

Интенсивность излучения в видимой и инфракрасной областях спектра в структурах на основе кремния, сформированных прямым сращиванием с одновременным легированием эрбием (Er) и европием (Eu)

© М.М. Мездрогина[¶], Л.С. Костина, Е.И. Белякова, Р.В. Кузьмин

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

(Получена 6 декабря 2012 г. Принята к печати 14 декабря 2012 г.)

Исследованы спектры фотолюминесценции и электролюминесценции структур на основе кремния, сформированных прямым сращиванием с одновременным легированием редкоземельными металлами (Er, Eu). Показано, что в структурах типа $n\text{-Si}/\text{Er}/p\text{-Si}$, $n\text{-Si}/\text{Eu}/p\text{-Si}$, изготовленных предложенным в работе методом, может быть реализовано излучение в видимой и инфракрасной областях спектра. Полученные результаты определяют перспективу использования данного метода для создания оптоэлектронных приборов.

1. Введение

Перспективность создания оптоэлектронных приборов для длинноволновой области спектра на основе кремниевых структур связана с реализацией излучателей для оптоволоконных линий связи, полностью совместимых со стандартными кремниевыми технологиями. Важность данного направления развития кремниевой оптоэлектроники сложно переоценить в связи с большими возможностями оптических систем передачи данных и все более интенсивным их использованием. Известно, что минимальные потери в оптическом волокне приходятся на среднюю инфракрасную (ИК) область спектра, на длины волн $\lambda = 1.30$ и 1.54 мкм.

Обширные исследования особенностей спектров возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) ионов Er, механизмов возбуждения внутрицентровых $4f$ -переходов в эпитаксиальных кремниевых структурах, легированных Er (Si<Er>) [1,2], проводимые в течение последних 20 лет, позволили выяснить особенности межзонных возбуждений ФЛ в структурах Si<Er>/Si. Наряду с изучением структурного качества полупроводниковой матрицы при наличии в ней редкоземельных ионов (РЗИ), механизмов энергопереноса к внутрицентровым состояниям РЗИ и процессов гашения люминесценции РЗИ важным является вопрос о влиянии концентрации введенных в полупроводник РЗИ на спектры люминесценции. В [3,4] эта проблема рассматривалась в $a\text{-Si}:\text{H}<\text{Er}>$, $c\text{-Si}<\text{Er}>$. К настоящему времени не получено существенного увеличения интенсивности излучения в $c\text{-Si}<\text{Er}>$ на длине волны $\lambda = 1.54$ мкм [5,6].

При введении в полупроводник редкоземельной примеси необходимо удовлетворить двум взаимно противоположным требованиям. С одной стороны, следует увеличивать концентрацию легирующей примеси для увеличения концентрации оптически активных центров (и соответственно для увеличения интенсивности излучения), а с другой — необходимо при этом избежать

концентрационного гашения излучения. Важным аспектом является также оценка пространственного распределения вводимых РЗИ [6,7].

В кремнии, представляющем собой непрямозонный полупроводник, сложно обеспечить условия увеличения квантового выхода излучения, а также малые величины температурного гашения его интенсивности. В этой связи поиск новых методов введения Er и Eu в кристаллический кремний, отличных от традиционно используемого легирования в процессе эпитаксии, представляется весьма актуальным. Предполагается, что развитый в работе метод прямого сращивания кремниевых пластин с их одновременным легированием редкоземельными ионами может стать основой для создания многофункциональных приборов, сочетающих в себе полупроводниковые и оптоэлектронные свойства, способных работать при повышенных температурах и в условиях повышенного радиационного фона.

Целью настоящей работы является исследование влияния концентрации редкоземельных примесей (Er, Eu) на интенсивность излучения внутрицентровых $4f$ -переходов в структурах $p\text{-Si}<\text{Er}>p\text{-Si}$, $n\text{-Si}<\text{Er}>n\text{-Si}$, $n\text{-Si}<\text{Er,Eu}>p\text{-Si}$, сформированных по технологии прямого сращивания с одновременным введением эрбия, европия или эрбия и европия одновременно из источников на границе раздела двух срачиваемых кремниевых пластин, а также оценка пространственного распределения этих примесей.

2. Образцы и методы исследования

Исследуемые образцы представляли собой легированные эрбием и европием структуры $p\text{-Si}<\text{Er}>p\text{-Si}$, $n\text{-Si}<\text{Er}>n\text{-Si}$, $p\text{-Si}<\text{Er}>n\text{-Si}$, $p\text{-Si}<\text{Er,Eu}>n\text{-Si}$, для изготовления которых использовалась модернизированная технология прямого сращивания [8,9]. Прямое сращивание материалов электронной техники, позволяющее формировать монокристаллические слои кремния, германия, полупроводников типов $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ как на полупроводниковых, так и на изолирующих подложках,

[¶] E-mail: margaret.m@mail.ioffe.ru

находит в настоящее время все более широкое применение при разработке и создании новой элементной базы опто-, нано- и микроэлектроники, интегральных схем, солнечных элементов, различного рода микромеханических устройств и все шире используется там, где технология эпитаксиального наращивания не может обеспечить получение структур с высоким структурным качеством. Известно, что при эпитаксиальном наращивании дислокации, образующиеся вследствие релаксации напряжений несоответствия, прорастают в активную область приборов и ухудшают их характеристики. При модернизированном сращивании на поверхности одной из пластин перед сращиванием изготавливается методом фотолитографии искусственный мезоскопический рельеф в виде ортогональной сетки канавок шириной 30–50 мкм и глубиной 0,3–0,5 мкм с периодом 200–250 мкм [8,9]. Канавки рельефа служат стоком для дислокаций несоответствия на границе раздела и тем самым препятствуют их распространению в объем.

Введение в кремний редкоземельных примесей (эрбия и европия) осуществлялось в настоящей работе в едином технологическом цикле с процессом сращивания — путем диффузии из источника, находящегося на границе сращиваемых кремниевых пластин [10,11].

Зеркально полированные пластины кремния *n*-типа проводимости ориентации (111) с различными величинами удельного сопротивления $\rho = 10, 30, 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и *p*-типа проводимости с $\rho = 30$ и $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, с ориентацией поверхности (111) перед сращиванием подвергались стандартной отмывке и гидрофилизации с последующей промывкой в деионизованной воде с удельным сопротивлением $18 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Приведение в контакт пластины с рельефом и пластины без рельефа осуществлялось в водных растворах хлоридов EuCl_3 , ErCl_3 с их массовой концентрацией 0,1–1% или в смеси этих растворов. После сушки на центрифуге образцы отжигались в течение 12 ч при комнатной температуре и затем в течение 2 ч часов при 1250°C . При этом происходила диффузия РЗИ в кремний. Такой способ введения РЗИ в структуру обеспечивает достаточно широкое варьирование концентраций как основной легирующей примеси, так и дополнительно введенных примесей (кодопантов), что открывает возможность как увеличения интенсивности излучения внутрицентровых $4f$ -переходов РЗИ, так и варьирования интенсивности возбуждения при измерениях электролюминесценции вследствие высокого структурного качества сформированных сращиванием структур.

Измерения спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводились на дифракционном спектрометре СДЛ-2 с обратной линейной дисперсией 1,3 нм/мм в области краевой и примесной люминесценции исследуемых в данной работе структур. Спектральное разрешение (спектральная ширина щели) при записи спектров равно 2,6 Å.

Для возбуждения фотолюминесценции в стационарном режиме использовали: непрерывный аргоновый лазер типа ЛГ-106М с мощностью излучения 0,5 Вт и

селекцией длины волны излучения с помощью поворотной призмы, установленной на месте глухого зеркала, что позволяло получать генерацию в том числе на длине волны $\lambda_{\text{ex}} = 488 \text{ нм}$, а также импульсный азотный лазер типа ЛГИ-21 с длительностью импульса $\tau = 7 \text{ нс}$ (ширина на полувысоте импульса), частотой следования 100 Гц, средней мощностью 3 мВт и длиной волны излучения $\lambda_{\text{ex}} = 3371 \text{ Å}$ (плотность энергии в импульсе при расфокусированном пучке $\sim 10 \text{ кВт/см}^2$).

Структуры имели прямоугольную форму в плоскости слоев, для определения однородности легирования измерения ФЛ проводили с разных торцов (длинного и короткого).

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) измерялись при температурах $T = 77 \text{ К}$ и 300 К при варьировании тока до $I = 500 \text{ мА}$.

Для корректного сравнения спектров излучения различных структур контролируемые параметры — угол падения луча, интенсивность возбуждающего света, температура $T = 77, 300 \text{ К}$ — выбирались постоянными.

3. Экспериментальные результаты

Влияние примеси Er, введенной в структуры *p*-Si(Er)*p*-Si из ErCl_3 , на вид спектра ФЛ ($T = 300 \text{ К}$, $\lambda_{\text{ex}} = 488 \text{ нм}$, $W = 0,5 \text{ Вт}$) в длинноволновой области представлено на рис. 1, *a*, (кривая 1 — пластины по обе стороны от границы с $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; кривая 2 — пластины по обе стороны от границы с $\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Как можно заметить, в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) обоих типов структур *p*-Si(Er)*p*-Si вне зависимости от удельного сопротивления пластин (исходный *p*-Si с $\rho = 10$ или $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) имеются неоднородно уширенные полосы излучения, трем максимумам соответствуют длины волн: $\lambda = 1,05, 1,26, 1,54 \text{ мкм}$. При этом в коротковолновой области спектра не наблюдалось линий излучения, характерных для внутрицентровых $4f$ -переходов Er. Различие в концентрации бора (т.е. различие удельного сопротивления) при неизменном содержании Er несущественно влияет на вид спектра ФЛ, в котором в обоих случаях наблюдаются также полосы излучения с максимумами при $\lambda = 1,02, 1,28 \text{ мкм}$. Интенсивность излучения во всех указанных максимумах одинакова (рис. 1, *a*, кривые 1 и 2).

В спектрах ФЛ структур с другим типом проводимости, *n*-Si(Er)*n*-Si ($\rho = 10$ и $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $T = 77 \text{ К}$), как видно из рис. 1, *b*, доминируют линии излучения, характерные для рекомбинации свободных экситонов, а также экситонов, связанных на нейтральном доноре. При этом изменение удельного сопротивления ($\rho = 10$ или $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) также практически не приводит к изменению вида спектра ФЛ. Однако излучения, характерного для внутрицентровых $4f$ -переходов Er, в обоих типах структур *n*-Si(Er)*n*-Si (рис. 1, *b*) обнаружено не было, вне зависимости от значения удельного сопротивления. Такой тип излучения, т.е. характерный для внутрицентровых $4f$ -переходов Er, был обнаружен в спектрах ФЛ структур

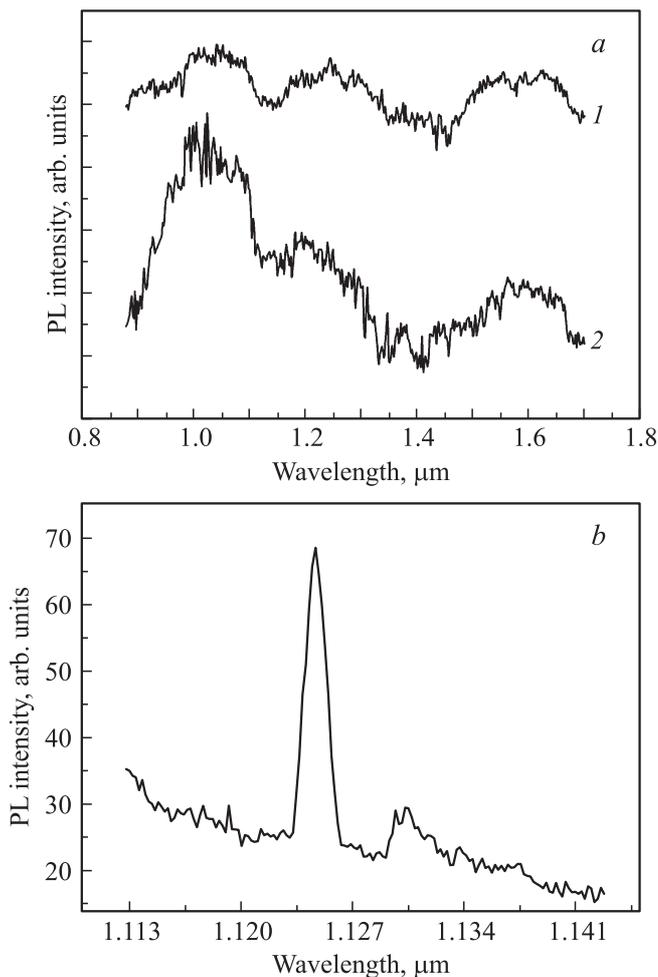


Рис. 1. *a* — спектры фотолюминесценции (PL) структур $p\text{-Si(Er)}p\text{-Si}$ с удельным сопротивлением кремния $\rho = 10$ (1) и $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (2) в длинноволновой области; $T = 77 \text{ К}$, $\lambda_{\text{ex}} = 488 \text{ нм}$, $W = 0.5 \text{ Вт}$. *b* — спектры фотолюминесценции (PL) структур $n\text{-Si(Eu)}n\text{-Si}$ с удельным сопротивлением кремния $\rho = 10$, $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (спектры практически совпадают) в длинноволновой области; $T = 77 \text{ К}$, $\lambda_{\text{ex}} = 532 \text{ нм}$, $W = 0.5 \text{ мВт}$.

$n\text{-Si(Er)}p\text{-Si}$ ($n\text{-Si}$ — $\rho = 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $p\text{-Si}$ — $\rho = 10$ или $30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Спектры, измеренные при возбуждении этой структуры с двух различных сторон, показаны на рис. 2. При возбуждении с каждой из сторон в спектрах наблюдается линия излучения, связанная с внутрицентровым переходом в Er из возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ в основное состояние $^4I_{15/2}$ с $\lambda = 1.54 \text{ мкм}$, для которой ширина линии на полувысоте мала, $\text{FWHM} = 3 \text{ мэВ}$, и одинакова при возбуждении исследуемого образца с каждой из сторон.

В структурах $n\text{-Si(Eu)}p\text{-Si}$ (легирование европием) наблюдается линия ФЛ в видимой области спектра ФЛ с максимумом при $\lambda = 0.668 \text{ мкм}$, характерная для внутрицентрового $4f$ -перехода $\text{Eu}^{3+} : ^5D_0 - ^7F_3$, а $\text{FWHM} = 3 \text{ мэВ}$, т.е. такая же, как и при легировании Er (см. рис. 2, 3).

При использовании двух легирующих компонентов (Er + Eu) оказалось, что наибольшее значение интенсивности полосы с максимумом при $\lambda = 1.54 \text{ мкм}$ в спектрах ФЛ структур $n\text{-Si(Er, Eu)}p\text{-Si}$ наблюдается при концентрации Er + Eu 0.2%, причем полоса сильно уширена.

Наличие p - n -перехода в структурах $n\text{-Si(Er)}p\text{-Si}$ позволяет исследовать спектры их электролюминесценции (ЭЛ). На нелегированной РЗИ структуре $n\text{-Si}/p\text{-Si}$ наблюдалась неоднородно уширенная полоса излучения с максимумом на длине волны $\lambda = 1.54 \text{ мкм}$, которая может быть связана с дислокационной люминесценцией $D1$, обусловленной наличием мелких уровней при учете кулоновского взаимодействия локализованных на них носителей [12]. Наибольшая интенсивность дан-

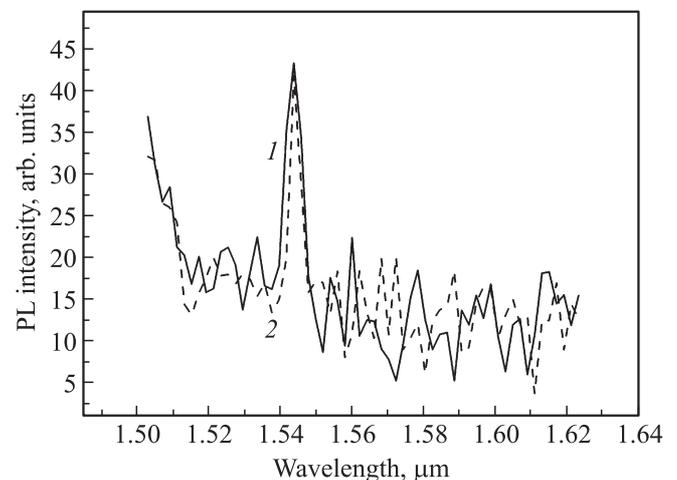


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции (PL) структуры $n\text{-Si(Er)}p\text{-Si}$: измерения с длинной (1) и короткой (2) сторон структуры. $T = 77 \text{ К}$, $\lambda_{\text{ex}} = 510 \text{ нм}$, $W = 0.5 \text{ Вт}$.

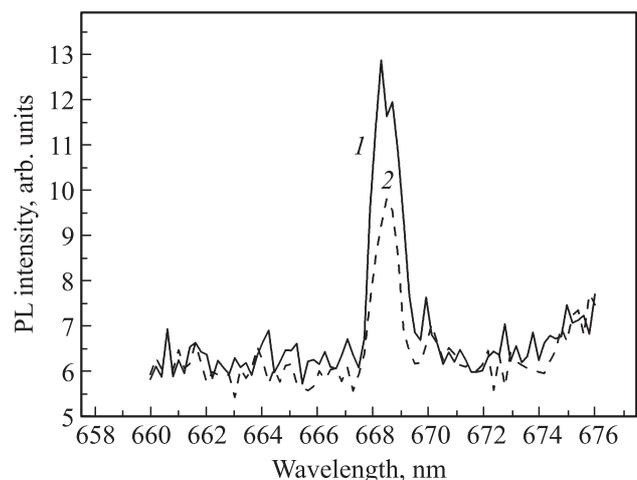


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции (PL) структуры $n\text{-Si(Eu)}p\text{-Si}$ в видимой области с линией, характерной для внутрицентрового $4f$ -перехода Eu: измерения с длинной (1) и короткой (2) сторон структуры. $T = 77 \text{ К}$, $\lambda_{\text{ex}} = 488 \text{ нм}$, $W = 0.5 \text{ Вт}$.

ной полосы излучения наблюдалась при величине тока $I = 500$ мА и температуре $T = 77$ К.

При введении в качестве легирующего компонента Er (структура типа $n\text{-Si}(\text{Er})p\text{-Si}$) интенсивность полосы электролюминесценции с максимумом при $\lambda = 1.54$ мкм становится незначительной, что может быть обусловлено уменьшением концентрации безызлучательных центров рекомбинации в присутствии Er.

4. Обсуждение результатов

Известно, что точные данные о растворимости редкоземельных элементов (Er, Eu) в кремнии практически отсутствуют, поскольку велико влияние фоновых примесей. Растворимость Eu на два порядка выше, чем Er (при 1300°C концентрация Eu — $1.2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, концентрация Er — $2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ [13]). Было также показано, что примесь Er, введенная в полупроводниковую матрицу, склонна к сегрегации, вследствие чего нарушается механизм передачи возбуждения от кремниевой матрицы к внутрицентровым $4f$ -переходам РЗИ [14].

Все механизмы передачи возбуждения, как правило, рассматриваются для одного типа проводимости полупроводниковой матрицы.

Рассмотрим возможные механизмы передачи возбуждения.

Первый тип передачи возбуждения относится к тому случаю, когда РЗИ образуют комплексный дефект, который приводит к появлению донорного уровня в запрещенной зоне полупроводника. В качестве такого дефекта может выступать $\text{RE}_{\text{Si}} + V_{\text{O}}$ (RE_{Si} — РЗИ в узле кремния). В этом случае электрон может быть захвачен на донорный уровень комплексного дефекта с участием РЗИ и рекомбинировать с дыркой на акцепторном уровне, появление которого вызвано наличием некой сторонней примеси. Энергия рекомбинации может передаваться посредством оже-процесса на внутренние $4f$ -оболочки РЗИ. Данный механизм передачи энергии носит резонансный характер.

Второй тип процессов существен в случае, когда РЗИ образует комплекс с другими дефектами или примесями, создающий в запрещенной зоне акцепторный уровень, например, комплекс $\text{RE}_{\text{Si}} + V_{\text{Si}}$. В этом случае возможен оже-процесс передачи энергии к внутренним состояниям РЗИ при рекомбинации электрона на стороннем доноре и дырки на акцепторном уровне комплексного дефекта с участием РЗИ.

Третий механизм связан с передачей энергии при рекомбинации электрона и дырки, связанных на примесном доноре и акцепторе.

Эффективность всех трех вышеперечисленных механизмов, по всей видимости, должна сильно зависеть от расстояния между рекомбинирующими дыркой и электроном, т. е. от расстояния между соответствующими примесями в кристалле. Это связано с тем, что между электроном и дыркой есть кулоновское взаимодействие, зависящее от расстояния r как $1/r^2$. Отсюда можно

сделать вывод: чем больше расстояние, тем меньше энергия их связи и тем ниже вероятность их рекомбинации с последующей передачей энергии к РЗИ. В случае реализации третьего механизма существенным становится также расстояние между донорным и акцепторным примесными центрами и редкоземельным ионом. С увеличением этого расстояния вероятность оже-передачи энергии в принципе должна падать.

С учетом механизма сенсibilизации излучения внутрицентровых $4f$ -переходов РЗИ [15], при малой разнице в энергиях внутрицентровых переходов Eu (уровни 5D_1 и $^2H_{11/2}$) возможным путем передачи возбуждения от одного РЗИ (Eu) к другому РЗИ (Er) может стать последовательная передача энергии возбуждения от полупроводниковой матрицы Si к иону Eu, далее к иону Er, а затем последовательная передача возбуждения на $4f$ -уровень Er $^4I_{15/2}$ с реализацией излучения внутрицентрового $4f$ -перехода на длине волны $\lambda = 1.54$ мкм. Ион Eu можно рассматривать для полупроводниковой матрицы Si, как и для GaN и структур с квантовыми ямами на основе GaN, в качестве сенсibilизатора излучения внутрицентрового $4f$ -перехода [16].

Все эти процессы — резонансные, но условия одного только резонанса недостаточно для реализации эффективной передачи энергии к внутрицентровым состояниям РЗИ. Требуется еще обеспечить малую вероятность обратных процессов переноса энергии. Добиться этого можно, в частности, правильным подбором времени жизни носителей на донорных и акцепторных примесных уровнях, участвующих в процессах передачи энергии. Все вышесказанное дает ключ к пониманию эффектов сенсibilизации излучения введением дополнительных примесей РЗИ в полупроводниковых матрицах.

Интенсивность излучения внутрицентровых $4f$ -переходов РЗИ в полупроводниковой матрице при прочих равных условиях, как известно, обратно пропорциональна концентрации дефектов в ней. При исследовании спектров ЭЛ может наблюдаться уменьшение интенсивности излучения полосы на длине волны $\lambda = 1.54$ мкм (0.81 эВ), связанное с введением Er. В исследуемых образцах такое уменьшение можно связать с накоплением дефектов в области канавок мезоскопического рельефа при осуществлении процедуры прямого срачивания, приводящим к уменьшению концентрации оборванных связей [17] на границе раздела слоев.

Основные механизмы гашения возбужденных внутрицентровых состояний редкоземельных ионов можно разделить на четыре типа.

Первый тип связан с оже-процессами безызлучательной рекомбинации. Такие процессы могут протекать при взаимодействии РЗИ с возбужденными внутрицентровыми $4f$ -состояниями, с электроном, связанным на другой РЗИ-ловушке (комплексе РЗИ + дефект/фононовая примесь). Следующие два процесса гашения происходят с участием РЗИ-ловушки с возбужденными внутрицентровыми состояниями и электрона (дырки) на некоем нейтральном доноре (акцепторе).

Вторым типом механизмов безызлучательной рекомбинации в полупроводниках являются многофононные процессы релаксации. Наиболее критичным параметром, влияющим на скорость многофононного испускания, является величина энергетического зазора между вышележащим и нижележащим уровнями РЗИ. Если этот зазор достаточно широк, то вероятностью многофононных процессов можно пренебречь по сравнению с излучательными процессами.

Третий и четвертый типы механизмов — это резонансная миграция возбуждения от полупроводниковой матрицы на некую примесь, в том числе на другой РЗИ, и кросс-релаксация между двумя РЗИ. Эти механизмы вместе с безызлучательной оже-рекомбинацией ответственны за так называемое „концентрационное“ тушение люминесценции РЗИ в полупроводниковых матрицах.

Известно, что спектры ФЛ внутрицентровых $4f$ -переходов в полупроводниковых матрицах являются неоднородно-уширенными. Неоднородное уширение линий излучения, характеризующееся величиной FWHM (шириной линии на полувысоте), возникает вследствие того, что длины волн излучения, отвечающие излучательной рекомбинации носителей, локализованных на разных центрах, несколько различаются. Причиной этого различия является дисперсия энергии термоактивации ($\Delta E_{\text{ДТ}}$) вследствие различных значений локального потенциала (V_{loc}) в местах расположения связанных с РЗИ дефектов. Следовательно, чем меньше ширина линий (FWHM), характерных для внутрицентровых переходов, тем больше вероятность одинакового (подобного) положения примеси в матрице вследствие одинакового значения локального потенциала примеси. Полученные в данной работе величины FWHM ≈ 3 мэВ для линий излучения, характерных для внутрицентровых $4f$ -переходов Er, Eu в структурах n -Si(Er, Eu) p -Si, изготовленных методом прямого сращивания, свидетельствуют о равнозначных положениях введенной примеси в полупроводниковой матрице, т.е. о возможности использования РЗИ в качестве оптического зонда.

Рассмотренные выше механизмы передачи возбуждения справедливы для слоев с одним типом проводимости. В структурах на основе легированного эрбием кремния (c -Si(Er)) обычно легируют слой с одним типом проводимости (p - или n -слой), а затем наносят нелегированный слой кремния. В исследованных структурах используются слои Si с различным типом проводимости (n , p), поэтому эффективность передачи возбуждения от полупроводниковой матрицы к ионам РЗИ (Er, Eu) определяется удельным сопротивлением слоев, вернее, соотношением разных удельных сопротивлений слоев.

Изложенные выше соображения приводят к выводу о том, что для увеличения интенсивности излучения внутрицентровых $4f$ -переходов РЗИ в структурах, сформированных прямым сращиванием с одновременным легированием РЗИ, необходимо оптимизировать исходные удельные сопротивления сращиваемых пластин с целью оптимизации механизмов возбуждения РЗИ.

5. Заключение

Полученные в данной работе результаты показывают, что предложенный способ легирования структур n -Si/ p -Si редкоземельными элементами Er, Eu дает возможность реализации излучения в видимой и (ИК) областях спектра при измерениях электролюминесценции, а в случае p -Si(Er) p -Si, n -Si(Er) n -Si — при фотовозбуждении для оптимизации механизмов возбуждения РЗИ.

Введение редкоземельных примесей (на примере Er, Eu) в структуры p -Si(Er) p -Si с использованием технологии прямого сращивания определяет перспективу использования данного метода для создания оптоэлектронных приборов.

Показано, что РЗИ в данных структурах можно рассматривать в качестве оптического зонда, характеризующего пространственное распределение легирующих примесей, поскольку мала величина FWHM, т.е. мало различие в величинах локального потенциала введенных примесей.

Список литературы

- [1] В.Ф. Мастеров, Ф.С. Насрединов, П.П. Серегин, Е.И. Теруков, М.М. Мездрогина. ФТП, **32** (6), 708 (1998).
- [2] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Polman, S. Libertino, R. Baklie, D. Carey. J. Appl. Phys., **78**, 3874 (1995).
- [3] М.М. Мездрогина, М.П. Анноразова, Е.И. Теруков, И.Н. Трапезникова, Н. Назаров. ФТП, **33** (10), 1260 (1999).
- [4] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Polman, R. Serna. Phys. Rev. B, **49**, 16 313 (1994).
- [5] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Polman, S. Libertino, A. Barkie, G. Garey. J. Appl. Phys., **78** (6), 3874 (1995).
- [6] А.Н. Яблонский, Б.А. Андреев, Д.И. Крыжков, В.П. Кузнецов, Д.В. Шенгуров, З.Ф. Красильник. ФТП, **46** (11), 1435 (2012).
- [7] М.М. Мездрогина, В.В. Криволапчук, Ю.В. Кожанова. ФТП, **42** (2), 157 (2008).
- [8] И.В. Грехов, Л.С. Костина, Е.И. Белякова. Патент РФ № 2071143 от 01.07.1993 г.
- [9] I.V. Grekhov, T.S. Argunova, M.Yu. Gutkin, L.S. Kostina, T.V. Kudryavzeva, E.D. Kim, S.C. Kim. Electron. Lett., **31** (23), 2047 (1995).
- [10] Т.С. Аргунова, Е.И. Белякова, И.В. Грехов, Л.С. Костина, Т.В. Кудрявцева. Патент РФ №2163410 от 21.07.1999 г.
- [11] И.В. Грехов, Л.С. Костина, Т.С. Аргунова, Е.И. Белякова, Н.М. Шмидт, Е.Д. Ким, С.Ч. Ким. ЖТФ, **71** (6), 45 (2001).
- [12] М.М. Мездрогина, Э.Ю. Даниловский, Р.В. Кузьмин. ФТП, **44** (3), 338 (2010).
- [13] F.J.G. Ren, D.J. Eaglesham. Material Rex. Soc. Symp. Proc., **422**, 87 (1996).
- [14] S.O. Kucheyev, J.E. Bradby, S. Ruffell, C.P. Li, T.E. Felter, A.V. Hamza. Appl. Phys. Lett., **90**, 221 901 (2007).
- [15] D.L. Dexter. J. Chem. Phys., **21** (5), 836 (1953).
- [16] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, Р.В. Кузьмин, А.М. Маляренко, В.А. Машков. ФТП, **46** (3), 289 (2012).
- [17] А.С. Бондаренко, О.Ф. Выбенко, А.С. Лошаченко, О.В. Конончук. Тез. докл. IX конф. „Кремний 2012“ (Санкт-Петербург, 2012) с. 71.

Редактор Л.В. Шаронова

**Intensity of the luminescence
in visible and infrared regions of Si-based
structures, formed by silicon direct
bonding technique with simultaneous Er
and Eu doping**

*M.M. Mezdrogina, L.S. Kostina, E.I. Beliakova,
R.V. Kuzmin*

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

Abstract Luminescence in visible and infrared spectral regions of the structures formed via silicon direct bonding technology with simultaneous Er and Eu doping has been realized. Obtained results allowed to suppose that the developed technique would be prospective for the design of opto-electronic devices.