

УДК 621.315.592

КРЕМНИЕВЫЕ ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ С ЭФФЕКТИВНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИЕЙ НА ДИСЛОКАЦИЯХ

Мудрый А.В.¹, Живулько В.Д.¹, Мофиднахи Ф.¹, Ивлев Г.Д.², Якушев М.В.³, Мартин Р.В.³,
Двуреченский А.В.⁴, Зиновьев В.А.⁴, Смагина Ж.В.⁴, Кучинская П.А.⁴

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

³Университет Страсклайд, г. Глазго, Великобритания

⁴Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия
e-mail: mudryi@physics.by

В кремниевых p-n структурах обнаружена эффективная электролюминесценция в области переходов зона–зона (1,1 эВ) и переходов, обусловленных дислокациями (D1–0,8 эВ), при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Установлено, что люминесценция, обусловленная дислокациями в монокристаллах Si, значительно сильнее, чем собственное межзонное излучение в интервале температур 4,2–300 К. Измерение температурной зависимости интенсивности полосы фотолюминесценции D1 показало, что за излучательную рекомбинацию на дислокациях ответственны два энергетических уровня, расположенных ниже зоны проводимости ($\approx 0,04$ эВ) и выше валентной зоны ($\approx 0,32$ эВ).

Ключевые слова: кремниевые p-n структуры, вольт-амперные характеристики, дислокации, электролюминесценция.

Введение

Как известно, кремний является базовым материалом современной полупроводниковой микро- и оптоэлектроники, и его рыночный сегмент в области электронной индустрии по отношению к другим полупроводниковым материалам составляет $\approx 90\%$ [1]. Поскольку кремний является непрямозонным полупроводником и собственная межзонная излучательная рекомбинация обычно происходит с участием фононов, то он традиционно считается неэффективным люминесцирующим материалом.

Однако в последние годы продемонстрирована высокая внешняя квантовая эффективность (η_{ext}) Si при комнатной температуре в области собственных межзонных переходов $\approx 1,15$ мкм (1,08 эВ), достигающая по разным данным для электролюминесценции (ЭЛ) $\approx 1,0\%$ [2], $\approx 0,85\%$ [3], $\approx 0,1\%$ [4] и для фотолюминесценции (ФЛ) $\approx 6\%$ [5]. Эти значения η_{ext} в Si сопоставимы со значениями η_{ext} в светоизлучающих p-n структурах, создаваемых на

основе прямозонных полупроводников [2]. Кроме этого, было показано, что на основе дислокационной люминесценции в ближней инфракрасной (ИК) области спектра 1,4–1,7 мкм возможно создание высокоэффективных светодиодов с $\eta_{\text{ext}} \approx 0,1\%$ [6]. С учетом вышеизложенного очевидно, что необходимо дальнейшее совершенствование технологии создания кремниевых светоизлучающих p-n структур и определение условий достижения высоких значений η_{ext} .

В настоящей работе приводятся новые данные по изучению процессов излучательной рекомбинации в кремниевых p-n структурах и монокристаллическом Si, содержащем дислокации, при электрической инжекции и лазерном возбуждении, соответственно.

Методика измерения и технология изготовления кремниевых приборных структур

Кремниевые диоды были изготовлены по планарной технологии на основе монокристал-

лических пластин кремния *p*-типа проводимости с концентрацией легирующей акцепторной примеси (бор) $N_a \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Исходные пластины кремния имели толщину 500 мкм и диаметр 40 мм. В одну из таких пластин Si вводились дислокации путем перекристаллизации поверхностной области сфокусированным лучом аргонового лазера, работающим на длине волны $\lambda \approx 488 \text{ нм}$ с мощностью 25 Вт в непрерывном режиме, по методике, предложенной в работе [7].

Перекристаллизация приводила к образованию дислокаций в поверхностном слое 1–3 мкм с плотностью $\leq 10^9 \text{ см}^{-2}$. Кремниевые *p-n* структуры формировались на монокристаллических пластинах с дислокациями и без дислокаций (эталонные диоды). Для создания области *n*-типа проводимости в обе пластины проводилась диффузия фосфора из фосфорного стекла в течение 40 мин при температуре 920 °С с последующим охлаждением пластин Si до 500 °С. Концентрация донорной (фосфор) легирующей примеси по электрическим измерениям с использованием эффекта Холла в *n*-области Si составила $N_d \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Омические контакты с обратной стороны *p*-слоя кремниевой пластины создавались напылением Au, со стороны *n*-слоя – напылением Al. Кремниевые *p-n* структуры имели размер $5 \times 5 \text{ мм}^2$.

Формирование светодиодных структур для измерения электролюминесценции проводилось по обычной технологии мезаструктур с использованием химического травления со стороны *n*-слоя. Рабочая область мезадиода составляла $0,4 \text{ мм}^2$. Вольтамперные характеристики (ВАХ) кремниевых *p-n* структур снимались с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1 (ОАО «МНИПИ», Республика Беларусь). Излучение из центральной области кремниевой мезаструктуры, незакрытой Al, находящейся в фокусе сферического зеркала, собиралось и направлялось на входную щель монохроматора МДР-23У с фокусным расстоянием зеркального объектива $f = 0,6 \text{ м}$, оснащенного дифракционной решеткой 600 штр/мм (обратная линейная дисперсия 26 \AA/мм).

В качестве детекторов оптических сигналов использовался германиевый *p-i-n* фотодетектор, охлаждаемый до температуры жидкого азота $\approx 78 \text{ К}$, а также *p-i-n* фотодиод на основе InGaAs (фирма «Hamamatsu», Япония). Сигналы с фотодетекторов обрабатывались узко-

полосным низкочастотным усилителем и преобразовывались в постоянные сигналы на основе метода синхронного фазового детектирования с последующим аналого-цифровым преобразованием и записью спектров на компьютере. При измерении спектров ФЛ возбуждение неравновесных носителей заряда в монокристаллах Si осуществлялось аргоновым лазером с мощностью до 500 мВт, работающим на длине волны 488 нм. Измерение спектров ФЛ Si и Эл кремниевых *p-n* структур проводилось при температурах 4,2–300 К.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены прямые ветви ВАХ кремниевых *p-n* структур, измеренные при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Прямые ветви ВАХ, обозначенные цифрами 1 и 2 на рисунке 1, относятся к эталонной *p-n* структуре и *p-n* структуре, сформированной на пластине Si с дислокациями, соответственно. Как видно из рисунка 1, ВАХ имеет типичный вид, характерный для стандартных промышленных кремниевых диодов с резкими *p-n* переходами. При понижении температуры от 300 до 78 К наблюдается смещение кривых ВАХ в область более высоких напряжений. Вне зависимости от температуры измерения для прямых токов $> 200 \text{ мА}$ происходит насыщение ВАХ кремниевых *p-n* структур.

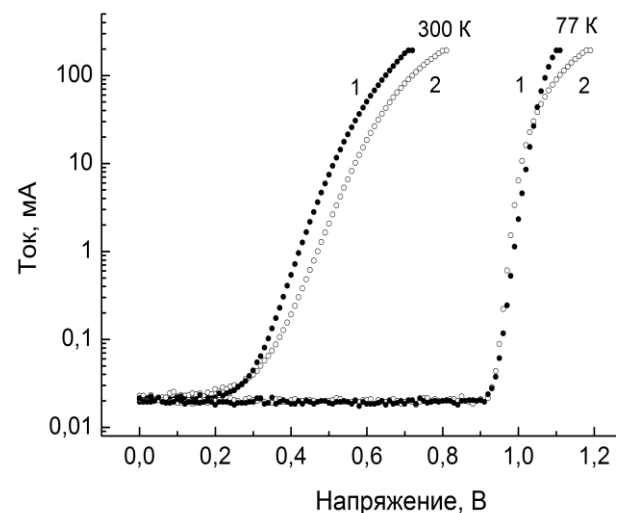


Рисунок 1 – Прямые ветви вольтамперных характеристик светоизлучающих кремниевых *p-n* структур: 1 – эталонная, 2 – с дислокациями

Как показали эксперименты, введение дислокаций в базовые пластины Si ухудшает их электрические характеристики и смещает ВАХ соответствующих $p-n$ структур, по сравнению с ВАХ эталонных $p-n$ структур, (рисунок 1). Отметим, что ВАХ $p-n$ структуры (рисунок 1, кривые 2) измерены для пластин Si с невысокой поверхностной плотностью дислокаций $N_d \approx 6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$. ВАХ эталонных кремниевых $p-n$ структур, изготовленных в настоящей работе, оказались близкими к ВАХ светодиодов с внутренней квантовой эффективностью краевой люминесценции $> 0,4 \%$ [8].

На рисунке 2 приведены спектры ЭЛ эталонного кремниевого $p-n$ диода для температур 78 и 300 К, включенного в прямом направлении при величине тока через диод 10 мА. Как видно из рисунка 2, в спектрах ЭЛ кремниевых $p-n$ структур, снятых при их погружении в жидкий азот ($\approx 78 \text{ К}$), доминирует полоса с максимумом 1,1 эВ ($\approx 1,13 \text{ мкм}$). Полоса 1,1 эВ имеет ассиметричную форму и полуширину $\approx 16 \text{ мэВ}$ при 78 К. Появление полосы с максимумом 1,1 эВ при 78 К обусловлено излучательной рекомбинацией свободных экситонов (FE_{TO}) (энергия связи экситонов $\approx 14,7 \text{ мэВ}$) с одновременным участием поперечных оптических фононов (ТО) с энергией $TO \approx 58 \text{ мэВ}$ [9]. Менее интенсивная широкая полоса с максимумом $\approx 1,04 \text{ эВ}$ обусловлена излучательной рекомбинацией свободных экситонов с участием двух фононов [9].

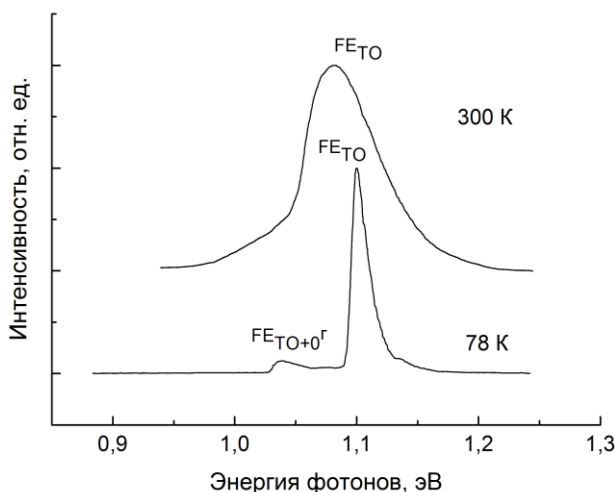


Рисунок 2 – Спектры электролюминесценции эталонных кремниевых $p-n$ структур, измеренные при прямом токе 10 мА для различных температур. Спектральное разрешение 3 нм

Эксперименты показали, что по мере повышения температуры от 78 К до комнатной температуры происходит увеличение интегральной интенсивности ЭЛ, смещение максимума полосы межзонной рекомбинации до 1,08 эВ ($\approx 1,15 \text{ мкм}$) и ее уширение до 67 мэВ (рисунок 2). Установлено, что смещение максимума полосы люминесценции относительно его положения при 78 К составляет $\approx 19 \text{ мэВ}$. Это значение смещения приблизительно в 2,2 раза меньше изменения ширины запрещенной зоны E_g для монокристаллического кремния, оцененного нами $\approx 42 \text{ мэВ}$ для диапазона температур 78–300 К по данным работы [10]. По нашему мнению, несоответствие спектрального положения полосы краевой люминесценции кремния $\approx 1,08 \text{ эВ}$ при 300 К (рисунок 2) по отношению к ожидаемому $\approx 1,06 \text{ эВ}$ [10], может быть объяснено тем, что механизм излучательной рекомбинации при комнатной температуре в кремнии определяется не только переходами свободных носителей заряда (оптические переходы зона–зона), но и аннигиляцией свободных экситонов.

Проведенные нами эксперименты показали, что для кремниевых $p-n$ структур наблюдается практически линейное увеличение интенсивности полос краевой люминесценции 1,10 и 1,08 эВ для температур 78 и 300 К, соответственно, в зависимости от величины тока, протекающего через $p-n$ переход в диапазоне 0,05–200 мА, что соответствует данным [3; 7; 8; 11]. При изменении тока в указанном диапазоне удалось достичь увеличения интенсивности полос краевой люминесценции приблизительно в 200–300 раз. Важно то, что полуширина полос краевой люминесценции в спектрах ЭЛ кремниевых $p-n$ структур (рисунок 2), составившая $\approx 65 \text{ мэВ}$ и $\approx 15 \text{ мэВ}$ при 78 К соответственно, оказалась сопоставимой с полушириной аналогичных полос, наблюдавшихся в высокоэффективных кремниевых светодиодах [2, 3, 7, 11, 12]. Этот результат указывает на относительно высокое качество сформированных в настоящей работе кремниевых $p-n$ структур.

На рисунке 3 приведены спектры ЭЛ кремниевых $p-n$ структур, сформированных на пластинах Si, содержащих дислокации. Спектры ЭЛ измерены при величине прямого тока через $p-n$ переход $\approx 10 \text{ мА}$.

Как видно из рисунка 3, кремниевые светодиоды с дислокациями обладают интенсивной ЭЛ при 78 и 300 К, сопоставимой с интен-

сивностью собственной близкраевой люминесценции, наблюдавшейся в эталонных кремниевых $p-n$ структурах при такой же электрической мощности, подаваемой на $p-n$ переход, (см. рисунок 2). В спектрах ЭЛ при 78 К наблюдаются известные полосы с максимумами $D1 - 0,805$ эВ, $D2 - 0,872$ эВ, $D3 - 0,945$ эВ и $D4 - 1,000$ эВ, связанные с излучательной рекомбинацией носителей заряда на дислокациях [6, 7, 9, 13].

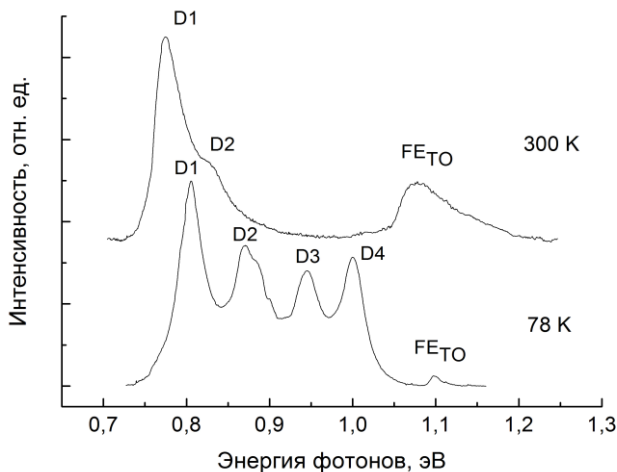


Рисунок 3 – Спектры электролюминесценции кремниевых $p-n$ структур с дислокациями измеренные при прямом токе 10 мА для различных температур. Спектральное разрешение 3 нм

Наряду с дислокационными полосами $D1-D4$ в спектрах ЭЛ при температурах 78 и 300 К наблюдаются полосы краевой люминесценции с максимумами $\approx 1,098$ эВ и $\approx 1,08$ эВ соответственно (рисунок 3). Отметим, что плотность дислокаций в исследованных нами $p-n$ структурах составляла $\approx 6 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$. Это несколько меньше плотности дислокаций, содержащихся в кремниевых $p-n$ структурах $\approx (3-5) \cdot 10^8$ см $^{-2}$ [6] и практически более чем на порядок меньше плотности дислокаций в кремниевых светодиодах, исследованных в работе [7].

Однако в отличие от опубликованных данных [6, 7] в настоящей работе нами впервые обнаружена интенсивная хорошо разрешаемая спектральная структура при 78 К от всех четырех типов дислокаций $D1-D4$ в монокристаллическом Si. Эксперименты показали, что при увеличении температуры до 300 К интегральная интенсивность полосы близкраевой люминесценции увеличивается приблизительно в 5–8 раз по отношению к ее значению при температуре 78 К. Анализ спектрального положения и формы полос экситонной люминесценции

FE_{TO} (рисунок 3) по отношению к их характеристикам в спектрах ЭЛ экситонных $p-n$ структур (рисунок 2) показывает, что введение дислокаций с плотностью 10^7-10^8 см $^{-2}$ приводит к небольшому ($\approx 2-4$ мэВ) уменьшению энергии полосы FE_{TO} и ее уширению до 3–5 мэВ при температурах 78 и 300 К. Эти данные свидетельствуют о незначительной степени искажения электронной структуры монокристаллического Si в области $p-n$ переходов, где происходят процессы излучательной рекомбинации инжектированных носителей заряда.

Необходимо также отметить, что в отличие от результатов предыдущих исследований ЭЛ в кремниевых $p-n$ структурах с дислокациями [6; 7], где всегда доминировала краевая люминесценция, интегральная интенсивность полосы дислокационной люминесценции $D1$ и $D2$ в наших структурах в 4 раза превосходит интенсивность полосы собственной краевой люминесценции FE_{TO} при комнатной температуре.

Этот результат важен в практическом отношении для создания кремниевых светодиодов с высоким значением квантовой эффективности на длине волны 1,6 мкм на основе кремниевых $p-n$ переходов с дислокационной люминесценцией в области максимума 0,775 эВ полосы $D1$.

Для определения условий повышения квантовой эффективности кремневых $p-n$ структур и выявления роли дислокаций в процессе излучательной рекомбинации нами исследована температурная зависимость спектров фотолюминесценции (ФЛ) в интервале 4,2–300 К монокристаллической пластины Si после лазерной перекристаллизации поверхностных слоев. Плотность дислокаций в пластине Si составляла $\approx 3 \cdot 10^8$ см $^{-2}$.

На рисунке 4 приведены спектры ФЛ кремниевой пластины, снятые при различных температурах со спектральным разрешением 3 нм.

Как видно, при 4,2 К в спектрах ФЛ присутствуют известные полосы, обусловленные излучательной рекомбинацией на дислокациях с максимумами: $D1 - 0,805$ эВ, $D2 - 0,867$ эВ, $D3 - 0,938$ эВ и $D4 - 0,998$ эВ [6; 7; 9]. В спектрах видна также линия краевой люминесценции, обусловленная рекомбинацией свободных экситонов, обозначенная $FE_{TO} - 1,089$ эВ. Основной эффект влияния температуры прежде всего проявляется в уменьшении интенсивности линий и полос. Гашение линий краевой люминесценции происходит до $T \leq 30$ К. По-

лосы *D3* и *D4* наблюдаются в спектрах ФЛ до температур ≈ 110 К, в то время как в соответствии с известными данными они существуют

всего лишь до температур 40 К [14] и 80 К [15]. Отметим, что до 80 К спектральное положение всех полос *D1–D4* практически не изменяется.

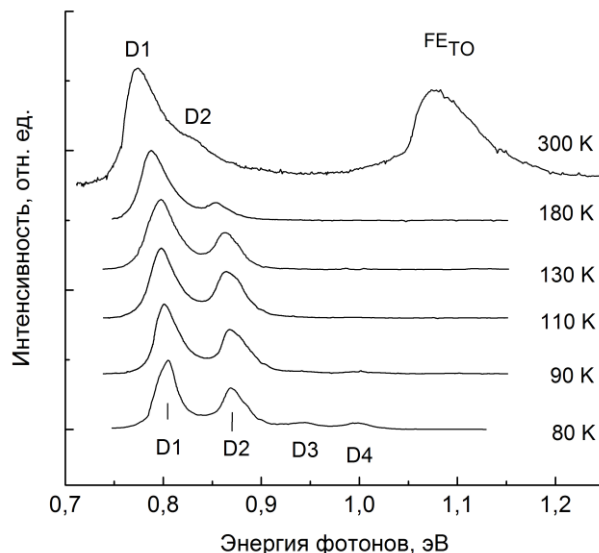
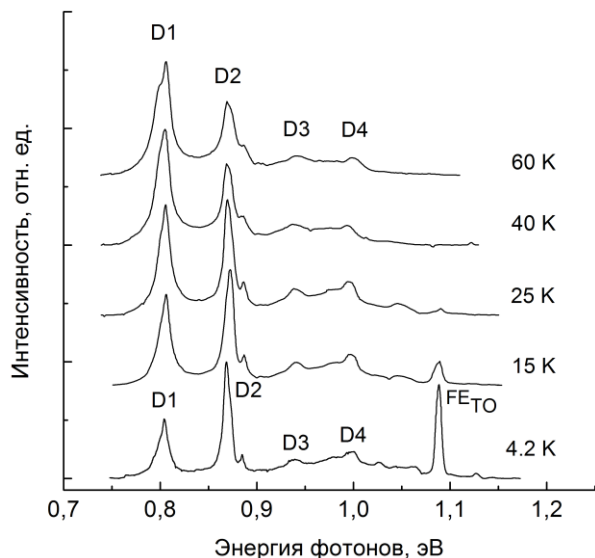


Рисунок 4 – Температурная зависимость спектров фотолюминесценции монокристаллического Si с дислокациями

Как видно из рисунка 4, при температуре выше 80 К происходит уширение, низкоэнергетическое смещение и уменьшение интенсивности полос дислокационной люминесценции *D1–D4*. В области температур > 180 К начинается значительное увеличение интенсивности полосы краевой люминесценции *FE_{TO}*. Эксперименты показали, что полосы *D1* и *D2* в диапазоне температур 4,2–300 К смещаются на 32 мэВ (рисунки 4). В то же время изменение ширины запрещенной зоны E_g Si в таком интервале температур составляет ≈ 43 мэВ [10]. Это означает, что у дислокаций *D1* и *D2*, введенных методом лазерной перекристаллизации, не существует энергетических уровней в запрещенной зоне, расположенных в области $\approx 2–10$ мэВ вблизи экстремумов валентной зоны или зоны проводимости.

Ранее на основании анализа гашения интенсивности полос *D3* и *D4* дислокационной люминесценции в диапазоне температур 4,2–30 К была определена энергия активации 4–10 мэВ, указывающая на наличие мелких энергетических уровней в запрещенной зоне Si [14, 15]. Выполненные нами эксперименты по анализу температурной зависимости интенсивностей полос *D3* и *D4* в интервале 4,2–120 К (рисунки 4) показали, что энергия

активации составляет ≈ 20 мэВ и соответствующие энергетические уровни в запрещенной зоне дислокационного Si являются более глубокими по сравнению с данными [14, 15].

На рисунке 5 приведена температурная зависимость интенсивности полосы *D1*.

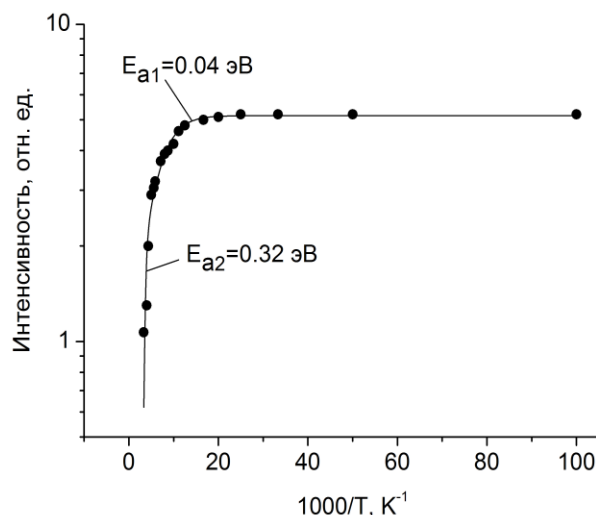


Рисунок 5 – Температурная зависимость интегральной интенсивности полосы *D1* дислокационной люминесценции: символы – экспериментальные данные; сплошная линия – подгонка по формуле (1)

Зависимость интенсивности полос от температуры может быть описана выражением [16]:

$$I(T)/I(0) = [1 + a_1 \cdot \exp(-E_{a1}/kT) + a_2 \times \exp(-E_{a2}/kT)]^{-1}, \quad (1)$$

где I – интенсивность полосы; E_{a1} и E_{a2} – энергии активации; a_1 и a_2 – параметры. С использованием выражения (1) для области температур 4,2–300 К проведена экстраполяция температурной зависимости интенсивности дислокационной полосы $D1$.

Соответствующая модель предполагает наличие двух уровней с различной энергией активации $E_{a1} \approx 0,04$ эВ и $E_{a2} \approx 0,32$ эВ (рисунок 5). В рамках этой модели можно предположить, что мелкий энергетический уровень 0,04 эВ расположен ниже дна зоны проводимости, а глубокий уровень 0,32 эВ – выше потолка валентной зоны. Тогда электронные переходы между этими двумя энергетическими уровнями, локализованными на дислокациях, и являются причиной появления полосы $D1$.

Полученные нами результаты отличаются от ранее предложенной модели механизма рекомбинации на дислокациях, предполагающей участие двух симметричных уровней с энергией ионизации $\approx 0,15$ – $0,20$ эВ [14].

Заключение

На основе стандартной технологии созданы относительно эффективные кремниевые p - n структуры, излучающие в области собственных межзонных переходов ($\sim 1,1$ эВ) и в примесной области спектра ($\sim 1,6$ мкм), за счет оптических переходов, обусловленных $D1$ дислокациями. В отличие от ранее полученных результатов другими исследователями интенсивность электролюминесценции Si светодиодов от дислокаций в несколько раз превышает интенсивность собственной краевой люминесценции при комнатной температуре, что важно для практических приложений. На основании анализа температурной зависимости дислокационной фотолуминесценции $D1$ – $D4$ в интервале 4,2–300 К определена энергия активации процесса и, соответственно, положение энергетических уровней дислокаций в запрещенной зоне. В частности, установлено, что для появление дислокационной люминесценции $D1$ – 0,805 эВ в спектрах при 4,2 К обусловлено оптическими переходами между двумя энергетическими

уровнями в запрещенной зоне: мелкими уровнями $\approx 0,04$ эВ, расположенными ниже зоны проводимости, и глубокими уровнями $\approx 0,32$ эВ выше валентной зоны.

Список использованных источников

1. Герасименко, Н.Н. Кремний – материал наноэлектроники / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. – М. : Техносфера, 2007. – 352 с.
2. Green, M.A. Efficient silicon light-emitting diodes / M.A. Green [et al.] // Nature. – 2001. – Vol. 412. – P. 805–808.
3. Emel'yanov, A.M. Silicon light-emitting diodes with strong near-band-edge luminescence / A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev // Semiconductors. – 2008. – Vol. 42, Is. 3. – P. 329–333.
4. Ng, W.L. An efficient room-temperature silicon-based light-emitting diode / W.L. Ng [et al.] // Nature. – 2001. – Vol. 410. – P. 192–194.
5. Trupke, Th. Very efficient light emission from bulk crystalline silicon // Th. Trupke [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 82, Is. 18. – P. 2996–2998.
6. Kveder, V. Silicon light-emitting diodes based on dislocation-related luminescence / V. Kveder [et al.] // Phys. Stat. Sol. (a). – 2005. – Vol. 202, № 5. – P. 901–910.
7. Sveinbjörnsson, E.Ö. Room temperature electroluminescence from dislocation-rich silicon / E.Ö. Sveinbjörnsson, J. Weber // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 69, № 18. – P. 2686–2688.
8. Emel'yanov, A.M. Silicon LEDs emitting in the band-to-band transition region: Effects of temperature and current strength / A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, E.I. Shek // Physics of Solid State. – 2004. – Vol. 46, Is. 1. – P. 40–44.
9. Davies, G. The optical properties of luminescence centers in silicon / G. Davies // Physics Reports. – 1989. – Vol. 176, № 3–4. – P. 83–188.
10. Päsler, R. Dispersion-related description of temperature dependencies of band gaps in semiconductors / R. Päsler // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66. – P. 085201-1–085201-18.
11. Bresler, M.S. Electroluminescence efficiency of silicon diodes / M. Bresler, O. Gusev [et al.] // Physics of Solid State. – 2004. – Vol. 46, Is. 1. – P. 5–9.
12. Emel'yanov, A.M. The mechanism of radiative recombination in the region of interband transitions in single crystal silicon / A.M. Emel'yanov // Technical Physics Letters. – 2004. – Vol. 30, Is. 11. – P. 964–966.
13. Drozdov, N.A. Recombination radiation on dislocations in silicon / N.A. Drozdov, A.A. Patrin, V.D. Tkachev // JETP Lett. – 1976. – Vol. 23. – P. 597–599.

14. Kveder, V.V. Dislocation-related electroluminescence at room temperature in plastically deformed silicon / V.V. Kveder [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 1995. – Vol. 51, № 16. – P. 10520–10526.
15. Sauer, R. Dislocation-related photoluminescence in silicon / R. Sauer [et al.] // *Appl. Phys. A.* – 1985. – Vol. 36. – P. 1–13.
16. Luckert, F. Excitation power and temperature dependence of excitons in CuInSe₂ / F. Luckert [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 111. – P. 093507-1–093507-8.

EFFECTIVE SILICON DEVICE STRUCTURES WITH RADIATIVE RECOMBINATION ON DISLOCATIONS

Mudryi A.V.¹, Zhivulko V.D.¹, Mofidnakhaei F.¹, Ivlev G.D.², Yakushev M.V.³, Martin R.W.³,
Dvurechenskii A.V.⁴, Zinovyev V.A.⁴, Smagina Zh.V.⁴, Kuchinskaja P.A.⁴

¹Scientific-Practical Material Research Centre of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

³University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

⁴Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian
e-mail: mudryi@physics.by

Abstract. The efficient electroluminescence in the region of band-to-band (1,1 eV) and dislocation-related (D1 – 0,8 eV) transitions has been detected from Si *p-n* structures at room and liquid nitrogen temperatures. It was found that dislocation-related luminescence in Si single crystals is considerably stronger than the intrinsic band-to-band emission in the wide temperature range of 4,2–300 K. The temperature dependent measurement of the D1 photoluminescence intensity shows that two energy levels placed below the conduction (0,04 eV) and above valence (0,32 eV) bands are responsible for this radiative recombination on dislocations.

Keywords: silicon *p-n* structures, current-voltage characteristics, dislocations, electroluminescence.

References

1. Gerasimenko N.N., Parhomenko Ju.N. *Kremnij material nanoelektroniki* [Silicon – a material of nanoelectronics]. M., Tehnosfera Publ., 2007, 352 p. (in Russian).
2. Green M.A., Zhao J., Wang A., Reece P.J., Gal M. Efficient silicon light-emitting diodes. *Nature*, 2001, vol. 412, pp. 805–808.
3. Emel'yanov A.M., Sobolev N.A. Silicon light-emitting diodes with strong near-band-edge luminescence. *Semiconductors*, 2008, vol. 42, is. 3, pp. 329–333.
4. Ng W.L., Lourenco M.A., Gwilliam R.M., Ledain S., Shao G., Homewood K.P. An efficient room-temperature silicon based light-emitting diode. *Nature*, 2001, vol. 410, pp. 192–194.
5. Trupke Th., Zhao J., Wang A., Corkish R., Green M.A. Very efficient light emission from bulk crystalline silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, vol. 82, no 18, pp. 2996–2998.
6. Kveder V., Badylevich M., Schröter W., Seibt M., Steinman E., Izotov A. Silicon light-emitting diodes based on dislocation-related luminescence. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2005, vol. 202, no 5, pp. 901–910.
7. Sveinbjörnsson E.Ö., Weber J. Room temperature electroluminescence from dislocation-rich silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 69, no 18, pp. 2686–2688.
8. Emel'yanov A.M., Sobolev N.A., Shek E.I. Silicon LEDs emitting in the band-to-band transition region: Effects of temperature and current strength. *Physics of Solid State*, 2004, vol. 46, is. 1, pp. 40–44.

9. Davies G. The optical properties of luminescence centers in silicon. *Physics Reports*, 1989, vol. 176, no 3–4, pp. 83–188.
10. Päsler R. Dispersion-related description of temperature dependencies of band gaps in semiconductors. *Phys. Rev. B*, 2002, vol. 66, pp. 085201-1–085201-18.
11. Bresler M.S., Gusev O.B., Zakharchenya B.P., Yassievich I.N. Electroluminescence efficiency of silicon diodes. *Physics of Solid State*, 2004, vol. 46, is. 1, pp. 5–9.
12. Emel'yanov A.M. The mechanism of radiative recombination in the region of interband transitions in single crystal silicon. *Technical Physics Letters*, 2004, vol. 30, is. 11, pp. 964–966.
13. Drozdov N.A., Patrin A.A., Tkachev V.D. Recombination radiation on dislocations in silicon. *JETP Lett.*, 1976, vol. 23, pp. 597–599.
14. Kveder V.V., Steinman E.A., Shevchenko S.A., Grimmeiss H.G. Dislocation-related electroluminescence at room temperature in plastically deformed silicon. *Phys. Rev. B*, 1995, vol. 51, no 16, pp. 10520–10526.
15. Sauer R., Weber J., Stolz J., Weber E.R., Küsters K.H., Alexander H. Dislocation-related photoluminescence in silicon. *Appl. Phys. A*, 1985, vol. 36, pp. 1–13.
16. Luckert F., Yakushev M.V., Faugeras C., Karotki A.V., Mudryi A.V. Excitation power and temperature dependence of excitons in CuInSe_2 . *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 111, pp. 093507-1–093507-8.

Поступила в редакцию 04.04.2014.