

УДК 621.382

СПЕКТР ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ЭРБИЕМ И ПРИМЕСЯМИ-СОАКТИВАТОРАМИ

Е. А. Боброва, Г. Р. Галкин, В. А. Дравин

Глубокие уровни (ГУ) в CZ-Si n- и p-типа, обусловленные имплантацией эрбия и примесей-соактиваторов люминесценции ионов Er^{3+} (F, O и Li) исследованы методом РСГУ. Наблюдался характерный для имплантации эрбия спектр глубоких уровней (ГУ). Имплантации Er с соактиваторами не создает дополнительных уровней, но несколько увеличивает концентрацию центров с ГУ. Роль соактиваторов не связана с уменьшением эффективности безызлучательной рекомбинации.

Интерес к примеси эрбия в Si связан с излучением на длине волны 1,54 мкм, возникающим при внутрицентровом переходе в незаполненной оболочке 4f иона Er^{3+} . Высокая температурная стабильность и малая ширина линии излучения, слабое поглощение в линиях оптоволоконной связи делают перспективным применение такого материала в приборах оптоэлектроники. Благодаря развитости технологии кремния он является наиболее пригодным для использования в качестве матрицы, включающей примесь эрбия.

Известно, что кислород [1] и ряд других элементов (C, N, F) [2] существенно увеличивают выход люминесценции примеси Er в Si. Наиболее подробно изучен в качестве соактиватора эрбия в кремнии кислород [3 – 5], однако, причина влияния кислорода и других примесей-соактиваторов однозначно не установлена. Эффективность люминесценции эрбия в кремнии определяется различными факторами [5]. Существенную роль может играть изменение рекомбинационных характеристик кремния, так как обычно возбуждение атомов эрбия в Si осуществляется путем создания электронно-дырочных пар, часть энергии которых затем передается эрбию за счет различных рекомбинационных процессов. В работе [4] сделано заключение, что роль кислорода в кремнии,

содержащем эрбий, состоит в компенсации центров с глубокими уровнями (ГУ) и уменьшении за счет этого безызлучательной рекомбинации. Результаты, полученные методом емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) [5], указывают на то, что кислород действует как пассиватор индуцированных ионной имплантацией центров с глубокими уровнями, то есть уменьшает концентрацию таких центров. Данные о пассивирующем влиянии кислорода были получены при исследовании зонного кремния (*FZ-Si*) в работе [5], где проводилась совместная имплантация *Er* и *O*. Однако более подходящим для практического применения, в частности, для создания излучающих диодов, является материал, выращенный по Чохральскому (*CZ-Si*), так как имплантация эрбия вместе с соактиваторами в такой материал дает более высокий выход излучения по сравнению с *FZ-Si* [2].

Целью настоящей работы было получить данные о возможном эффекте пассивации соактиваторами глубоких центров в *CZ-Si*, чтобы сделать более определенные выводы об их роли в увеличении эффективности излучения *Er*.

В настоящей работе исследовались методом РСГУ центры с ГУ, образующиеся в *Si* при имплантации только эрбия и при совместной имплантации эрбия и примесей-соактиваторов *O* и *F*, а также *Li*, который известен как соактиватор эрбия в других материалах, и в *Si* в этом отношении не изучен. В *CZ-Si* *n*-типа ($n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и *Si* *p*-типа ($p = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), эрбий вводился имплантацией с распределенной дозой (концентрация ионов в *Si* $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, максимальная энергия имплантации 700 кэВ, толщина слоя с Er^{3+} 0,25 мкм). В ту же область, где находился эрбий, была имплантирована одна из указанных выше примесей с распределенной дозой и концентрацией $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Дозы имплантации выбраны такими, чтобы концентрации введенных примесей были возможно более близки к используемым при исследовании люминесценции, и в то же время, чтобы при использовании методики РСГУ наблюдаемые изменения емкостного сигнала ΔC были малы по сравнению с емкостью структуры. Отметим, что концентрация кислорода в *Si* в результате имплантации увеличивалась примерно в два раза по сравнению с исходной. После имплантации проведен отжиг в атмосфере аргона в типичном для наблюдения люминесценции режиме (900°C, 30 мин), затем изготовлены структуры с барьерами Шоттки.

Для определения области зондирования при записи спектров РСГУ были проведены измерения вольт-фарадных (*C-V*) характеристик на структурах с барьерами Шоттки. Электрическая активность центров, обусловленных примесью эрбия в *Si*, зависит от способа легирования эрбием [4, 6, 7]. При введении примеси *Er* ионной имплантацией

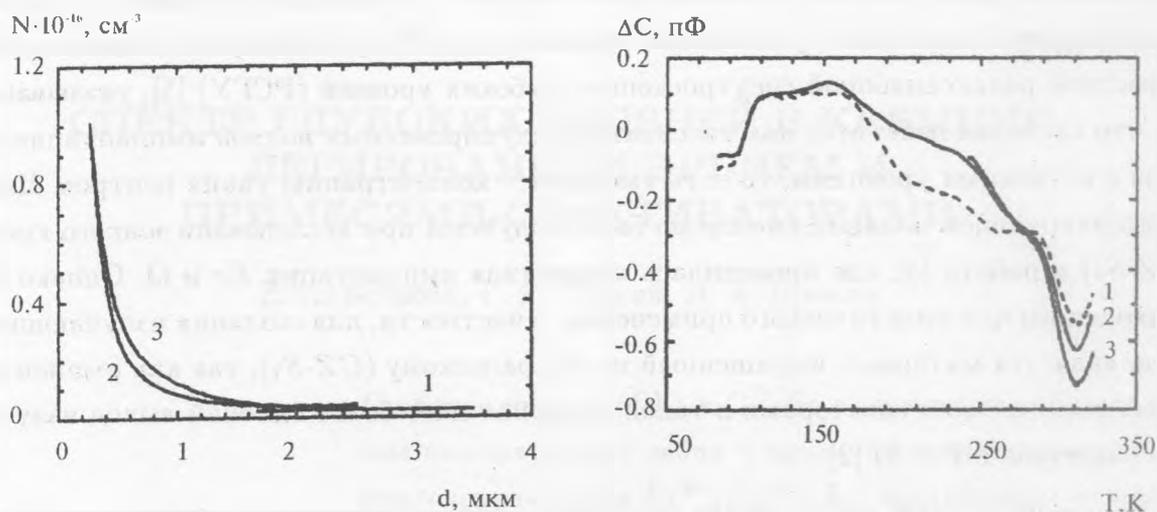


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда N от ширины области пространственного заряда d в структурах с барьером Шоттки на основе Si n -типа: до имплантации (1); после имплантации ионов Er (2), $Er+F$ (3).

Рис. 2. Спектры РСГУ Si n -типа после имплантации ионов: Er (1), $Er + F$ (2), $Er + O$ (2), $Er + Li$ (3).

наблюдали повышение концентрации носителей заряда в Si n -типа и снижение ее в Si p -типа [7]. В настоящей работе, как и в [7], после имплантации эрбия в Si n -типа увеличивалась концентрация мелких доноров. На рис. 1 представлены полученные после обработки C - V характеристик профили распределения носителей заряда по глубине. Из рис. 1 видно, что основной вклад в изменение проводимости образца вносит примесь эрбия. Примеси-соактиваторы F и O влияют одинаково на уровень легирования, несколько увеличивая его, Li не вызывает изменений. Отметим, что увеличение концентрации носителей, наблюдаемое на расстоянии, значительно большем ширины области имплантации, по-видимому, связано с растеканием носителей за пределы области имплантации за счет высокого градиента концентрации.

C - V характеристики структур на основе Si p -типа изменялись незначительно после имплантации ионов как одного Er , так и Er с соактиваторами. Снижения уровня легирования в Si p -типа по C - V характеристикам, в отличие от работы [7], мы не наблюдали. По-видимому, вблизи поверхности Si из-за более высокой в настоящей работе

дозы имплантации имела место перекомпенсация *Si p*-типа и образование *p-n*-перехода. В результате этого область пространственного заряда сместилась от поверхности, а ширина ее и, следовательно, емкость структуры остались практически неизменными. Особенности спектров РСГУ структур на основе *Si p*-типа подтверждают существование области с проводимостью *n*-типа, образовавшейся после имплантации.

На рис. 2 и 3 приведены спектры РСГУ, снятые для образцов, имплантированных различными ионами. Спектры, на которых регистрировались высокотемпературные пики (рис. 2), соответствующие наиболее глубоким уровням, получены для временных окон 30-300 мс. До имплантации в спектре РСГУ пиков не наблюдалось, то есть концентрация глубоких центров была менее $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. После имплантации только эрбия в спектре РСГУ появлялся высокотемпературный пик, соответствующий ГУ с энергией активации $E_c - 0,69 \text{ эВ}$ и сечением захвата $8 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$. Имплантация эрбия с примесями-соактиваторами приводила к увеличению амплитуды этого пика на 20-50% для различных примесей.

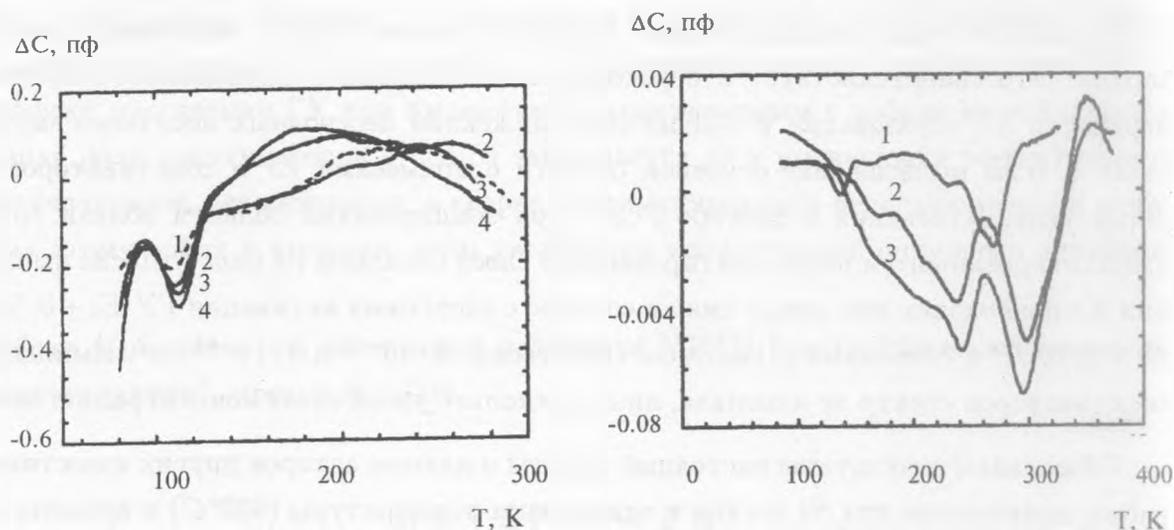


Рис. 3. Спектры РСГУ *Si n*-типа после имплантации ионов: *Er* (1), *Er + O* (2), *Er + Li* (3), *Er + F* (4).

Рис. 4. Спектры РСГУ *Si p*-типа: до имплантации (1); после имплантации ионов *Er* (2), *Er + F* (3).

Низкотемпературные пики, соответствующие наиболее мелким уровням, регистрировались при записи спектров с быстрыми временными окнами (0,3 - 3 мс). Наблюда-

ся пик ГУ с энергией активации 0,19 эВ и сечением захвата $1 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ (рис. 3). Еще один более низкотемпературный и более интенсивный пик не был записан полностью на данной установке. Из спектров видно, что отсутствуют уровни, специфические для соактиваторов. Наблюдаемые уровни скорее всего соответствуют комплексам эрбия с радиационными дефектами, так как обычные радиационные дефекты в *Si* отжигаются при температуре значительно более низкой, чем 900°C , использованной в настоящей работе. Имплантация соактиваторов, по-видимому, приводит главным образом к общему увеличению количества радиационных дефектов и, соответственно, к увеличению количества комплексов эрбия с дефектами. Различие в дефектообразовании при имплантации исследуемых соактиваторов незначительно. Интегральное число центров в случае имплантации одного эрбия составляло $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ для ГУ с энергией 0,69 эВ и $0,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ для ГУ с энергией 0,19 эВ. Режим записи обеспечивал зондирование всей области имплантации.

В спектрах *Si* *p*-типа в случае, когда заполнение происходило при прямом смещении на барьере Шоттки, наблюдался пик, соответствующий захвату неосновных носителей заряда. Это свидетельствует о перекомпенсации дырочной проводимости вблизи поверхности *Si*, образовании *p-n*-перехода и инжекции неосновных носителей заряда. В связи с этим исследование основной области с примесями *Er* и соактиваторов было затруднено. Изменения в спектре РСГУ при зондировании области вблизи границы имплантированного и неимплантированного слоев показаны на рис. 4. После имплантации *Er* появлялись два новых пика в спектре с энергиями активации ГУ $E_v + 0,54 \text{ эВ}$ и $E_v + 0,76 \text{ эВ}$ и сечениями захвата соответственно $8 \cdot 10^{-15}$ и $3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$. Имплантация соактиваторов спектр не изменяла, лишь несколько увеличивая концентрацию центров.

Сопоставим результаты настоящей работы и данные авторов других известных нам работ, полученные для *Si* *n*-типа и одинаковых температуры (900°C) и времени отжига (30 мин). В работе [7] при имплантации использовались высокие энергии ионов (до 5 МэВ), чтобы создать достаточно протяженные слои с эрбием, учитывая его большую массу. Авторы наблюдали одни и те же уровни (всего семь в интервале 0,09 – 0,48 эВ) в *Si* с разным содержанием кислорода. Лишь один дополнительный уровень ($E_c - 0,18 \text{ эВ}$) возникал в *FZ-Si* по сравнению с *CZ-Si*. В более поздней работе [5] использованы при имплантации меньшие энергии ионов (640 кэВ), но концентрация ионов, соответствующая интегральной дозе, была на 2 порядка выше ($5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), измерения РСГУ проводились на бескислородном *Si*. Спектр уровней существенно отличался от полученного в работе [7], возможно, из-за другого режима имплантации.

Авторы [5] наблюдали новые уровни с энергиями 0,59 и 0,78 эВ как при имплантации только эрбия, так и при совместной имплантации эрбия и кислорода. Концентрация центров в последнем случае уменьшалась примерно в два раза. На этом основании в [5] сделано заключение о пассивирующем влиянии кислорода и об уменьшении безызлучательной рекомбинации. В настоящей работе и у авторов [5] условия имплантации близки. Отсутствие в наших спектрах уровней с энергиями 0,58 и 0,78 эВ можно объяснить высоким содержанием кислорода в исходном кремнии, учитывая, что по данным работы [5] имеет место пассивация их кислородом. Энергия, по-видимому, наиболее мелкого уровня не была определена в нашей работе. Возможно, она близка к 0,15 эВ, зарегистрированной в [5]. Уровень с энергией 0,69 эВ при имплантации Er в Si ранее не наблюдался.

Таким образом, в кремнии, выращенном по Чохральскому, после имплантации эрбия возникает характерный для материала с повышенным содержанием кислорода спектр глубоких уровней, обусловленных, по-видимому, комплексами эрбия с дефектами и, возможно, с кислородом. Центры с ГУ образуются как в нижней, так и в верхней половине запрещенной зоны Si . Отсутствуют ГУ, специфические для соактиваторов F , O и Li . Эффект пассивации ГУ при имплантации соактиваторов с эрбием не наблюдался. Основная роль соактиваторов в $CZ-Si$ заключается не в уменьшении эффективности безызлучательной рекомбинации, а скорее, в стимулировании передачи энергии возбуждения атому эрбия в кремнии, либо увеличении концентрации оптически активного Er .

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТП России "Физика твердотельных наноструктур", проект N 1–008.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Favennec P. N., L'Haridon H., Moutonnet D., et al. Jpn. J. Appl. Phys., **29**, L524 (1990).
- [2] Michel J., Benton J. L., Ferrante R. F., et al. J. Appl. Phys., **70**, 2672 (1991).
- [3] Adler D. L., Jacobson D. C., Eaglesham D. J., et al. Appl. Phys. Lett., **61**, 2181 (1992).
- [4] Efeoglu H., Evans J. H., Jackman T. E., et al. Semicond. Sci. Technol., **8**, 236 (1993).

- [5] Jantsch W., Przybylinska H., Suprun-Belevich Yu., et al. ICDS18, Materials Science Forum 196, Part 2, 609 (1995).
- [6] Emtsev V. V., Alexandrov O. V., Poloskin D. S., Shek E. I., and Sobolev N. A. ICDS18, Materials Science Forum, 196, Part 2, 615 (1995).
- [7] Benton J. L., Michel J., Kimerling L. C., et al. J. Appl. Phys., 70, 2667 (1991).

Поступила в редакцию 13 мая 1996 г.