентами B_{21} и B_{31} соответственно, и межзонный переход с уровня 4 на уровень 1 происходит с кинетическим коэффициентом C_{41} . Межцентровые переходы $2 \rightarrow 3$ играют существенную роль при условии достаточно большой локальной плотности ЦДЛ вблизи дислокаций. Тогда для уровней 2 и 3 можно записать следующую систему кинетических уравнений:

$$\dot{N}_2 = A_{12}N_1 - \alpha_{23}N_2 - \alpha_{24}N_2 - B_{21}N_2; \quad (1)$$

$$\dot{N}_3 = A_{13}N_1 + \alpha_{23}N_2 - \alpha_{34}N_3 - B_{31}N_3, \quad (2)$$

где N_1, N_2, N_3 — число соответствующих центров.

Выражение для интенсивности ДЛ как функции температуры имеет вид

$$I(T) = I_{21}(T) + I_{31}(T) = B_{21}N_2 + B_{31}N_3. \quad (3)$$

Это справедливо, если разрешающая способность используемой измерительной аппаратуры не позволяет разделить линии, соответствующие переходам $2 \rightarrow 1$ и $3 \rightarrow 1$, или если измеряется суммарная интенсивность ДЛ для указанных переходов.

Решение системы (1)—(2) при значениях $E_{23} = 0,014$ эВ, $E_{34} = 0,305$ эВ и подстановка его в уравнение (3) дает зависимость интенсивности ДЛ (линия D1) от температуры, приведенную на рис. 3 (см. третью стр. обложки). На рис. 3 также приведены кривые температурных зависимостей ФЛ, соответствующих переходам $2 \rightarrow 1$ и $3 \rightarrow 1$. При компьютерном расчете коэффициенты уравнений варьировали таким образом, чтобы получить наилучшее совпадение с экспериментальной кривой. Из рис. 3 видно, что теоретическая кривая удовлетворительно аппроксимирует экспериментальную. Это свидетельствует в пользу правильности выбора указанных дефектов в качестве «кандидатов» в ЦДЛ. Представление линии D1 в виде суперпозиции двух пиков позволяет также объяснить наблюдавшийся экспериментально немонокотонный сдвиг спектрального положения максимума D1. Это — следствие изменения с температурой соотношения интенсивностей переходов $2 \rightarrow 1$ и $3 \rightarrow 1$ (см. рис. 3, третья стр. обложки).

Заметим, что, в отличие от работы [6] и ряда других работ (см. обзор [1]), в предложенной модели не фигурируют одномерные энергетические зоны, связанные с ядром дислокации. Энергетические по-

ложения таких зон должны зависеть от типа дислокаций, а следовательно, от способа их введения, тогда как положения линии D1 практически одинаковы при различных способах [10]. Роль дислокаций в формировании ЦДЛ состоит в том, что поля упругих напряжений дислокаций служат средством «сбора» подвижных точечных дефектов (примесей) и закрепления их в виде неподвижных дефектных комплексов.

Более строгая теория ДЛ требует учета диффузии (дрейфа) носителей заряда в электрических и упругих полях дислокационных атмосфер в процессе возбуждения, возможных сдвигов энергетических уровней в этих полях, рассмотрения квантовых фононных процессов, вариации уровня Ферми и др. Предложенную здесь феноменологическую модель ДЛ следует рассматривать как первое приближение.

Заключение

Установлено, что в кремнии, в котором дислокационная люминесценция D1 получена путем имплантации ионов Si^+ с энергией 100 кэВ с последующим высокотемпературным отжигом, центры ФЛ сосредоточены преимущественно в области распределения пробегов ионов (на глубине ~ 150 нм), тогда как дислокации, введенные путем имплантационной обработки и отжига, проникают до глубины ~ 1 мкм. Предложено качественное объяснение этого различия.

Предложена феноменологическая модель дислокационной ФЛ D1. Предположено, что за линию D1 ответственны находящиеся в дислокационных атмосферах дефектные комплексы (К-центры и модифицированные А-центры), содержащие собственные дефекты (вакансии, межузельные атомы) и атомы примесей (углерод, кислород, водород). Результаты расчетов по этой модели согласуются с экспериментальными данными по температурной зависимости интенсивности и положения максимума линии D1 для кремния, имплантированного ионами эрбия.

Библиографический список

1. **Соболев, Н. А.** Инженерия дефектов в имплантационной технологии кремниевых светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией (Обзор) / Н. А. Соболев // ФТП. — 2010. — Т. 44, № 1. — С. 3—25.
2. **Соболев, Н. А.** 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 // ФТП. — 2007. — Т. 41, № 5. — С. 555—557.
3. **Соболев, Н. А.** Фотолуминесценция в кремнии, имплантированном ионами кремния с аморфизирующими дозами / Н. А. Соболев, А. Е. Калядин, Р. Н. Кютт, В. И. Сахаров, И. Т. Серенков, Е. И. Шек, В. В. Афросимов, Д. И. Тетельбаум // ФТП. — 2011. — Т. 45, № 9. — С. 1182—1187.
4. **Михайлов, А. Н.** Влияние ионного легирования на фотолуминесценцию в кремнии, связанную с дислокациями, сформированными путем имплантации ионов Si^+ / А. Н. Михайлов, А. И. Белов, Д. С. Королев, А. О. Тимофеева, В. К. Васильев, А. Н. Шушунов, А. И. Бобров, Д. А. Павлов, Д. И. Тетельбаум, Е. И. Шек // ФТП. — 2014. — Т. 48, № 2. — С. 212—216.
5. **Sobolev, N. A.** Luminescent and structural properties of self-implanted silicon layers in relation to their fabrication conditions /

N. A. Sobolev, A. E. Kalyadin, E. I. Shek, V. I. Vdovin, D. I. Tetel'baum, L. I. Khirunenko // *Solid State Phenomena*. – 2011. – V. 178/179. – P. 341–346. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.178–179.341

6. Осипьян, Ю. А. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / Ю. А. Осипьян. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 320 с.

7. Blumenau, A. T. Dislocation related photoluminescence in silicon / A. T. Blumenau, R. Jones, S. Öberg, P. R. Briddon, T. Frauenheim // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 87. – P. 187404.

8. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви. – М.: Мир, 1984. – 475 с.

9. Ziegler, J. F. SRIM — The stopping and range of ions in matter (2010) / J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*. – 2010. – V. 268. – P. 1818–1823.

10. Соболев, Н. А. Инженерия дефектов в технологии полупроводников / Н. А. Соболев. – М.: Lambert Academic Publishing, 2011. – 252 с.

11. Соболев, Н. А. Кремниевые светодиоды с дислокационной люминесценцией при комнатной температуре, изготовленные имплантацией ионов эрбия и газофазного осаждения поликристаллических слоев кремния, сильно легированных фосфором и бором / Н. А. Соболев, А. М. Емельянов, В. В. Забродский, Н. В. Забродская, В. Л. Суханов, Е. И. Шек // *ФТП*. – 2007. – Т. 41, № 5. – С. 635–638.

12. Долголенко, А. П. Электронные уровни конфигураций дивакансий в кремнии / А. П. Долголенко // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2012. – Вып. 5(81). – С. 13–20.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 12–02–00980 и частично поддержано в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России (задание № 3.285.2014/К).

Статья поступила в редакцию 26 августа 2014 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronic Technics*. 2014, vol. 17, no. 4, pp. 252–256.

Distribution of D1 Dislocation Luminescence Centers in Si⁺-Implanted Silicon and the Photoluminescence Model

Sergey Nikolaevich Nagornykh¹ — Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.–Math.) (algorithm@sandy.ru); **Vladimir Ivanovich Pavlenkov**² — Deputy Dean, Cand. Sci. (Phys.–Math.) (pavlenkov.arz@rambler.ru); **David Isaakovich Tetelbaum**³ — Leading Researcher, Dr. Sci. (Phys.–Math.) (tetelbaum@phys.unn.ru); **Aleksey Nikolaevich Mikhailov**³ — Head of Laboratory, Cand. Sci. (Phys.–Math.) (mian@nifti.unn.ru); **Aleksey Ivanovich Belov**³ — Researcher, Cand. Sci. (Phys.–Math.) (belov@nifti.unn.ru); **Dmitry Sergeevich Korolev**¹ — Assistant, Postgraduate Student (dmkorolev@mail.ru); **Andrey Nikolaevich Shushunov**³ — Junior Researcher (anshu@nifti.unn.ru); **Aleksandr Igorevich Bobrov**¹ — Engineer, Postgraduate Student (bobrov@phys.unn.ru); **Dmitry Alekseevich Pavlov**¹ — Head of Department, Dr. Sci. (Phys.–Math.) (pavlov@unn.ru); **Elena Il'ichna Shek**⁴ — Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.–Math.) (shek@pop.ioffe.rssi.ru).

¹R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24 Minina Str., Nizhny Novgorod 603950, Russia

²Arzamas Branch of the N. I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 36 K. Marx Str., Arzamas, Nizhny Novgorod Region 607220, Russia

³Physical and Technical Research Institute at the N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 23 Bldg 3, Gagarina Ave., Nizhny Novgorod 603950, Russia

⁴A.F. Ioffe Physical–Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, 26 Politekhnicheskaya Str., St. Petersburg 194021, Russia

Abstract. Using step-by-step removal of silicon layers, in which dislocation-related photoluminescence is observed after Si⁺ (100 keV, 1·10¹⁵ cm⁻²) ion implantation followed by high-temperature annealing in a chlorine-containing atmosphere, it has been found that a majority of dislocation-related centers of luminescence at ~ 1,5 μm (D1 line) is localized at the depths of Si⁺ ion ranges. Cross-sectional electron microscopy shows that the dislocations introduced by the implantation treatment (implantation plus annealing) penetrate to depths of ~ 1 μm. A phenomenological model of the D1-line dislocation-related luminescence is developed based on the assumption that the K-centers and modified A-centers located in the atmospheres of dislocations are responsible for this luminescence line. The temperature dependence of luminescence intensity calculated on the basis of the model fits well the experimental data for the D1 line.

Keywords: silicon, ion implantation, dislocations, dislocation luminescence, photoluminescence model.

References

1. Sobolev N. A. Defect engineering in the implantation-based technology of silicon light-emitting structures with dislocation-related luminescence (Review). *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov = Semiconductors*, 2010, vol. 44, no. 1. pp. 3–25. (In Russ.)

2. Sobolev N. A., Emel'yanov A. M., Sakharov V. I., Serenkov I. T., Shek E. I., Tetel'baum D. I. Dislocation-related luminescence in single crystal silicon caused by silicon ion implantation and subsequent annealing. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov = Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 5. pp. 555–557. (In Russ.)

3. Sobolev N. A., Kalyadin A. E., Kyutt R. N., Sakharov V. I., Serenkov I. T., Shek E. I., Afrosimov V. V., Tetel'baum D. I. Photoluminescence in silicon implanted by silicon ions at amorphizing doses. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov = Semiconductors*, 2011, vol. 45, no. 9. pp. 1182–1187. (In Russ.)

4. Mikhailov A. N., Belov A. I., Korolev D. S., Timofeeva A. O., Vasiliev V. K., Shushunov A. N., Bobrov A. I., Pavlov D. A., Tetel'baum D. I., Shek E. I. Effect of ion doping on photoluminescence of silicon originated from dislocations formed by Si⁺ ion implantation. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov = Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 2, pp. 212–216. (In Russ.)

5. Sobolev N. A., Kalyadin A. E., Shek E. I., Vdovin V. I., Tetel'baum D. I., Khirunenko L. I. Luminescent and structural properties of self-implanted silicon layers in relation to their fabrication conditions. *Solid State Phenomena*, 2011, vol. 178/179, pp. 341–346. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.178–179.341

6. Osipyayn Yu. A. *Elektronnyye svoystva dislokatsii v poluprovodnikakh* [Electronic properties of dislocations in semiconductors]. Moscow: Editorial URSS, 2000. 320 p. (In Russ.)

7. Blumenau A. T., Jones R., Öberg S., Briddon P. R., Frauenheim T. Dislocation related photoluminescence in silicon. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 87, pp. 187404.

8. Reivi K. *Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii* [Defects and impurities in semiconductor silicon]. Moscow: Mir, 1984. – 475 p. (In Russ.)

9. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010). *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2010, vol. 268, pp. 1818–1823.

10. Sobolev N. A. *Inzheneriya defektov v tekhnologii poluprovodnikov* [Engineering defects in semiconductor technology]. Moscow: Lambert Academic Publishing, 2011. 252 p. (In Russ.)

11. Sobolev N. A., Emel'yanov A. M., Zabrodskii V. V., Zabrodskaya N. V., Sukhanov V. L., Shek E. I. Silicon light-emitting diodes with dislocation-related luminescence at room temperature prepared by Erbium ion implantation and gaseous-phase evaporation of polycrystalline silicon layers heavily doped with boron and phosphorus. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov = Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 5. pp. 635–638. (In Russ.)

12. Dolgolenko A. P. Electronic configurations of the levels of divacancies in silicon. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie = Problems of atomic science and technology: Physics of radiation damages and effects in solids*. 2012, vol. 5(81), pp. 13–20. (In Russ.)

Acknowledgements. This study was carried out under RFRF Grant No. 12–02–00980 and partially supported by the design section of the State Task of Ministry of Education and Science of Russia (Task No. 3.285.2014/K).

Received August 26, 2014