Особенности безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} в кремниевых эпитаксиальных структурах

© К.Е. Кудрявцев[+*¶], Д.И. Крыжков[+*], А.В. Антонов[+*], Д.В. Шенгуров[+], В.Б. Шмагин[+*], З.Ф. Красильник[+*]

[+] Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия
[*] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 10 февраля 2014 г. Принята к печати 24 февраля 2014 г.)

Исследованы особенности безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} в слоях Si:Er, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. В диодных структурах Si:Er/Si с излучающими центрами преципитатного типа наблюдался резонансный фотоотклик на длине волны $\lambda \approx 1.5$ мкм, указывающий на безызлучательную релаксацию ионов эрбия по механизму обратной передачи энергии. Впервые наблюдалось насыщение „эрбиевого" фототока в области высоких температур, что позволило оценить концентрацию эрбиевых центров, подверженных безызлучательной релаксации по указанному механизму ($N_0 \approx 5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$). По порядку величины оценка N_0 соответствует концентрации оптически активных ионов эрбия при рекомбинационном механизме возбуждения слоев Si:Er. Проанализированы особенности безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} в структурах Si:Er/Si с различными типами излучающих центров.

1. Введение

Легирование полупроводников ионами редкоземельных элементов (РЗЭ) позволяет формировать оптически активные центры с узкой и температурно-стабильной линией излучения, положение которой определяется величиной спин-орбитального расщепления электронных состояний в частично заполненной $4f$-оболочке иона РЗЭ. Интерес к кремнию, легированному эрбием, определяется перспективами достижения оптического усиления и лазерной генерации на длине волны $\lambda \approx 1.5$ мкм (переход $^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в $4f$-оболочке иона Er^{3+}), соответствующей минимуму потерь в кварцевых волоконно-оптических линиях связи. Результаты обширных исследований, выполненных в данной области и направленных как на развитие технологии светоизлучающих структур, так и на изучение физики процессов, определяющих излучательные свойства структур, представлены в обзорах [1–3].

Для эрбия в кремнии, как и в целом для ионов РЗЭ в полупроводниковых матрицах, характерно большое (на уровне единиц миллисекунд [4]) время излучательной релаксации. По этой причине конкурирующие процессы безызлучательной релаксации, обусловленные, как правило, дефектностью полупроводникового кристалла, в значительной степени определяют эффективность внутрицентровой люминесценции ионов РЗЭ. Для структур Si:Er/Si, получаемых методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [5,6] и имеющих наиболее интенсивную в классе структур на основе c-Si:Er люминесценцию ионов Er^{3+}, процессы безызлучательной релаксации эрбия изучены достаточно слабо. В наибольшей степени это относится к безызлучательной релаксации по механизму обратной передачи энергии (back-transfer-релаксация [7,8]), определяющей температурное гашение люминесценции эрбия при температурах $T > 100$ K. Выполненные ранее исследования показали, что полученные методом СМЛЭ структуры Si:Er/Si заметно отличаются от структур Si:Er/Si, получаемых ионной имплантацией, как по составу электрически активных центров, предположительно ответственных за back-transfer-релаксацию [9], так и по характеру температурного гашения люминесценции [10].

В данной работе методами спектроскопии фототока и спектроскопии фотолюминесценции с временны́м разрешением исследованы особенности безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} в Si:Er/Si-диодах, полученных методом СМЛЭ.

2. Исследуемые структуры и методика эксперимента

Исследовались диодные структуры Si:Er/Si, выращенные методом СМЛЭ. Диодные структуры формировались слоями p^+-Si/n-Si:Er/n^+-Si. Толщина активного слоя n-Si:Er составляла ~ 1 мкм, концентрация носителей $\sim (10^{16}-10^{17})$ см$^{-3}$, температура роста варьировалась в диапазоне 400–600°C. Толщина контактных слоев p^+-Si ($[B] \approx 2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$) и n^+-Si ($[P] \sim 10^{18}$ см$^{-3}$) составляла ~ 0.2 мкм. Спектры фототока регистрировались без подачи смещения на $p-n$-переход. Для усиления фототока использовался малошумящий усилитель тока Stanford Research Systems SR570. В качестве источника возбуждающего излучения использовалась лампа накаливания. Часть спектра источника с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны кремния, отсекалась полосовыми фильтрами, и эффективный спектральный диапазон источника составлял $\sim 3700-8300$ см$^{-1}$. Это позволяло увеличить отношение сигнал/шум и более

¶ E-mail: konstantin@ipmras.ru

четко фиксировать слабые резонансные особенности в спектрах фототока. Для спектрального анализа фототока использовался фурье-спектрометр Bruker Vertex80v. Спектральное разрешение составляло до $2\,см^{-1}$. Температурные измерения проводились в заливном азотном криостате. Люминесцентные измерения проводились с использованием решеточного монохроматора Acton 2300i. Возбуждение люминесценции осуществлялось импульсным Nd : YAG-лазером (длина волны излучения $\lambda = 532\,нм$), эрбиевая люминесценция детектировалась фотоумножителем Hamamatsu R73.

3. Результаты и обсуждение

Безызлучательная релаксация ионов Er^{3+} в имплантационных структурах Si : Er/Si, осуществляемая путем обратной передачи энергии возбуждения, была исследована в [11,12]. Прямым доказательством обратной передачи энергии явилась регистрация резонансной особенности в спектре фототока диодной структуры Si : Er/Si на длине волны $\lambda \approx 1.5\,мкм$, соответствующей переходу ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+}. Механизм возникновения этой особенности трактуется в [11] следующим образом. Поглощая фотон, ион эрбия переходит в возбужденное состояние ${}^4I_{13/2}$. Безызлучательная релаксация иона Er^{3+} в основное состояние ${}^4I_{15/2}$ сопровождается возбуждением электрона из валентной зоны на уровень $E_c - 0.15\,эВ$, принадлежащий иону Er^{3+}, с последующим возбуждением электрона в зону проводимости. Далее мы рассмотрим особенности подобного процесса безызлучательной релаксации эрбия в СМЛЭ-структурах Si : Er/Si с преципитатными излучающими центрами, характеризуемыми относительно широкой, $30-50\,см^{-1}$, линией излучения. Такие излучающие центры формируются в структурах Si : Er/Si, выращенных СМЛЭ при высокой температуре ($T_{gr} \approx 550-600^\circ C$) [13].

Спектр фототока образца с центрами преципитатного типа, зарегистрированный при температуре $T = 300\,K$, в спектральном диапазоне вблизи $6500\,см^{-1}$, представлен на рис. 1. На том же рисунке для сравнения приведен спектр фотолюминесценции исследуемого образца. Сопоставление приведенных спектров люминесценции и фототока позволяет заключить, что наблюдаемая на фоне широкополосной „подставки“ резонансная особенность в спектре фототока действительно соответствует области излучательных переходов эрбия. Последнее подтверждает, что безызлучательная релаксация ионов Er^{3+} в составе центров преципитатного типа в СМЛЭ-структурах Si : Er/Si происходит по описанному выше механизму.

На рис. 2 сопоставлены спектры фототока, измеренные при $T = 300$ и $80\,K$. В спектре, измеренном при комнатной температуре, имеется выраженное длинноволновое плечо в области волновых чисел $\nu = 6350-6480\,см^{-1}$, соответствующее переходам ионов Er^{3+} в возбужденное состояние ${}^4I_{13/2}$ с верхних

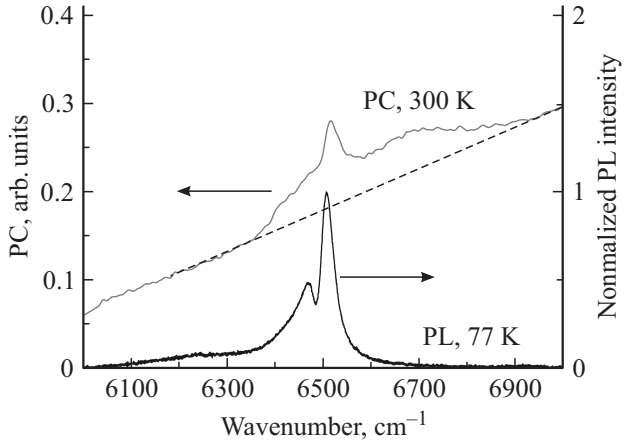

Рис. 1. Спектр фототока (PC) при $T = 300\,K$ и спектр фотолюминесценции (PL) при $T = 77\,K$. Штриховая линия — „фоновый“ ток, обусловленный примесно-дефектными комплексами, не участвующими в процессах возбуждения ионов эрбия.

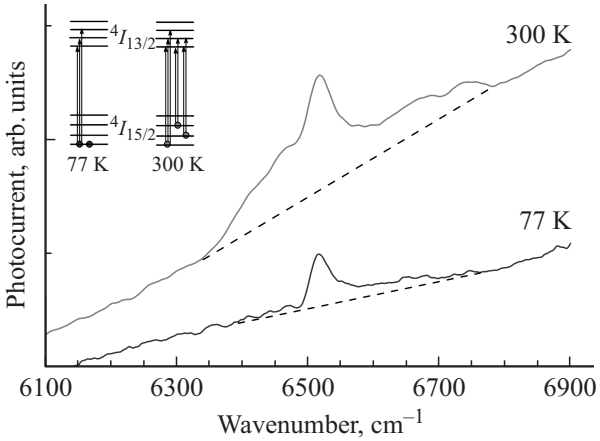

Рис. 2. Спектры фототока исследуемого Si : Er/Si диода при $T = 77$ и $300\,K$. Спектры сдвинуты по вертикали для наглядности. Штриховые линии — уровень примесно-дефектного фонового тока, не связанного с эрбием. На вставке — заселенность штарковских подуровней состояния ${}^4I_{15/2}$ при высоких и низких температурах.

штарковских подуровней основного состояния ${}^4I_{15/2}$ (см. вставку на рис. 2). При низких температурах заселены только нижние подуровни состояния ${}^4I_{15/2}$ и данное длинноволновое плечо не наблюдается.

Температурная зависимость интегральной величины „эрбиевого“ фототока приведена на рис. 3. Представленные данные позволяют выделить три температурных интервала с различным поведением фототока: область фонового тока I_0 ($T = 80-120\,K$), область активационного роста ($T = 120-250\,K$) и область насыщения I_{sat} ($T = 250-300\,K$). Отметим, что нам впервые удалось наблюдать насыщение фототока, обусловленного безызлучательной релаксацией ионов Er^{3+}, с ростом температуры. То, что „эрбиевый“ фототок должен насыщать-

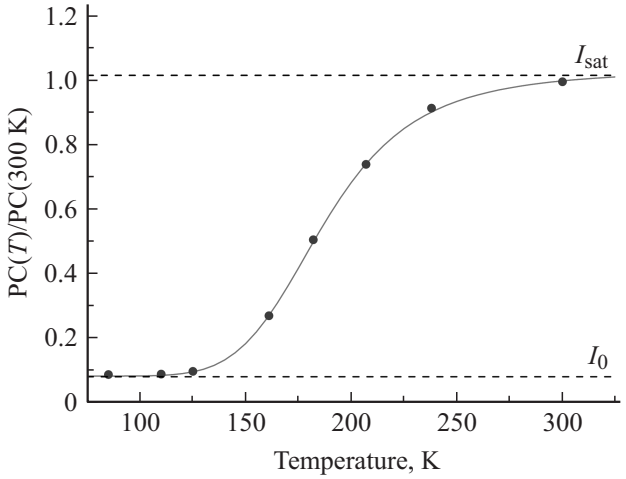

Рис. 3. Температурная зависимость „эрбиевой" компоненты фототока (PC). Данные нормированы на величину фототока при $T = 300$ K. Точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация выражением (1).

ся в области высоких температур, логически понятно. С ростом температуры темп безызлучательной релаксации резко возрастает и становится преобладающим по отношению к темпу излучательной релаксации. В режиме насыщения фототока все возбуждаемые ионы Er^{3+} релаксируют безызлучательно по механизму обратной передачи энергии. Тем не менее в ранее выполненных исследованиях [12,14] насыщение фототока не наблюдалось, в связи с чем авторы [12] предположили наличие в исследованных ими структурах дополнительного канала безызлучательной рекомбинации носителей, связанных на глубоких примесных уровнях. С нашей точки зрения, факт обнаружения нами насыщения фотоотклика ионов Er^{3+} в структурах Si:Er/Si, выращенных методом СМЛЭ, обусловлен значительно меньшей дефектностью слоев Si:Er, выращиваемых в процессе СМЛЭ, по сравнению с имплантационными структурами.

В рамках двухуровневой модели излучающего центра [15] температурная зависимость термоактивируемой компоненты фототока может быть описана следующим выражением (вывод приведен в *Приложении*):

$$I(T) = I_s \frac{1}{1 + (\tau^*/\tau_0)\exp(E_A/kT)}, \qquad (1)$$

где

$$I_s = e\sigma\Phi N_0 V. \qquad (2)$$

Здесь σ — сечение прямого оптического возбуждения ионов эрбия (на длине волны $\lambda \approx 1.53$ мкм), Φ — плотность потока фотонов накачки, N_0 — концентрация ионов Er^{3+}, поглощающих свет с длиной волны вблизи 1.5 мкм, V — объем активной области, e — заряд электрона; E_A и τ^* — энергия активации и характерное время безызлучательной релаксации соответственно (см. *Приложение*), τ_0 — излучательное время жизни иона Er^{3+} в возбужденном состоянии. Аппроксимация данных эксперимента выражением (1) показана сплошной линией на рис. 3. Видно, что выражение (1) хорошо описывает данные эксперимента.

Аппроксимация зависимости $I(T)$ выражением (1) позволяет непосредственно из измерений спектров фототока определить параметры, характеризующие безызлучательную релаксацию ионов эрбия в исследованных структурах, а именно величины E_A и τ^* (см. выражение (П.3)). Значение энергии термической активации фототока составило $E_A \approx 140$ мэВ, для величины τ^* мы получили $\tau^*/\tau_0 \approx 2 \cdot 10^{-4}$ (соответственно $\tau^* \approx 2 \cdot 10^{-7}$ с). Отметим, что определенная из температурной зависимости фототока энергия активации безызлучательной релаксации E_A близка к значениям, приводимым в [7,8], в то время как эффективность взаимодействия, выражаемая величиной $(\tau^*)^{-1}$, для исследованных структур Si:Er/Si значительно меньше известных из литературы данных (в [12] приводится значение $\tau^* \approx 5 \cdot 10^{-9}$ с). На настоящий момент мы не располагаем какими-либо данными, позволяющими объяснить это расхождение.

В области высоких температур преобладающим механизмом релаксации эрбия становится безызлучательная релаксация с генерацией электронно-дырочной пары ($\tau \to \tau_{NR}$), при этом $I(T) \to I_s$. Поскольку, в отличие от всех предшествующих работ [12,14], мы наблюдаем выраженное насыщение „эрбиевого" фототока в области высоких температур, мы можем непосредственно измерить величину I_s и по соотношению (2) оценить концентрацию N_0 ионов эрбия, дающих вклад в фототок в процессе безызлучательной релаксации.

По спектру фототока при $T = 300$ K мы оценили величину $I_s \approx 1 \cdot 10^{-12}$ A. Для величины сечения поглощения мы взяли значение $\sigma = 2 \cdot 10^{-20}$ см^2 [12], поскольку преобладающим типом оптически активных центров в исследуемых нами образцах, как и в исследованном в [12] образце, являлись центры преципитатного типа. Величины плотности потока фотонов и объема составляли $\Phi = 10^{15}$ см$^{-2} \cdot$ с$^{-1}$, $V = 6 \cdot 10^{-6}$ см^3. Отсюда получаем $N_0 = 5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, что составляет $\sim 5\%$ от полной концентрации эрбия в слое Si:Er (по данным вторично-ионной масс-спектрометрии, $N_{Er}^{tot} = 10^{18}$ см$^{-3}$). Отметим, что оценка N_0 соответствует по порядку величины характерным значениям оптической активности эрбия в слоях Si:Er, $\sim (1-10)\%$ [1,16]. Последнее обстоятельство очень важно и позволяет предположить, что эрбийсодержащие центры, дающие вклад в люминесценцию при рекомбинационном механизме возбуждения, обязательно подвержены безызлучательной релаксации по механизму обратной передачи энергии (back-transfer).

Сравним данные, полученные из спектроскопии фототока, с данными кинетики фотолюминесценции эрбия. Осциллограммы спада фотолюминесценции после окончания импульса накачки, зарегистрированные при различных температурах, приведены на рис. 4. Быстрая компонента сигнала соответствует оже-релаксации эрбия, локализованного вне обедненной области диода, на

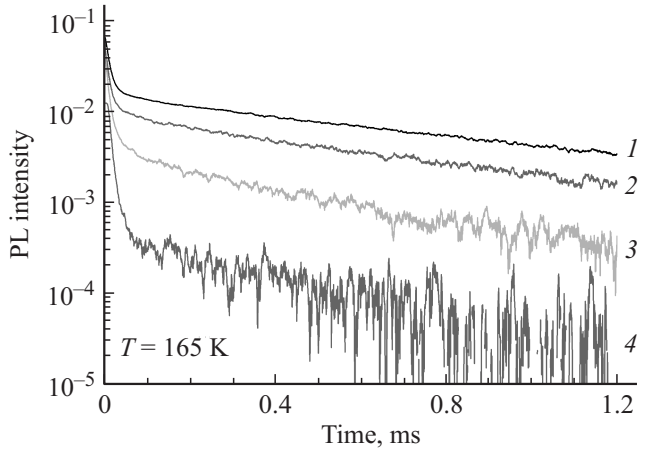

Рис. 4. Кинетика фотолюминесценции (PL) эрбия в исследуемом образце при различных температурах T, K: *1* — 85, *2* — 110, *3* — 145, *4* — 165.

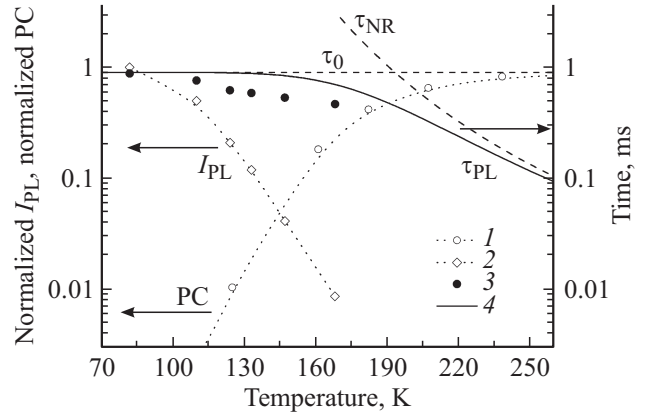

Рис. 5. Температурные зависимости величины „эрбиевого" фототока (PC, *1*), интенсивности (I_{PL}, *2*) и времени спада фотолюминесценции ионов Er^{3+} (τ_{PL}, *3*). Штриховая линия — излучательное время жизни иона Er^{3+} в возбужденном состоянии (τ_0) и рассчитанная (по данным фототока) температурная зависимость времени безызлучательной релаксации (τ_{NR}). *4* — рассчитанное согласно выражению (П.2) время спада эрбиевой фотолюминесценции.

избыточных носителях заряда. Медленная компонента люминесцентного отклика соответствует ионам эрбия, локализованным в обедненной области диода, для которых основным механизмом безызлучательной релаксации является back-transfer-релаксация. Из рис. 4 видно, что характерное время спада медленной компоненты люминесцентного отклика весьма слабо изменяется в диапазоне температур $T = 80-170$ K, т. е. влияние процессов безызлучательной релаксации на эффективное время жизни возбужденного иона Er^{3+} в исследованном интервале температур мало.

На рис. 5 данные кинетики ФЛ сопоставлены с результатами исследования температурного гашения эрбиевой фотолюминесценции и данными по температурной зависимости „эрбиевого" фототока. Здесь же приведены результаты расчета времени безызлучательной релаксации τ_{NR} и времени спада эрбиевой ФЛ τ_{PL} по данным спектроскопии фототока в соответствии с выражениями (П.2) и (П.3). Следует отметить, что рассчитанная зависимость $\tau_{PL}(T)$ удовлетворительно описывает экспериментальные данные, что подтверждает правильность наших представлений об особенностях безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} в исследуемых структурах Si : Er/Si, выращенных методом СМЛЭ. Из рис. 5 видно, что интенсивность эрбиевой ФЛ испытывает сильное температурное гашение (на 2 порядка величины в диапазоне $T = 80-170$ K), в то время как время спада эрбиевой ФЛ меняется очень слабо. Это означает, что для излучающих центров преципитатного типа процессы безызлучательной релаксации ионов Er^{3+} не вносят существенного вклада в температурное гашение эрбиевой люминесценции в рассмотренном интервале температур. Данные спектроскопии фототока позволяют утверждать, что включение back-transfer-релаксации эрбия в исследованных нами структурах Si : Er/Si происходит при заметно более высоких температурах по сравнению с имплантационными структурами [7,8,12]. К сожалению, резкий спад интенсивности эрбиевой люминесценции с ростом температуры не позволил провести фотолюминесцентные измерения с временны́м разрешением при $T > 170$ K.

Ранее [10] мы отмечали, что выращенные методом СМЛЭ структуры Si : Er/Si с излучающими центрами, для которых характерны атомно-узкие линии люминесценции (в частности структуры с центрами типа Er-1 и Er-O1 [17]), характеризуются заметно меньшей энергией активации безызлучательной релаксации, составляющей, по данным кинетики люминесценции, $E_A \approx 70$ мэВ. Указанный процесс безызлучательной релаксации мы тем не менее отнесли к релаксации по механизму обратной передачи энергии, показав, что он характерен для ионов Er^{3+}, локализованных в обедненной области диодной структуры, и наблюдается при более высоких температурах по сравнению с оже-девозбуждением.

В данной работе мы детально исследовали спектры фототока структур Si : Er/Si с излучающими центрами типа Er-O1 и Er-1. Измерения были проведены в широком интервале температур, заведомо включающем в себя температуры, при которых, согласно данным кинетики люминесценции, безызлучательная релаксация преобладает над излучательной. Тем не менее в спектрах фототока диодных СМЛЭ-структур Si : Er/Si с излучающими центрами Er-O1 и Er-1 мы не наблюдали каких-либо резонансных особенностей, указывающих на генерацию свободных носителей в процессе безызлучательной релаксации. Это дает основания предположить, что рождаемые в процессе безызлучательной релаксации эрбия связанные носители заряда рекомбинируют и не дают вклада в фототок. Отметим, что малая энергия активации back-transfer-релаксации с необходимостью предполагает достаточно большой (по сравнению с величиной E_A) дефицит энергии, требуемой для выброса

носителей с промежуточного состояния, формируемого в процессе девозбуждения иона эрбия, в свободную зону.

4. Заключение

Исследованы особенности безызлучательной релаксации ионов эрбия в диапазоне температур $T > 100$ K в структурах Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. В структурах с излучающими центрами преципитатного типа наблюдался резонансный фотоотклик на длине волны $\lambda \approx 1.54$ мкм (соответствующей переходу $^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ в $4f$-оболочке иона Er^{3+}), указывающий на безызлучательную релаксацию ионов эрбия по механизму обратной передачи энергии. Энергия активации безызлучательной релаксации составила величину $E_A \approx 140$ мэВ. По данным спектроскопии фототока оценена концентрация Er-содержащих центров, подверженных данному механизму безызлучательной релаксации: $N_0 \approx 5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$. По порядку величины оценка N_0 соответствует концентрации оптически активных ионов эрбия при экситонном механизме возбуждения слоев Si:Er. В выращенных методом СМЛЭ структурах Si:Er/Si с преобладанием излучающих центров Er-O1 и Er-1 с линейчатым спектром излучения безызлучательная релаксация ионов Er^{3+} характеризуется значительно меньшей энергией активации (~ 70 мэВ для центров типа Er-O1) и не сопровождается, по данным спектроскопии фототока, генерацией свободных носителей заряда.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-02-00953, 12-02-31287, 13-02-00397, 14-02-31660) и программ РАН.

Приложение

Вывод выражения для температурной зависимости фототока, обусловленного безызлучательной релаксацией ионов эрбия по механизму обратной передачи энергии

В предположении, что все носители, генерируемые при back-transfer-релаксации ионов эрбия, достигают контактов, величина I фототока определяется, выражением

$$I = e\frac{N^* V}{\tau_{\mathrm{NR}}}.$$

Здесь N^* — концентрация возбужденных ионов эрбия, τ_{NR} — время безызлучательной релаксации, сопровождающейся рождением электронно-дырочной пары, V — объем активной области образца, e — заряд электрона. В рамках двухуровневой модели излучающего центра [15] стационарное значение N^* при постоянной плотности мощности накачки описывается выражением

$$N^* = N_0 \frac{\sigma\tau\Phi}{1+\sigma\tau\Phi},$$

где N_0 — концентрация ионов эрбия, поглощающих свет с длиной волны вблизи 1.5 мкм, σ — сечение прямого оптического возбуждения эрбия, Φ — плотность потока фотонов накачки, τ — время жизни иона Er^{3+} в возбужденном состоянии. В наших экспериментах реализуется случай малой плотности мощности возбуждения, поэтому

$$N^* = N_0\sigma\tau\Phi,$$

и выражение для величины фототока принимает вид

$$I = e(N_0 V)\sigma\Phi\frac{\tau}{\tau_{\mathrm{NR}}}. \qquad (\text{П}.1)$$

Время жизни иона эрбия в возбужденном состоянии определяется двумя параллельными процессами:

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + \tau_{\mathrm{NR}}^{-1}, \qquad (\text{П}.2)$$

т.е. имеют место излучательная релаксация с характерным временем τ_0 (~ 1 мс), не зависящим от температуры, и безызлучательная релаксация, время которой $\tau_{\mathrm{NR}}(T)$ экспоненциально зависит от температуры:

$$\tau_{\mathrm{RN}} = \tau^* \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right). \qquad (\text{П}.3)$$

Подставляя (П.2) и (П.3) в выражение (П.1), получим искомое выражением температурной зависимости „эрбиевого“ фототока:

$$I(T) = I_s \frac{I}{1+(\tau^*/\tau_0)\exp(E_A/kT)},$$

где $I_s = e\sigma\Phi N_0 V$.

Список литературы

[1] A. Polman. J. Appl. Phys., **82**, 1 (1997).
[2] A.J. Kenyon. Semicond. Sci. Technol., **20**, R65 (2005).
[3] N.Q. Vinh, N.N. Ha, T. Gregorkiewicz. Proc. IEEE, **97**, 1269 (2009).
[4] P.B. Klein, G.S. Pomrenke. Electron. Lett., **24** (24), 1502 (1988).
[5] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, **34** (5), 519 (2000).
[6] В.П. Кузцецов, З.Ф. Красильник. ФТП, **44** (3), 413 (2010).
[7] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, L.C. Kimerling. Phys. Rev. B, **54**, 17 603 (1996).
[8] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. Phys. Rev. B, **57**, 4443 (1998).
[9] В.Б. Шмагин, Б.А. Андреев, А.В. Антонов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, О.А. Кузнецов, Е.А. Ускова, C.A.J. Ammerlaan, G. Pensl. ФТП, **36** (2), 178 (2002).
[10] K.E. Kudryavtsev, V.P. Kuznetsov, V.B. Shmagin, D.V. Shengurov, Z.F. Krasilnik. Physica E, **41**, 899 (2009).
[11] P.G. Kik, M.A.J. de Dood, K. Kikoin, A. Polman. Appl. Phys. Lett., **70**, 1721 (1997).

[12] N. Hamelin, P.G. Kik, J.F. Suyver, K. Kikoin, A. Polman. J. Appl. Phys., **88**, 5381 (2000).
[13] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, О.А. Солдаткин, М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, И.Н. Яссиевич. ФТТ, **43** (6), 979 (2001).
[14] T.D. Chen, M. Platero, M. Opher-Lipson, J. Palm, J. Michel, L.C. Kimerling. Physica B, **273–274**, 322 (1999).
[15] S. Coffa, F. Priolo, G. Franzo, V. Bellani, A. Carnera, C. Spinella. Phys. Rev. B, **48**, 11 782 (1993).
[16] G.N. van der Hoven, J.H. Shin, A. Polman, S. Lombardo, S.U. Campisano. J. Appl. Phys., **78**, 2642 (1995).
[17] А.Ю. Андреев, Б.А. Андреев, М.Н. Дроздов, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник, Ю.А. Карпов, Р.А. Рубцова, М.В. Степихова, Е.А. Ускова, В.Б. Шмагин, H. Ellmer, L. Palmetshofer, K. Piplits, H. Hutter. ФТП, **33** (2), 156 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

Features of back-transfer deexcitation of Er^{3+} ions in silicon epitaxial structures

K.E. Kudryavtsev+, D.I. Kryzhkov+*, A.V. Antonov+*, D.V. Shengurov+, V.B. Shmagin+*, Z.F. Krasilnik+**

+ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia
* Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Features of non-radiative deexcitation of Er^{3+} ions in Si:Er layers grown by sublimation molecular-beam epitaxy have been studied. In Si:Er/Si diode structures with SiO_2-like erbium sites, resonant photoresponse at $1.5\,\mu$m wavelength has been observed, which was a direct evidence of back-transfer deexcitation of Er^{3+} ions. For the first time, saturation of erbium-related photocurrent has been observed at high temperatures, and concentration of Er^{3+} sites, subjected to back-transfer deexcitation and contributing into resonant photocurrent has been estimated ($N_0 \approx 5 \cdot 10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$). The above value is close to the concentration of optically active erbium ions typical to Si:Er layers under carrier-mediated excitation. For grown Si:Er/Si structures with different types of Er^{3+} emitting centers, differences in back-transfer process are pointed out.