

## Влияние режимов ионного синтеза и ионного легирования на эффект сенсibilизации излучения эрбиевых центров нанокластерами кремния в пленках диоксида кремния

© Д.С. Королев, А.Б. Костюк, А.И. Белов, А.Н. Михайлов, Ю.А. Дудин, А.И. Бобров,  
Н.В. Малехонова, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум

Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия

E-mail: tetelbaum@phys.unn.ru

(Поступила в Редакцию 16 апреля 2013 г.)

Исследованы спектры фотолюминесценции эрбиевых центров в пленках  $\text{SiO}_2$  с ионно-синтезированными нанокластерами кремния при нерезонансном возбуждении. Эрбий вводился в термические пленки  $\text{SiO}_2$  методом ионной имплантации. Установлены зависимости интенсивности фотолюминесценции от доз, порядка ионного внедрения Si и Er, температуры отжига, а также режимов дополнительного ионного облучения  $\text{Ar}^+$  и  $\text{P}^+$  — факторов, определяющих влияние радиационного повреждения и легирования на сенсibilизацию люминесценции эрбия нанокластерами кремния. Установлено, что как эффект сенсibilизации, так и его усиление за счет легирования фосфором наиболее выражены в условиях, когда нанокластеры аморфны. Гашение фотолюминесценции за счет радиационного повреждения в этом случае проявляется также в меньшей степени, чем для кристаллических нанокластеров. Роль различных факторов в наблюдаемых закономерностях обсуждается в рамках существующих представлений о механизмах излучения света и энергообмена в системе нанокластеров Si и эрбиевых центров.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

### 1. Введение

Создание эффективных светоизлучателей на базе кремния является актуальной задачей. Ее решение затруднено непрямозонной энергетической структурой этого полупроводника, что, строго говоря, делает запрещенным излучательный переход электрона со дна зоны проводимости на потолок валентной зоны. Попытки обойти этот запрет путем использования нанокристаллического кремния со времени открытия интенсивной люминесценции пористого кремния [1] стимулировали обширный поток исследований [2], но до сих пор не привели к радикальному прорыву на этом направлении. Кроме того, нанокластеры (НК) Si излучают в красной и ближней инфракрасной области спектра, где имеет место сильное поглощение излучения в волноводах на базе диоксида кремния, что затрудняет применение в оптоэлектронных схемах и оптоволоконных линиях связи. В связи с этим широкое распространение получили исследования излучательных свойств кремния и материалов на основе оксида кремния, легированных эрбием, который люминесцирует на длине волны  $1.54 \mu\text{m}$ , то есть в области основного минимума потерь кварцевого оптоволокна [3]. К недостаткам системы  $\text{SiO}_2:\text{Er}$  относятся низкое сечение возбуждения люминесценции Er и резонансный характер возбуждения редкоземельного центра (см., например, [4,5]).

Для повышения эффективности люминесценции редкоземельных центров (сенсibilизации) обычно исполь-

зуют два способа. Первый — солегирование эрбием и иттербием (Yb) силикатных стекол [6], когда энергия возбуждения Yb передается атомам Er с последующим высвечиванием этой примеси. Другой способ — формирование в слоях  $\text{SiO}_2:\text{Er}$  НК Si, которые обеспечивают широкополосное возбуждение люминесценции. Установлено, что НК Si могут служить эффективными сенсibilизаторами фото- и электролюминесценции Er, растворенного в  $\text{SiO}_2$  (система  $\text{SiO}_2:\text{Er}:\text{НК Si}$ ) [4,5,7].

Исследованию люминесцентных свойств данной системы посвящено значительное число работ (см., например, монографию [8]). Оказалось, что эффективность сенсibilизации может быть усилена, если использовать вместо кристаллических аморфные НК Si [9–11] либо (в случае применения кристаллических НК Si) — легировать систему  $\text{SiO}_2:\text{Er}:\text{НК Si}$  фосфором [12]. Однако оба этих способа были исследованы недостаточно, причем структурное состояние НК Si контролировалось только температурой отжига, а легирование фосфором осуществлялось в процессе осаждения пленок путем совместного распыления различных мишеней. Наиболее контролируемым способом как формирования НК Si в диэлектрической матрице, так и последующей модификации структуры НК (за счет аморфизации и легирования) является ионная имплантация. В нашем случае преимущество ионной имплантации состоит в том, что она позволяет в едином цикле синтезировать систему  $\text{SiO}_2:\text{Er}:\text{НК Si}$ , вводя на заданную глубину ионы Er и Si с определенными концентрациями, и легировать ее.

Вместе с тем ионная имплантация вносит радиационные повреждения, зависящие от сорта иона и дозы, а также энергии ионов, что накладывает отпечаток на свойства слоев  $\text{SiO}_2$ :HK Si [13]. Это требует детального изучения влияния режимов ионного облучения и последующего отжига в случае многокомпонентной системы.

В настоящей работе исследовано влияние доз и порядка имплантации ионов  $\text{Si}^+$  и  $\text{Er}^+$ , дополнительного облучения ионами  $\text{P}^+$ ,  $\text{Ar}^+$  и отжига на фотолуминесцентные свойства ионно-синтезированной системы  $\text{SiO}_2$ :Er:HK Si.

## 2. Методика эксперимента

В качестве исходного материала использовались образцы термически выращенной на кремнии пленки  $\text{SiO}_2$  с толщиной 180 nm. Для легирования оксидных слоев атомами эрбия в пленки имплантировались ионы этого элемента с дозами в диапазоне  $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  в импульсном режиме с использованием ионно-плазменного источника „Радуга-3“ [14]: плотность ионного тока составляла  $12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , ускоряющее напряжение — 80 kV, частота импульсов — 30 Hz, длительность импульсов — 200  $\mu\text{s}$ .

В соответствии с данными вторичной ионной масс-спектрографии (ВИМС), полученными на установке TOF SIMS5 (Институт физики микроструктур РАН, Н.Новгород), средняя концентрация имплантированных атомов эрбия в пленке  $\text{SiO}_2$  при дозе  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  составила  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Предполагая, что изменением распределения примеси по глубине за счет ионного распыления при дозах ионной имплантации  $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  можно пренебречь, имеем, что концентрация эрбия в данном интервале доз изменяется в интервале  $5 \cdot 10^{17}$ – $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ . Оценка, выполненная на основе данных рентгеновского микроанализа (растворный электронный микроскоп JEOL JSM-6490 со спектроскопической системой Oxford INCA 350), показала, что при дозе ионов эрбия  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  средняя концентрация эрбия составляет примерно  $4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , т.е. во всем исследованном интервале доз Er сохраняется приблизительно пропорциональность между дозой и концентрацией редкоземельной примеси.

HK Si формировались в пленках  $\text{SiO}_2$  до или после ионного внедрения Er (в отличие от работы [5], где эрбий имплантировался только после синтеза HK), для чего производилась имплантация ионов  $\text{Si}^+$  на установке ИЛУ-3 с энергией 40 keV и дозами в интервале  $3 \cdot 10^{16}$ – $4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . Как облученные, так и не облученные ионами кремния образцы отжигались при различных температурах 900–1100°C в потоке  $\text{N}_2$  в течение 2 h (проводились разовые отжиги при соответствующей температуре).

Для исследования влияния дополнительного ионного облучения и ионного легирования массивы HK Si, сформированные при различных температурах в пленках  $\text{SiO}_2$  с концентрацией Er  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , дополнительно облучались на установке ИЛУ-3 ионами  $\text{P}^+$  с

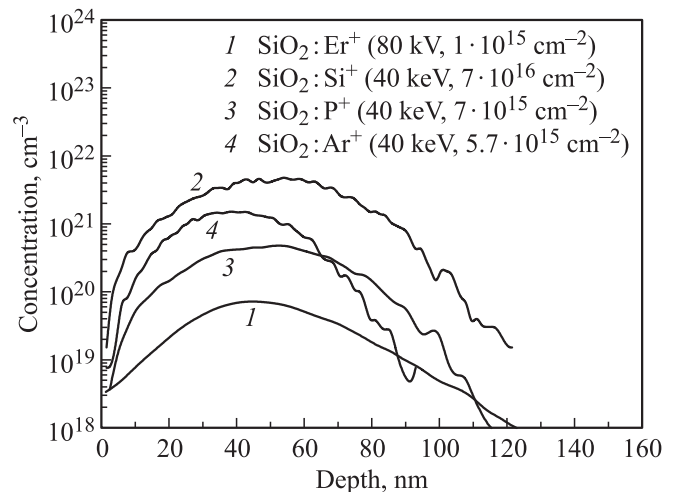


Рис. 1. ВИМС-профиль распределения имплантированных атомов Er и расчетные распределения ионов  $\text{Si}^+$ ,  $\text{P}^+$ ,  $\text{Ar}^+$  в  $\text{SiO}_2$ .

дозами  $2 \cdot 10^{14}$ ,  $7 \cdot 10^{14}$ ,  $2 \cdot 10^{15}$ ,  $7 \cdot 10^{15}$ ,  $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  либо  $\text{Ar}^+$  с дозами  $1.6 \cdot 10^{14}$ ,  $5.7 \cdot 10^{14}$ ,  $1.6 \cdot 10^{15}$ ,  $5.7 \cdot 10^{15}$ ,  $1.6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ . Энергия ионов  $\text{P}^+$  и  $\text{Ar}^+$  составляла 40 keV. Облучению ионами фосфора с дозой  $7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  подвергались также контрольные пленки  $\text{SiO}_2$ :Er, не содержащие HK Si. После облучения ионами фосфора или аргона образцы отжигались при 900°C в течение 30 min в потоке  $\text{N}_2$ .

Выбранные режимы ионного внедрения обеспечивали близкие распределения атомов примеси и дефектов по глубине в соответствии с расчетом методом SRIM [15] (рис. 1). Соотношение доз ионов  $\text{P}^+$  и  $\text{Ar}^+$  выбиралось, исходя из их дефектообразующей способности, что позволяет отделить влияние динамических факторов на процесс модификации свойств наноструктур от проявления химической (электронной) природы примеси.

Морфология и структура поперечных срезов образцов, подготовленных с использованием специальной оснастки фирмы Gatan, исследовались на электронном микроскопе JEOL JEM-2100F в режиме просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения в светлом поле.

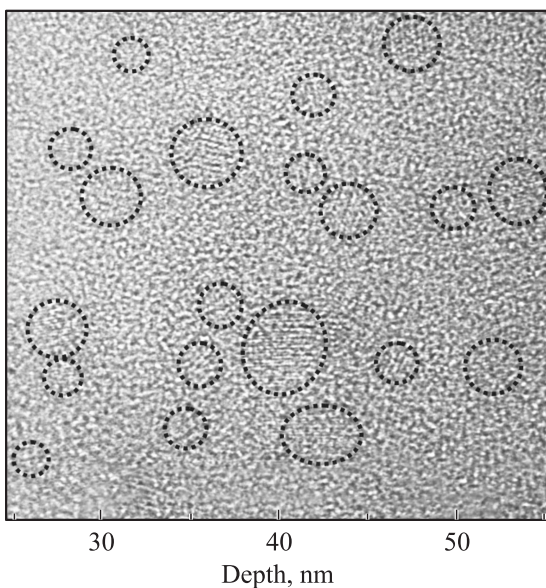
Измерения ФЛ при комнатной температуре в диапазонах длин волн 650–1000 и 1400–1600 nm проводились при возбуждении импульсным лазером YAG:Nd на длине волны  $\lambda_{\text{exc}} = 532 \text{ nm}$  (период повторения импульсов 23 Hz, длительность импульсов  $\sim 10 \text{ ns}$ , энергия в импульсе  $\sim 0.5 \text{ mJ}$ ). Для регистрации излучения использовались монохроматор SP-150 (Acton Research Corp.), дифракционная решетка (300 grooves/mm) с рабочим диапазоном длин волн 600–1800 nm, фотоумножитель ФЭУ-62 (для диапазона 650–1000 nm) или полупроводниковый детектор InGaAs (для диапазона 1000–1650 nm). Для приведения шкалы интенсивности ФЛ к единому масштабу проводилась нормировка с использованием эталонного образца.

Образцы, дополнительно облученные ионами  $P^+$  и  $Ag^+$ , в отличие от образцов, не подвергнутых такому облучению, проходили повторный отжиг — до и после облучения. Чтобы отделить влияние операции повторного отжига от влияния облучения и легирования, при облучении часть поверхности экранировалась кремниевой маской, и измерения ФЛ проводились как на экранированной, так и на неэкранированной областях поверхности.

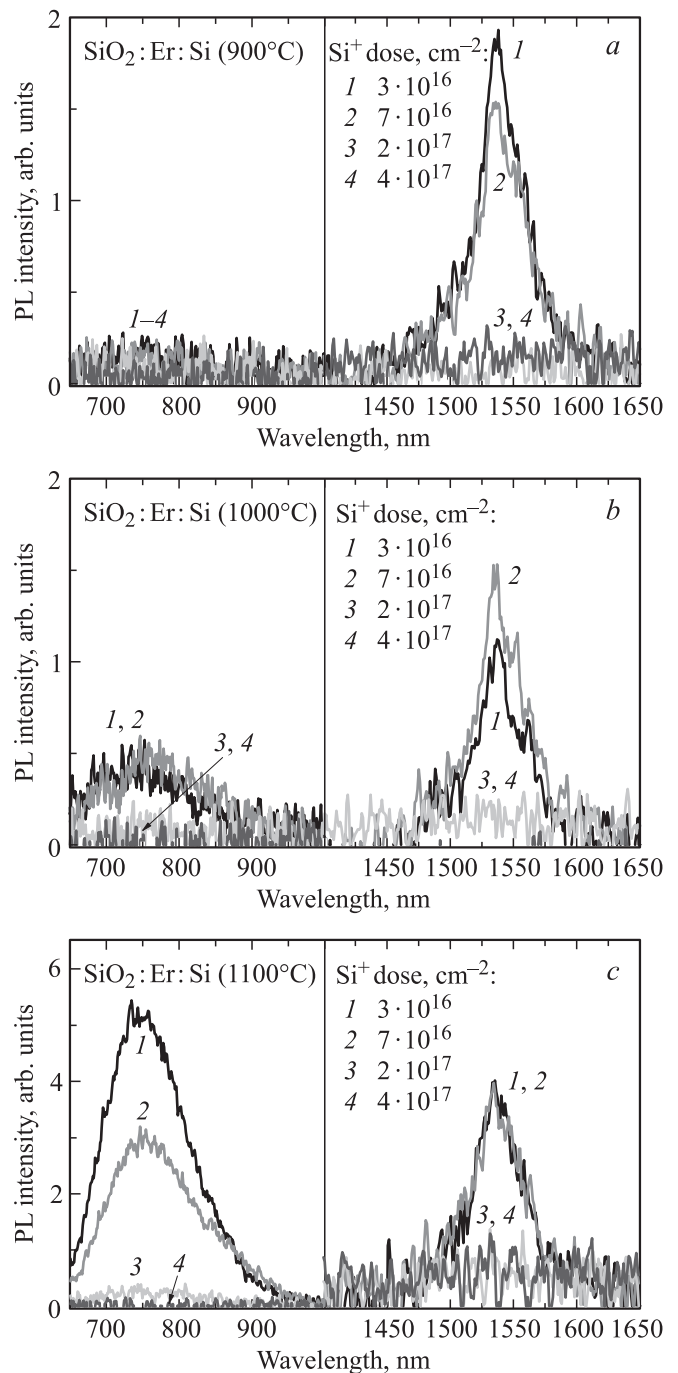
### 3. Результаты и их обсуждение

Методом ПЭМ высокого разрешения установлено (рис. 2), что имплантация ионов  $Si^+$  с дозой  $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  в предварительно имплантированный  $Er^+$  (доза  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) слой  $SiO_2$  на кремнии с последующим отжигом при  $1000^\circ\text{C}$  приводит к формированию кристаллических НК Si с размерами 2–5 nm на глубинах, соответствующих максимуму распределения ионов Si. Учитывая, что данная температура отжига не обеспечивает кристаллизации всех НК [16], можно считать, что большая часть НК осталась в аморфном состоянии и не обнаруживается на электронномикроскопическом изображении.

Первый цикл исследований посвящен изучению влияния доз ионов  $Si^+$  и  $Er^+$  на интенсивность полос ФЛ, обусловленных излучением НК Si и центров  $Er^{3+}$ , для случая, когда кремний имплантировался в слой, предварительно имплантированный эрбием. На рис. 3 приведены спектры ФЛ, полученные при фиксированной дозе Er ( $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) и различных дозах  $Si^+$  (отжиг при  $900$ – $1100^\circ\text{C}$ ). В общем случае наблюдаются две полосы

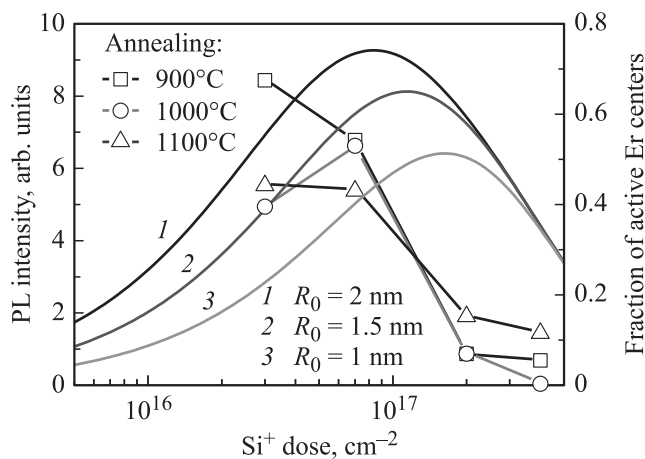


**Рис. 2.** Изображение ПЭМ поперечного среза слоя  $SiO_2:Er$  с НК Si, сформированными при дозе  $Si^+$   $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  и температуре отжига  $1000^\circ\text{C}$ . НК Si обведены для наглядности.



**Рис. 3.** Спектры ФЛ пленок  $SiO_2:Er$ , имплантированных  $Si^+$  с различными дозами и отожженных при  $900$  (a),  $1000$  (b) и  $1100^\circ\text{C}$  (c). Интенсивности ФЛ в диапазоне  $1400$ – $1650 \text{ nm}$  приведены на всех графиках в одном масштабе.

ФЛ, из которых коротковолновая ( $650$ – $900 \text{ nm}$ ) обусловлена НК кремния, а длинноволновая ( $1450$ – $1600 \text{ nm}$ ) — центрами эрбия. Полоса, связанная с НК, отсутствует при отжиге  $900^\circ\text{C}$ , слабо выражена при  $1000^\circ\text{C}$  и наиболее интенсивна (для доз  $3 \cdot 10^{16}$  и  $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) при  $1100^\circ\text{C}$ . Такая зависимость от температуры отжига характерна для имплантации  $Si^+$  в  $SiO_2$  [16,17]; она



**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости интенсивности ФЛ при 1540 nm пленок  $\text{SiO}_2:\text{Er}:\text{HK Si}$ , полученных при разных температурах отжига, от дозы имплантации  $\text{Si}^+$  в сравнении с результатами расчета дозовой зависимости доли активного эрбия при различных значениях  $R_0$  (для диаметра НК 3 nm).

обусловлена переходом от аморфных НК Si при  $900^\circ\text{C}$  к кристаллическим НК при  $1100^\circ\text{C}$ . Тенденция к снижению интенсивности ФЛ от НК Si в области больших доз кремния тоже известна для системы  $\text{SiO}_2:\text{HK Si}$  [18] и связана в основном с укрупнением НК, при котором ослабляется квантоворазмерный эффект. Другой причиной ослабления ФЛ является увеличение степени радиационного повреждения, особенно с учетом дополнительного повреждения, внесенного предшествующим облучением ионами  $\text{Er}^+$ . Радиационные дефекты в матрице  $\text{SiO}_2$  при больших дозах могут не полностью отжигаться даже при  $1100^\circ\text{C}$  и вносить центры безызлучательной рекомбинации. Таким образом, в предварительно имплантированных Er образцах наблюдаются в основном те же закономерности ФЛ НК Si, что и в образцах без Er.

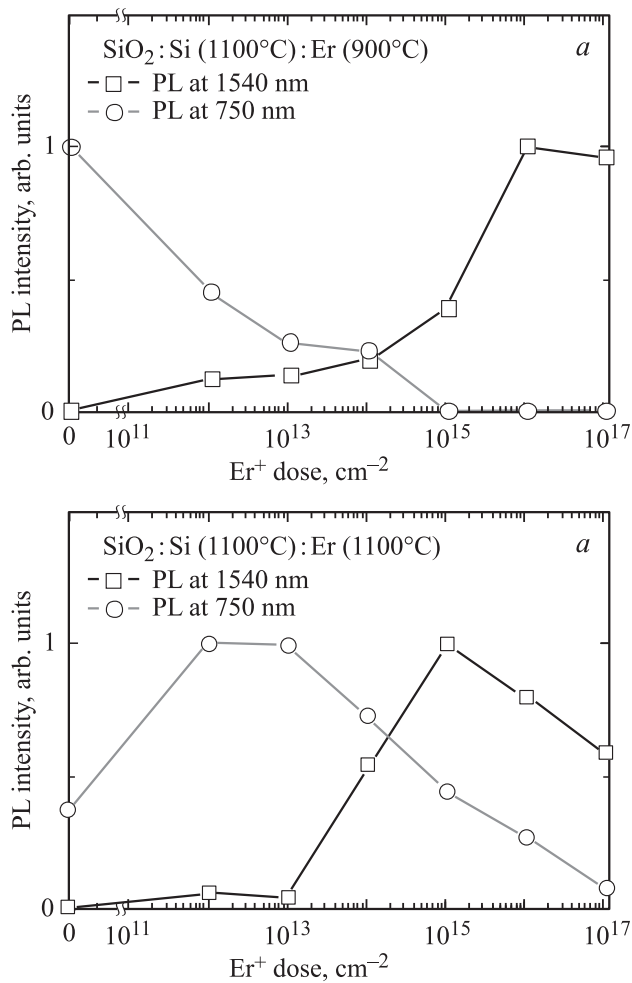
Рассмотрим теперь влияние дозы  $\text{Si}^+$  и температуры отжига на интенсивность ФЛ эрбия (правые части рис. 3). Сравнивая спектры при температурах отжига  $900$  и  $1000^\circ\text{C}$ , мы видим, что, несмотря на практическое отсутствие кристаллических НК, интенсивность ФЛ Er при  $900^\circ\text{C}$  выше, чем при  $1000^\circ\text{C}$ . Это подтверждает отмеченную в литературе [8,9,10] более высокую эффективность аморфных кластеров в качестве сенситизаторов ФЛ Er по сравнению с кристаллическими. Важно отметить, что в отсутствие имплантации  $\text{Si}^+$  ФЛ Er вообще не наблюдается, так как длина волны 532 nm находится вне областей резонансного возбуждения эрбия. Последнее свидетельствует о том, что люминесценция редкоземельных центров в нашем случае обеспечена только эффектом сенситизации нанокластерами Si.

Диапазон использованных нами доз  $\text{Si}^+$  соответствует большим значениям концентрации (объемной плотности) НК Si по сравнению с работой [10]. Так, если считать, что весь имплантированный кремний входит в состав НК со средним размером 3 nm, то концентрация

НК Si составит  $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , это на порядок превосходит значения концентрации НК в [10]. По мнению авторов [10], увеличение плотности НК должно сопровождаться возрастанием доли оптически активных центров Er. Однако наши результаты ФЛ (сводные дозовые зависимости представлены на рис. 4) свидетельствуют о том, что с увеличением дозы  $\text{Si}^+$  выше  $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , независимо от температуры отжига, происходит резкое падение интенсивности эрбиевой ФЛ. Это падение может быть обусловлено следующим. Во-первых, с ростом дозы Si увеличивается удельный объем, занятый фазой элементарного кремния. Если считать, что сенситизации нанокластерами Si подвержены только те атомы Er, которые находятся вне кластеров (в их ближайшей окрестности) [10,11], то возрастание удельного объема НК Si и перекрытие их ближайших окрестностей должно привести к немонотонному изменению интенсивности ФЛ. Во-вторых, отмеченный выше рост степени радиационного повреждения матрицы с дозой также может приводить к гашению ФЛ не только от НК Si, но и от Er. В-третьих, увеличение с дозой средних размеров НК Si [18], как отмечалось выше, приводит к ослаблению проявления квантоворазмерного эффекта, что должно привести и к снижению их сенситизирующего влияния на ФЛ Er.

На рис. 4, наряду с экспериментальными зависимостями интенсивности ФЛ Er при 1540 nm от дозы ионов кремния, приведены результаты статистического расчета доли оптически активных (взаимодействующих с НК Si) центров Er в зависимости от дозы  $\text{Si}^+$  при нескольких значениях  $R_0$  — критического расстояния атома Er от поверхности НК Si, при котором еще возможен эффективный обмен энергией между НК и Er [10]. Расчет основан на простой модели, которая позволяет оценить долю активного Er с учетом перекрытия сферических слоев толщиной  $R_0$ , окружающих НК Si заданного диаметра, и доли объема, занятой самими НК Si, в которых Er считается оптически неактивным. Видно, что в области больших доз кремния ФЛ гаснет значительно быстрее, чем предсказывает расчет. Это свидетельствует о преобладающем влиянии указанных выше второго и третьего факторов гашения при больших дозах. Следует также учесть, что из-за распыления происходит потеря некоторой части внедренных атомов эрбия.

Вариация дозы Er ( $1 \cdot 10^{13}$ ,  $1 \cdot 10^{15}$  и  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ) при фиксированной дозе  $\text{Si}^+$  ( $7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) выявила, что интенсивность ФЛ зависит от концентрации эрбия немонотонно. При средней концентрации ионов эрбия  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , соответствующей дозе  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , реализуется оптимальное соотношение числа НК и ионов эрбия. При максимальной дозе эрбия ( $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ) наличие слишком высокой его концентрации ослабляет ФЛ во всем диапазоне спектра независимо от температуры отжига, по-видимому, вследствие известных эффектов концентрационного тушения ФЛ Er [19], кластеризации эрбия [20], а также за счет того, что при такой концентрации атомов Er НК Si либо вообще не формируются,



**Рис. 5.** Нормированные зависимости от дозы эрбия интенсивности ФЛ при длинах волн 750 и 1540 nm структур SiO<sub>2</sub>:Er:НК Si, полученных путем имплантации Er в пленки SiO<sub>2</sub> с НК Si, сформированными при 900 (a) и 1100°C (b).

либо девозбуждаются безызлучательно, возможно, за счет поверхностных центров безызлучательной рекомбинации, связанных с сегрегацией.

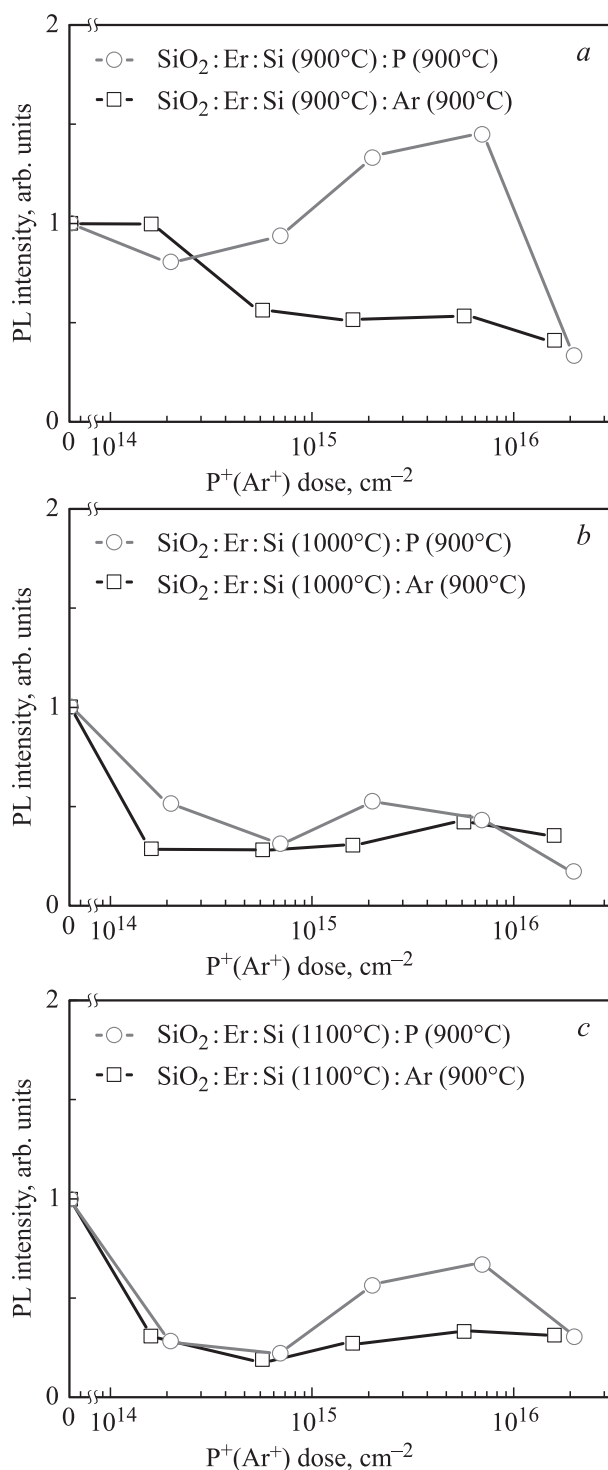
Поскольку внесение радиационных дефектов и тяжелых примесных металлических атомов в случае предварительного внедрения эрбия в пленки SiO<sub>2</sub> может повлиять на процесс формирования НК Si, представляло интерес изучение зависимости ФЛ от дозы эрбия в том случае, когда эрбий вводится в слои с предварительно сформированными НК Si. Как видно из рис. 5, в случае внедрения эрбия в слои SiO<sub>2</sub> с НК Si (сформированными при температуре 1100°C) после заключительного отжига при 900°C наблюдается четкая антикорреляция в поведении ФЛ НК Si и центров Er<sup>3+</sup> с ростом дозы эрбия, а именно, интенсивность ФЛ при 750 nm монотонно ослабевает до нуля, а интенсивность ФЛ при 1540 nm возрастает и выходит на насыщение при дозах эрбия 10<sup>16</sup>–10<sup>17</sup> cm<sup>-2</sup>. При этих дозах Er НК Si аморфируются и остаются в аморфном состоянии после отжига

при 900°C [13,21]. Наличие указанной антикорреляции служит еще одним проявлением сенсбилизующей роли аморфных НК Si: чем выше доля энергии возбуждения НК Si, передаваемой нанокластерами эрбиевым светоизлучающим центрам, тем больше интенсивность ФЛ Er и меньше интенсивность ФЛ НК Si. Интересно, что при таком порядке имплантации и отжига (рис. 5, a) зависимость интенсивности ФЛ от дозы эрбия иная, чем при вышеуказанном обратном порядке. Это требует отдельного исследования, в частности, с учетом возможного эффекта сегрегации в системе, включающей два сорта примесных атомов.

В случае заключительного отжига при 1100°C после внедрения Er зависимости интенсивности ФЛ от дозы Er оказываются немонотонными, при этом возрастание ФЛ Er также происходит в том интервале доз, где ФЛ НК Si снижается.

Дополнительное ионное облучение Ar<sup>+</sup> и P<sup>+</sup> пленок SiO<sub>2</sub>, имплантированных эрбием (1 · 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>), кремнием (7 · 10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup>) и отожженных при разных температурах, в отсутствие заключительного отжига после облучения приводит к гашению ФЛ как НК Si, так и Er. Этого и следовало ожидать, так как облучение вносит дефекты — центры безызлучательной рекомбинации. Последующий отжиг при 900°C выявил существенное различие между случаями облучения P<sup>+</sup> и Ar<sup>+</sup> для образцов, подвергнутых промежуточному отжигу при 900°C (рис. 6). Если облучение Ar<sup>+</sup> вызывает снижение интенсивности ФЛ эрбия, что указывает на неполный отжиг радиационных дефектов, то при имплантации „оптимальных“ доз фосфора (2 · 10<sup>15</sup> и 7 · 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>) имеет место усиление ФЛ. При этом важно, что НК Si остаются аморфными, о чем свидетельствует отсутствие заметной ФЛ в красной области спектра. Следовательно, легирование фосфором усиливает сенсбилизационные свойства аморфных НК Si. Это обусловлено либо тем, что фосфор, аналогично случаю легирования системы SiO<sub>2</sub> с нанокристаллами Si [22], пассивирует оборванные связи на границах аморфных НК, либо тем, что он, как и в кристаллических НК Si — квантовых точках [23], изменяет электронную структуру НК, способствуя передаче энергии от этих НК к центрам эрбия.

В случае более высоких температур промежуточного отжига (1000 и 1100°C), когда НК Si кристаллизуются [24], облучение как фосфором, так и аргоном с последующим отжигом при 900°C ослабляет ФЛ эрбия, что обусловлено радиационным повреждением при облучении. Тот факт, что в случае промежуточного отжига при 900°C это не привело к устранению положительного влияния легирования фосфором, подчеркивает роль в процессе сенсбилизации Er аморфного состояния НК при их дополнительном облучении: аморфные кластеры в меньшей степени подвержены структурному повреждению при ионном облучении по сравнению с кристаллическими НК. В случае аморфных кластеров при наличии конкуренции двух факторов — радиационного повреждения и легирования — второй фактор



**Рис. 6.** Зависимости от доз  $P^+$  и  $Ar^+$  интенсивности ФЛ на длине волны 1540 nm структур  $SiO_2:Er:HK Si$ , сформированных при 900 (a), 1000 (b), 1100°C (c), с заключительным отжигом при 900°C.

оказывается доминирующим. Заметим, однако, что и в случае отжигов при 1000 или 1100°C на фоне общего снижения интенсивности ФЛ с ростом дозы ионов из-за радиационного повреждения сенсibilизирующее

влияние фосфора все же проявляется. Это видно из сравнения дозовых зависимостей для случаев облучения  $Ar^+$  и  $P^+$  на рис. 6, b и, особенно, 6, c.

В заключение следует обсудить возможную альтернативную роль легирования системы  $SiO_2:HK Si:Er$  фосфором в усилении ФЛ Er, не связанную с НК Si. В работе [24] установлено, что ионная имплантация фосфора в пленки  $GeO_2$ , солегированные эрбием и иттербием, приводит к усилению ФЛ Er, возбуждаемой на длине волны  $0.987 \mu m$ . В [25] также указывается, что солегирование силикатных стекол, содержащих редкоземельные элементы, фосфором способно привести к увеличению растворимости эрбия. Однако в той же работе [25] продемонстрировано, что усиление в световодах на основе силикатных стекол вследствие повышения растворимости эрбия имеет место при совместном легировании стекла фосфором и алюминием (т.е. при синтезе фосфороалюминиевого стекла), а при легировании только фосфором оно гораздо менее эффективно. В свете этих данных возможность существования такого механизма усиления ФЛ Er при легировании фосфором диоксида кремния проблематична. Следует подчеркнуть, что, в отличие от [25], мы возбуждали ФЛ эрбия лазером с нерезонансной длиной волны 532 nm (и в отсутствие солегирования иттербием), когда возбуждение связано только с поглощением света НК Si и передачей энергии эрбиевым центрам. В случае легирования фосфором контрольных образцов  $SiO_2:Er$  (не содержащих НК Si) люминесценция Er при указанном возбуждении не наблюдается. Наличие в нашем случае зависимости эффективности сенсibilизации ФЛ от температуры отжига, то есть структурного состояния НК Si, также свидетельствует в пользу механизма влияния легирования, указанного ранее, а не механизма, связанного с растворимостью эрбия (преципитацией).

#### 4. Заключение

Приведенные экспериментальные данные подтверждают преимущественное сенсibilизирующее влияние аморфного состояния НК Si на ФЛ эрбиевых центров в  $SiO_2$ . Зависимость от структурного состояния НК Si проявляется и в случае ионного легирования фосфором. Именно для аморфных НК наиболее ярко выражено усиление сенсibilизирующих свойств при ионном легировании.

При ионно-лучевом синтезе системы  $SiO_2:Er:HK Si$  интенсивность ФЛ эрбия (кроме структурного состояния НК Si) определяется несколькими факторами: вероятностью нахождения НК кремния в ближайшей окрестности атома Er (эта вероятность изменяется немонотонно с увеличением дозы  $Si^+$ ); порядком внедрения Er и формирования НК Si; степенью радиационного повреждения с увеличением дозы  $Si^+$  и дозы  $Er^+$ , а также степенью отжига радиационных дефектов; ослаблением квантово-размерного эффекта при больших дозах кремния. Не ис-

ключено также негативное влияние сегрегационных явлений в многокомпонентной системе SiO<sub>2</sub>-Si-Er.

Усиление сенсibilизирующей роли аморфных НК по отношению к излучению Er на длине волны 1.54 μm и механизм влияния фосфора на эффективность сенсibilизации требуют дальнейшего экспериментального и теоретического исследования.

Авторы выражают признательность Ю.Н. Дроздову (Институт физики микроструктур РАН) и Н.В. Сахарову (НИФТИ ННГУ) за проведение анализа химического состава имплантированных эрбием слоев SiO<sub>2</sub>.

## Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett. **57**, 1046 (1990).
- [2] Silicon Nanocrystals: Fundamentals, Synthesis and Applications / Ed. L. Pavesi, R. Turan. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2010). 613 p.
- [3] А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков. Оптические волокна для линий связи. ЛЕСАРпт, М. (2003). 288 с.
- [4] M. Fujii, M. Yoshida, S. Hayashi, K. Yamamoto. J. Appl. Phys. **84**, 4525 (1998).
- [5] P.G. Kik, M.L. Brongersma, A. Polman. Appl. Phys. Lett. **76**, 2325 (2000).
- [6] M.P. Hehlen, N.J. Cockroft, T.R. Gosnell. Phys. Rev. B **56**, 9302 (1997).
- [7] K. Sun, W.J. Xu, B. Zhang, L.P. You, G.Z. Ran, G.G. Qin. Nanotechnology **19**, 105 708 (2008).
- [8] Silicon Nanophotonics / Ed. L. Khriachtchev. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore (2009). 452 p.
- [9] A. Irrera, F. Iacona, G. Franzo, S. Boninelli, D. Pacifici, M. Miritello, C. Spinella, D. Sanfilippo, G. Di Stefano, P.G. Fallica, F. Priolo. Opt. Mater. **27**, 1031 (2005).
- [10] B. Garrido, C. García, P. Pellegrino, D. Navarro-Urrios, N. Daldosso, L. Pavesi, F. Goubilleau, R. Rizk. Appl. Phys. Lett. **89**, 163 103 (2006).
- [11] Ji-Hong Jhe, Jung H. Shin, Kyung Joong Kim, Dae Won Moon. Appl. Phys. Lett. **82**, 4489 (2003).
- [12] K. Imakita, M. Fujii, Y. Yamaguchi, S. Hayashi. Phys. Rev. B **71**, 115 440 (2005).
- [13] Г.А. Качурин, С.Г. Черкова, Д.В. Марин, А.К. Гутаковский, А.Г. Черков, В.А. Володин. ФТП **42**, 1145 (2008).
- [14] А.И. Рябчиков. Изв. вузов. Физика **37**, 52 (1994).
- [15] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **268**, 1818 (2010).
- [16] Г.А. Качурин, С.Г. Яновская, В.А. Володин, В.Г. Кеслер, А.Ф. Лейер, М.-О. Ruault. ФТП **36**, 685 (2002).
- [17] А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.Б. Костюк, И.Ю. Жаворонков, Д.С. Королев, А.В. Нежданов, А.В. Ершов, Д.В. Гусейнов, Т.А. Грачева, Н.Д. Мальгин, Е.С. Демидов, Д.И. Тетельбаум. ФТТ **54**, 347 (2012).
- [18] Д.И. Тетельбаум, О.Н. Горшков, А.П. Касаткин, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Д.М. Гапонова, С.В. Морозов. ФТТ **47**, 17 (2005).
- [19] F. Priolo, G. Franzo, D. Pacifici, V. Vinciguerra, F. Iacona, A. Irrera. J. Appl. Phys. **89**, 264 (2001).
- [20] R.J. Kashtiban, U. Bangert, I. Crowe, M.P. Halsall, B. Sherliker, A.J. Harvey, J. Eccles, A.P. Knights, R. Gwilliam, M. Gass. J. Phys.: Conf. Series **209**, 012 043 (2010).
- [21] Г.А. Качурин, С.Г. Яновская, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов. ФТП **37**, 738 (2003).
- [22] A.N. Mikhaylov, D.I. Tetelbaum, V.A. Burdov, O.N. Gorshkov, A.I. Belov, D.A. Kambarov, V.A. Belyakov, V.K. Vasiliev, A.I. Kovalev, D.M. Gaponova. J. Nanosci. Nanotechnol. **8**, 780 (2008).
- [23] V.A. Belyakov, A.I. Belov, A.N. Mikhaylov, D.I. Tetelbaum, V.A. Burdov. J. Phys.: Cond. Matter **21**, 045 803 (2009).
- [24] И.Н. Антонов, О.Н. Горшков, А.Н. Шушунов, А.П. Касаткин, А.Ю. Дудин, М.Е. Шенина. ПЖТФ **38**, 5, 71 (2012).
- [25] М.Е. Лихачев, М.М. Бубнов, К.В. Зотов, О.Н. Медведков, Д.С. Липатов, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов. Квантовая электрон. **40**, 633 (2010).