

ГЛУБОКИЕ ЦЕНТРЫ ЭРБИЯ В КРЕМНИИ. II. ЭКСПЕРИМЕНТ

© Н.Т.Баграев, Д.Е.Онопко*, А.И.Рыскин*, Ю.А.Карпов†

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

*Всероссийский научный центр «ГОИ им. С.И. Вавилова»,
199034 Санкт-Петербург, Россия

†Государственный институт редкометаллической промышленности,
Москва, Россия

(Получена 7 сентября 1995 г. Принята к печати 25 декабря 1995 г.)

На основе результатов первой части работы (см. I. Теория) предложены модели низкосимметричных центров эрбия, согласующиеся с данными исследований электрических, магнитных и оптических свойств монокристаллов Si:Er, легированных при выращивании по методу Чохральского. Концентрационная зависимость внутрицентральной люминесценции иона Er^{3+} (на длине волны 1.54 мкм) свидетельствует о взаимосвязанности электрических и оптических свойств центров эрбия и интерпретируется в рамках оже-процесса резонансной передачи энергии в f -оболочку от неравновесных носителей, рекомбинирующих через глубокий уровень в запрещенной зоне. В качестве наиболее перспективных центров эрбия, способных увеличивать эффективность его внутрицентральной люминесценции в кристаллах кремния, легированных в расплаве и в процессе ионной имплантации, предлагаются: $\text{P}^+ + \text{Er}_2\text{O}^-$ и $\text{Er} + \text{V}_2$, $\text{Er} + \text{C} + \text{O} + \text{V}_2$ соответственно.

Точечные дефекты в кремнии, легированном эрбием в процессе выращивания из расплава по методу Чохральского

Характерным обстоятельством, нуждающимся в объяснении, является отсутствие электрической активности и слабый парамагнетизм низкосимметричных комплексов редкоземельных (РЗ) элементов, ответственных за внутрицентрковую люминесценцию при электронных переходах в $4f$ -оболочке РЗ атома (см. ссылки [4–10] в первой части работы — I. Теория [1]). Помимо тетраэдрического центра эрбия (возможно, обусловленного межзельным ионом Er^{2+}), другие центры эрбия, как оптически активные, так и неактивные, не были зарегистрированы при исследовании электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в Si:Er (см. [1]). Более того, изучение оптической поляризации ядерных моментов ^{29}Si с помощью ядерного магнитного резонанса (ЯМР) показывает, что присутствие точечных центров РЗ элементов не оказывает влияния на ядерную спин-решеточную релаксацию

в монокристаллах кремния. Этот факт убедительно свидетельствует о непарамагнитном характере основного состояния РЗ атома в кремнии, легированном в процессе выращивания по методу Чохральского (в дальнейшем $Cz-Si:Er$). Было обнаружено, что электрическая и магнитная активность РЗ элементов в кремнии проявляется тем слабее, чем меньше концентрация исходных донорных и акцепторных примесей (см. ссылки [15,16] в [1]).

Для объяснения полученных экспериментальных зависимостей проводимости, магнитной восприимчивости и фотопроводимости было высказано предположение о том, что в процессе легирования РЗ атом образует в кремнии антиферромагнитные пары ионов, компоненты которых обменно связаны через валентные электроны атома остаточной примеси (O, C или S). Иными словами, будучи введенными в равновесных условиях РЗ атомы присутствуют в кремнии в виде антиферромагнитных молекул, которые начинают проявлять электрическую активность и ван-Флекковский парамагнетизм лишь при взаимодействии с электронами мелких доноров.

Однако осталась неясной микроскопическая модель такого комплексного центра. Создание модели этого центра существенно и для понимания механизма возбуждения внутрицентральной люминесценции эрбия. В соответствии с выводами [1], основными элементами подобной модели должны быть реконструированные (C_{3v} или C_{2v}) ионы эрбия.

Концентрация эрбия в кристаллах кремния n -типа проводимости (мелкий донор — фосфор), легированных при выращивании из расплава в нейтральной атмосфере, измерялась методом нейтронно-активационного анализа и варьировалась в широких пределах. Было исследовано несколько серий образцов $Cz-Si:Er$ с концентрациями эрбия $N_{Er} = 10^{13} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$, имеющих различную концентрацию фосфора $N_P = 2 \cdot 10^{11} \div 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Спектры примесной фотопроводимости регистрировались при $T = 77 \text{ К}$ в условиях 100%-й модуляции света на частоте 30 Гц. Магнитная восприимчивость изучалась по методу Фарадея. Спектры люминесценции регистрировались при $T = 77 \text{ К}$ при возбуждении первой гармоникой непрерывного неодимового лазера мощностью 1 Вт.

Как показало исследование фотопроводимости в области собственного и примесного поглощения света, при концентрации эрбия $2 \cdot 10^{13} < N_{Er} < 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ его центры электрически неактивны и не создают глубокий уровень в запрещенной зоне кремния. При увеличении концентрации эрбия ($N_{Er} > 5 \cdot 10^{14}$, $N_P = 2 \cdot 10^{14}$) проводимость образцов уменьшается (рис. 1, а) и возникает примесная фотопроводимость (рис. 1, б), спектральная зависимость которой приводит к выводу о наличии акцепторного уровня ($E_c - 0.4 \text{ эВ}$). Следует отметить, что в условиях сильной засветки наблюдаемые акцепторные центры слабо влияют на электрофизические характеристики кристаллов, что свидетельствует о большом сечении фотоионизации указанного глубокого уровня.

Сравнение спектров фотопроводимости кристаллов $Cz-Si:Er$ с различной концентрацией фосфора показывает, что в примесной области фототок I_{ph} (и, следовательно, степень заполнения электронами глубокого акцепторного уровня) пропорционален N_P . В частности, для

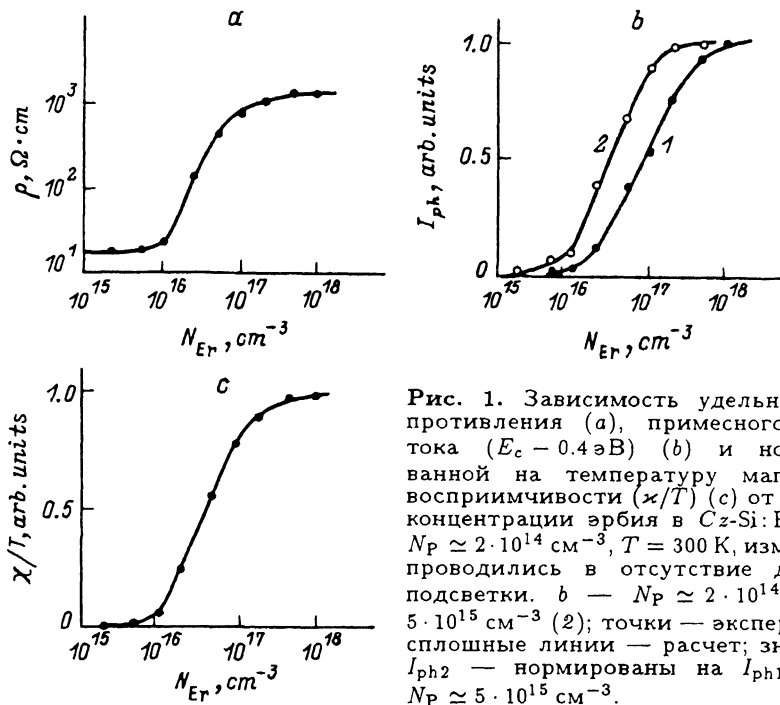


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления (а), примесного фототока ($E_c - 0.4 \text{ эВ}$) (b) и нормированной на температуру магнитной восприимчивости (χ/T) (с) от полной концентрации эрбия в Cz-Si:Er . а — $N_P \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T = 300 \text{ К}$, измерения проводились в отсутствие дневной подсветки. б — $N_P \approx 2 \cdot 10^{14}$ (1) и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (2); точки — эксперимент, сплошные линии — расчет; значения I_{ph2} — нормированы на I_{ph1} . с — $N_P \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

образцов 1 и 2 (рис. 1, b), для которых значения N_P различаются в 25 раз, $I_{ph2} = 25I_{ph1}$. Это указывает на электрическую и оптическую активность только тех центров эрбия, которые располагаются вблизи мелких доноров. Можно предположить, что центры эрбия образуют акцепторный уровень вследствие обменного взаимодействия с донорными центрами фосфора, в процессе которого слабо связанный электрон донора переходит на ближайший центр эрбия, формируя глубокий уровень ($E_c - 0.4 \text{ эВ}$). Пропорциональность примесного фототока концентрации фосфора свидетельствует о том, что в исследованных образцах большинство центров эрбия электрически неактивны. Этот вывод согласуется с оценкой концентрации электрически активных центров N_{Er}^a , дающих вклад в примесную проводимость. Эта оценка производилась в предположении, что распределение центров эрбия и фосфора является однородным:

$$N_{Er}^a = N_P [1 - \exp(-N_{Er} V)], \quad (1)$$

где $V = (4/3)\pi r_{cr}^3$, r_{cr} — критическое расстояние между мелким донором и центром эрбия, при котором становится существенным обменное взаимодействие,

$$r_{cr} = (1/2)b \ln(N_P \sigma_e v \tau), \quad (2)$$

b — боровский радиус мелкого донора, σ_e — сечение захвата на него электрона, v — тепловая скорость последнего, τ — период модуляции монохроматического света накачки.

Расчетные значения $I_{ph} \sim N_{Er}^a$, полученные с учетом (1), показаны на рис. 1, b.

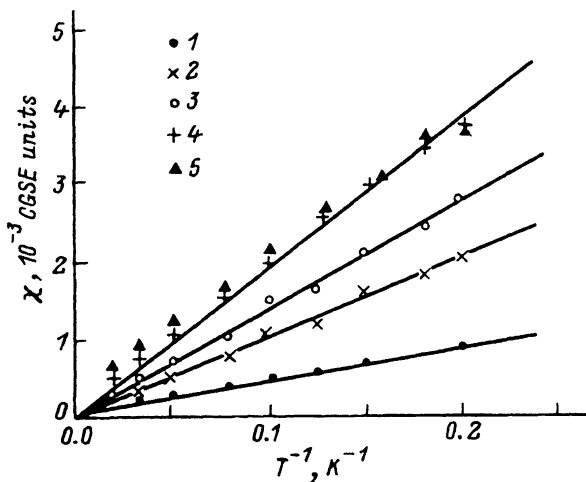


Рис. 2. Зависимости магнитной восприимчивости от обратной температуры в Cz-Si:Er. $N_P \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. N_{Er} , см^{-3} : 1 — $2 \cdot 10^{16}$, 2 — $2 \cdot 10^{16}$, 3 — $1.0 \cdot 10^{17}$, 4 — $5 \cdot 10^{17}$, 5 — $1.0 \cdot 10^{18}$.

Для определения модели эрбиевого центра, электрическая активность которого зависит от его расположения относительно мелкого донора, были проведены измерения магнитной восприимчивости (χ) кристаллов Cz-Si:Er. При малых значениях N_{Er} магнитная восприимчивость исследованных образцов практически равна нулю во всем диапазоне температур (рис. 1, с). При $N_{Er} > 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ поведение χ подчиняется закону Кюри. На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные восприимчивости образцов от обратной температуры:

$$\chi = \frac{\mu_B^2 g^2}{3kT} \left\{ N_{Er}^a [I(I+1) - I'(I'+1)] + N_P I'(I'+1) \right\}, \quad (3)$$

где μ_B — магнетон Бора, g — g -фактор свободного электрона, I' и I — магнитные моменты фосфора и центра эрбия соответственно. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетом, проведенным для РЗ центра, состоящего из двух ионов Er^{3+} и электрона, захваченного с мелкого донора, фосфора.

Таким образом, основному состоянию центра эрбия в кремнии в области малых значений N_{Er} соответствует электрически неактивная молекула, состоящая из двух тригонально реконструированных ионов эрбия (см. [1]), связанных антиферромагнитным взаимодействием. Эрбий, как и большинство РЗ элементов, в процессе легирования интенсивно взаимодействует с остаточными примесями, важнейшей из которых в кристаллах, выращенных по методу Чохральского, является кислород. Поэтому можно предположить, что последний входит в состав центра эрбия в виде мостикового иона, валентные электроны которого обеспечивают обменное взаимодействие ионов эрбия. Одновременно кислород пассивирует оборванные связи, образовавшиеся при тригональной реконструкции узельного эрбия (см. рисунок, а в [1]). На рис. 3 представлена модель эрбиевого центра, по-видимому, являющегося доминирующим в кристаллах, легированных при выращивании по методу Чохральского. При малых значениях N_{Er} этот

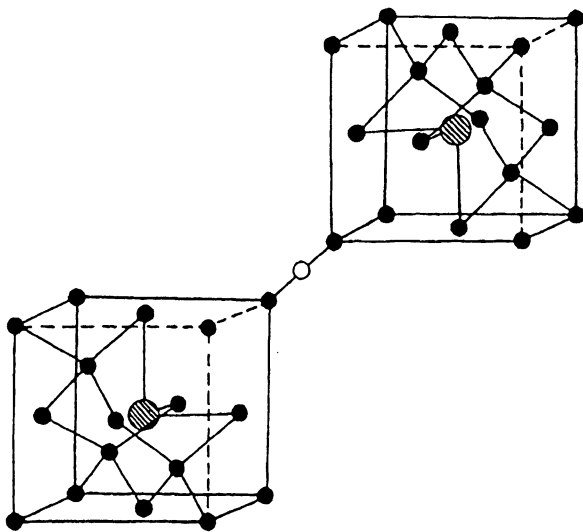


Рис. 3. Комплекс из двух РЗ атомов с мостиковым кислородом в кремнии. Здесь и далее: РЗ атом — штрихованный кружок, кремний — черный кружок, кислород — пустой кружок.

центр не вносит вклада в магнитную восприимчивость и не влияет на процессы ядерной спин-решеточной релаксации.

При увеличении N_{Er} антиферромагнитно-упорядоченная пара ионов эрбия посредством косвенного обмена через электрон мелкого донора переходит в ферромагнитное состояние, образуя глубокий акцепторный уровень ($E_c - 0.4$ эВ). Связь магнитной и электрической активности эрбия в кремнии подтверждается корреляцией концентрационных зависимостей восприимчивости — с одной стороны, и проводимости и фотопроводимости — с другой (рис. 1, а-с).

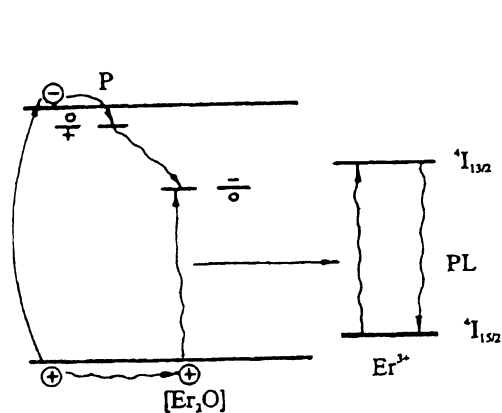


Рис. 4. Механизм возбуждения иона Er^{3+} в кремнии *n*-типа проводимости, содержащем Er_2O -центры. Возбуждение люминесценции (PL) иона Er^{3+} осуществляется за счет оже-перехода и энергии рекомбинации фотовозбужденной дырки.

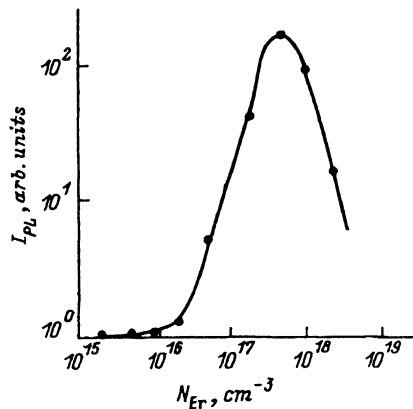
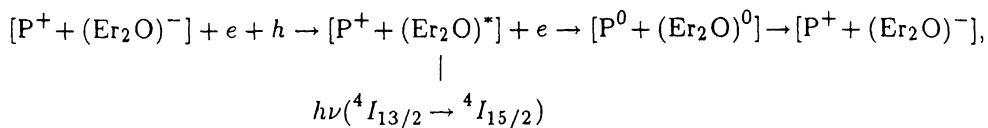


Рис. 5. Зависимость интенсивности фотолуминесценции (I_{PL}) на длине волны $\lambda = 1.54$ мкм, соответствующей внутриатомному переходу ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ иона эрбия Er^{3+} , от его полной концентрации в *Cz-Si:Er*. $N_{Er} \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

В рамках предложенной модели центра находит объяснение концентрационная зависимость интенсивности внутрицентральной фотолуминесценции эрбия I_{PL} (рис. 4). Усиление I_{PL} коррелирует с возникновением глубокого уровня ($E_c - 0.4 \text{ эВ}$), принадлежащего донорно-акцепторной паре $P^+ + (Er_2O)^-$ (рис. 5 и рис. 1, *a-c*). Важно при этом; что энергетический зазор между акцепторным уровнем и валентной зоной ($\sim 0.8 \text{ эВ}$) практически совпадает с энергией возбуждения иона эрбия в ${}^4I_{13/2}$ -состояние. Это обстоятельство создает возможность для резонансной передачи энергии рекомбинации носителей в экранированную $4f$ -оболочку по следующему механизму:



где $(Er_2O)^*$ — нейтральное состояние молекулярного центра эрбия, в котором один из ионов Er^{3+} находится в возбужденном ${}^4I_{13/2}$ -состоянии.

Эффективность подобного оже-процесса в $Cz-Si:Er$ обеспечивается, с одной стороны, его резонансным характером, а с другой — сравнительной согласованностью времени рекомбинации носителей на центре со временем жизни возбужденного состояния иона Er^{3+} (τ_{Er}). Несмотря на то, что сечение захвата электрона на ионизованный донор фосфора является практически максимально возможным ($\sim 10^{-13} \text{ см}^2$), время его перехода на ближайший молекулярный центр Er_2O , определяемое процессом обменного взаимодействия (типа RKKI — см. ссылку [15] в [1]), достаточно велико и, по данным фотопроводимости, составляет несколько мс, т.е. близко к $\tau_{Er} = 0.5 \text{ мс}$. При $N_{Er} > 5 \cdot 10^{17}$, когда скорость процесса $P^0 + (ErO)^0 \rightarrow P^+ + (ErO)^-$ значительно возрастает, интенсивность люминесценции падает (рис. 4), поскольку в этих условиях энергия рекомбинации фотовозбужденных носителей реализуется преимущественно безызлучательным образом.

Точечные дефекты в кремнии, легированном эрбием в процессе ионной имплантации

В кристаллах кремния, выращенных как по методу Чохральского, так и по методу зонной плавки (в дальнейшем $FZ-Si$), ионная имплантация эрбия и последующие отжиги стимулируют образование реконструированного донорного центра C_{2v} -симметрии (рисунок, *b* в [1]), представляющего собой результат взаимодействия межузельного эрбия и кремниевой вакансии. Донорные центры подобного типа являются высоко термостабильными и полностью удаляются только при температуре отжига $T_{ан} > 1100^\circ$ [2].

Будучи аналогом высокотемпературных кремниевых термодоноров, одиночный центр эрбия c_{2v} -симметрии может индуцировать в запрещенной зоне глубокий уровень с энергией $E_c - 0.27 \text{ эВ}$ [2]. Такой донор действительно был обнаружен в имплантированных образцах FZ - и $Cz-Si:Er$ (см. [1]), хотя вопрос о его полной идентификации остается открытым ввиду сложности получения данных ЭПР для указанных кристаллов.

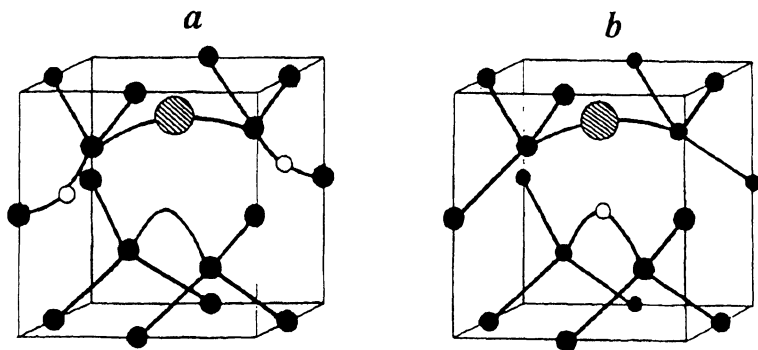


Рис. 6. Точечные центры эрбия, возникающие в процессе формирования кислородсодержащих термодоноров различных модификаций в $Cz-Si$: a — [3], b — [4].

Следует отметить, что донорные центры эрбия с энергией ионизации $E_c - 0.27$ эВ, по-видимому, не вносят основного вклада во внутрицентровую люминесценцию из-за значительного отличия энергии захвата дырки $E_v + 0.92$ эВ от энергии внутрицентрального перехода (см. [1]).

Следует отметить, что рассматриваемые донорные центры эрбия C_{2v} -симметрии будут включать в себя ионы Er^{2+} и Er^{3+} в кремнии n -типа проводимости соответственно. При этом механизм передачи энергии рекомбинирующих носителей для возбуждения внутрицентрального перехода практически идентичны. Данный процесс более эффективен, однако, в кристаллах p -типа проводимости, в которых основное состояние дефекта соответствует Er^{3+} , тогда как в кремнии n -типа проводимости ионы Er^{3+} образуются только в процессе захвата фотовозбужденной дырки ($Er^{2+} + h \rightarrow Er^{3+}$). В последнем случае передача рекомбинационной энергии в f -оболочку ослабляется.

Интенсивность люминесценции эрбия, имплантированного в монокристаллы $Cz-Si$, содержащие значительную концентрацию остаточных примесей (в первую очередь, кислорода), существенно выше, чем в кристалле $FZ-Si:Er$. Учитывая это обстоятельство, а также то, что в $FZ-Si:Er$ эта люминесценция усиливается сопутствующей имплантацией кислорода (см. [1]), можно было бы предположить, что доминирующими люминесцентными центрами в имплантированных кристаллах кремния являются аналоги кислородсодержащих термодоноров, модели которых, следуя [3,4], представлены на рис. 6.

Кислородсодержащие термодоноры представляют собой семейство двойных термодоноров двух типов, энергии ионизации которых находятся в пределах $0.050 \div 0.069$ эВ (D^0/D^+), $0.114 \div 0.156$ эВ (D^+/D^{++}) и изменяются в зависимости от вклада различных остаточных примесей, мелких доноров и акцепторов, участвующих в их образовании [3]. Поэтому обнаруженные двойные доноры в $Si:Er$ с энергиями ионизации, близкими к приведенным выше, в принципе могли бы быть отнесены к кислородсодержащим термодонорам. Они, однако, также не вносят определяющего вклада в интенсивность внутрицентральной люминесценции эрбия из-за отсутствия отмеченных выше оптимальных (резонансных) условий для оже-процесса возбуждения иона эрбия

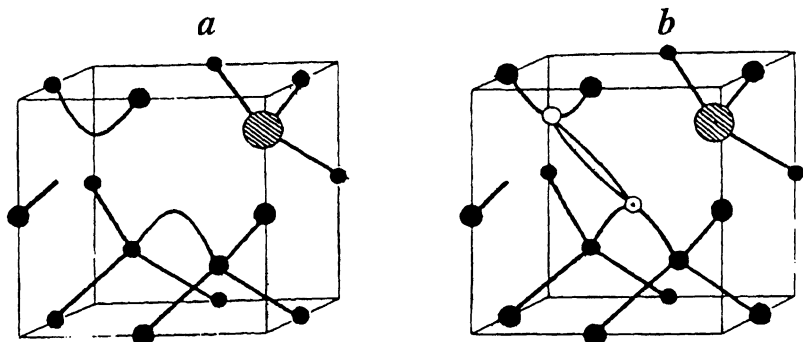


Рис. 7. Примесные центры, состоящие из атома эрбия и дивакансии (а), атома эрбия и *K*-центра (b). Углерод — пустой кружок с точкой внутри.

в $^4I_{13/2}$ -состояние. Отметим также, что эти центры характеризуются низкой температурой отжига ($T_{an} < 900^\circ\text{C}$; однако присутствие эрбия может увеличить эту температуру).

Наиболее перспективными точечными центрами, способными индуцировать интенсивную внутрицентровую люминесценцию в ионно-имплантированном Si:Er, по-видимому, являются комплексы ионов Er^{3+} с дивакансией V_2 (FZ-Si, рис. 7, а) [5] и *K*-центром $\text{C} + \text{O} + V_2$ (Cz-Si, рис. 7, b) [5,6]. Данное предположение подтверждается результатами исследований влияния высокотемпературных отжигов имплантированных слоев на интенсивность внутрицентральной люминесценции эрбия как в FZ-Si:Er, так и в Cz-Si:Er (см. [1]). Интенсивность фотолюминесценции с $\lambda = 1.54$ мкм возрастает в FZ-Si:Er вплоть до $T_{an} = 600^\circ\text{C}$ и при более высоких температурах ($T_{an} > 750^\circ\text{C}$) начинает резко уменьшаться, тогда как в Cz-Si:Er она монотонно возрастает с увеличением T_{an} и достигает максимума при $T_{an} = 900^\circ\text{C}$. В ходе подобных термических отжигов большинство точечных центров трансформируется в дивакансии ($T_{an} = 400 \div 600^\circ\text{C}$) и *K*-центры ($T_{an} = 600 \div 900^\circ\text{C}$). Поскольку концентрация кислорода в Cz-Si на 2 порядка больше, чем в FZ-Si, можно предположить, что в имплантированном Cz-Si:Er будет доминировать комплекс $\text{Er}^{3+} + \text{K}$ -центр.

Оба комплекса ($\text{Er} + V_2$, $\text{Er} + \text{C} + \text{O} + V_2$) имеют в своем составе кремниевую оборванную связь и представляют собой амфотерные цен-

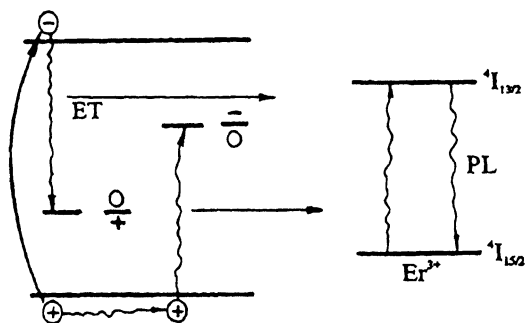
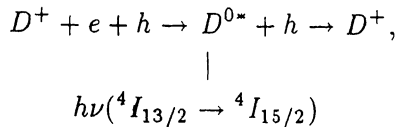
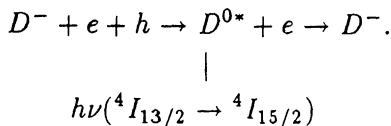


Рис. 8. Механизм возбуждения иона Er^{3+} в кремнии, содержащем эрбиевые примесные центры с кремниевыми оборванными связями.

тры. Поскольку оборванная связь в монокристаллах кремния образует два симметричных глубоких уровня в запрещенной зоне, $D^0/D^+ - E_v + 0.4 \text{ эВ}$ и $D^-/D^0 - E_c - 0.4 \text{ эВ}$ [2], (можно предположить, что наличие в составе центров ионов эрбия, атомов кислорода и углерода лишь незначительно изменяет эти величины) условия резонансной передачи энергии рекомбинирующих носителей в f -оболочку выполняются практически идеально независимо от положения уровня Ферми (рис. 8). При этом в кремнии p -типа проводимости возбуждение иона эрбия в ${}^4I_{13/2}$ -состояние индуцируется в процессе захвата неравновесного электрона:



тогда как в кристаллах n -типа проводимости приводящий к возбуждению иона Er^{3+} оже-процесс реализуется при захвате дырки в D^- -состояние:



По-видимому, второй канал более эффективен, так как ему соответствует большее время пребывания центра в нейтральном состоянии.

Таким образом, рассмотренные низкосимметричные комплексы $\text{Er} + V_2$ и $\text{Er} + \text{C} + \text{O} + V_2$ являются реальными кандидатами для генерации интенсивной внутрицентральной люминесценции в FZ - и Cz -кристаллах кремния соответственно. Их окончательная идентификация в этом качестве возможна, однако, лишь с помощью прецизионных оптических экспериментов, включая спектроскопию во внешних полях и ЭПР.

Нельзя исключать также, что отсутствие положительных результатов наблюдения ЭПР низкосимметричных центров в имплантированных слоях Si : Er может быть обусловлено образованием антиферромагнитных пар реконструированных центров эрбия, аналогичных приведенной выше (рис. 3). Подобно этому дефекту они должны быть электрически неактивны и, по-видимому, будут представлять собой изоэлектронные ловушки, индуцированные деформационным потенциалом центра [7,8].

В заключение отметим, что кубические межузельные ионы Er^{2+} (см. [9,10] в [1]) могут образовывать центры двух типов — мостиковые ионы Er^{2+} с тригональной релаксацией атомов кремния, особенно во второй координационной сфере, и тетраэдрические центры Er^{2+} с орторомбическим смещением атомов решетки, также преимущественно во второй сфере. Оба типа релаксации атомов решетки кремния, окружающих межузельный ион Er^{2+} в первой и второй координационных сферах, могут быть идентифицированы методами двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР), аналогично тому, как это было сделано для переходных элементов [9,10]. Однако в этом случае использование ДЭЯР затруднено ввиду слабости сигналов ЭПР кубических центров Er^{2+} из-за их малой концентрации.

Таким образом, при легировании монокристаллического кремния эрбием как в процессе выращивания из расплава, так и с помощью ионной имплантации возникают реконструированные дефекты низкой симметрии, которые создают глубокие уровни в запрещенной зоне. При совпадении энергии ионизации этих уровней с энергией перехода эрбия в возбужденное $^4I_{13/2}$ -состояние индуцируется оже-процесс, стимулирующий интенсивную внутрицентровую люминесценцию эрбия при $\lambda = 1.54$ мкм.

Список литературы

- [1] Н.Т. Баграев, Д.Е. Онопко, А.И. Рыскин, Ю.А. Карпов. ФТП, **30**, 1848 (1996).
- [2] N.T. Bagraev, I.S. Polovtsev, K. Schmalz. Phys. St. Sol. (a), **113**, 233 (1989).
- [3] H.H.P.Th. Bekman, T. Gregorkiewicz, C.A.J. Ammerlaan. Mater. Sci. Forum, **38-41**, 601 (1989).
- [4] N.T. Bagraev. Def. Dif. Forum, **103-105**, 529 (1993).
- [5] G.D. Watkins. In: *Radiation Damage in Semiconductors*, ed. by P. Baruch (Dunod, Paris, 1965) p. 97.
- [6] Y.H. Lee, J.W. Corbett, K.L. Brower. Phys. St. Sol. (a), **41**, 637 (1977).
- [7] A. Taguchi, K. Takahei. *Extr. Abstr. 1994 Int. Conf. SSDM'94* (Yokohama, 1994) p. 114.
- [8] K. Takahei, A. Taguchi. Mater. Sci. Forum, **83-87**, 641 (1992).
- [9] S. Greulich-Weber, J.R. Niklas, E.R. Weber, J.M. Spaeth. Phys. Rev. B, **30**, 6292 (1984).
- [10] D.A. van Wezer, K. van Kemp, E.G. Sieverts, C.A.J. Ammerlaan. Phys. Rev. B, **32**, 7129 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова

Erbium-related deep centers in silicon. II. Experiment

N.T. Bagraev, D.E. Onopko, A.I. Ryskin*, Yu.A. Karpov†*

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

*All-Russia Scientific Center «S.I. Vavilov State Optical Institute»,
199034. St.Peterburg, Russia

†State Institute of Rare Metals Industry, Moscow, Russia

The models of low-symmetry erbium-related centers are presented, which are in good agreement with the magnetic, electrical and optical properties of the silicon single crystals doped with erbium during the Czochralski crystal growth process. The concentration dependence of the intensity of the Er^{3+} -related intracenter luminescence at 1540 nm has been shown to be due to the deep level creation responsible for the Auger energy resonant transfer from non-equilibrium carriers to the f -electrons of the erbium-related deep centers. The $P^+ + Er_2O^-$, $Er + V_2$ and $Er + C + O + V_2$ centers have been proposed to be the effective centers of the 1540 nm intracenter luminescence in the silicon crystals doped with erbium using the ion implantation technique.