

Вольт-фарадные характеристики $p-n$ -структур на основе (111)Si, легированного эрбием и кислородом

© А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, А.Н. Якименко*

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

* Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 24 августа 2000 г. Принята к печати 5 сентября 2000 г.)

Исследованы вольт-фарадные характеристики туннельных диодов, полученных с использованием соимплантации эрбия и кислорода в пластины монокристаллического Si(111). Обнаружено наличие аномального увеличения емкости $p-n$ -перехода при увеличении обратного напряжения при определенных, зависящих от дозы имплантации, температурах. Рост емкости (уменьшение ширины области пространственного заряда) связывается с образованием в n -слое $p-n$ -перехода высокой плотности глубоких уровней в запрещенной зоне Si и освобождением их от электронов в области пространственного заряда при увеличении напряжения. Экспериментальные результаты указывают на то, что параметры дефектов, ответственных за появление уровней, могут зависеть от дозы имплантации эрбия и кислорода.

Имплантация ионов эрбия и кислорода в монокристаллический кремний используется для создания светоизлучающих Si(Er,O)-диодов [1–7]. Такие диоды излучают на длине волны $\lambda \simeq 1.54$ мкм, соответствующей переходам из первого возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ в основное состояние $^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} . К настоящему времени электролюминесценция (ЭЛ) ионов эрбия при комнатной температуре наблюдалась как при прямом [1], так и обратном [1–7] напряжении, подаваемом на Si(Er,O)-диод как в режиме туннельного [1–3], так и лавинного [3–7] пробоя при ориентации Si(100) [1,4,6] и (111) [2,3,5–7]. Ранее нами было обнаружено [2–7], что электролюминесцентные и электрофизические свойства Si(Er,O)-диодов с ориентацией Si(100) и (111) в режиме пробоя значительно различаются. В частности, существенные различия характерны для температурных зависимостей интенсивности ЭЛ. Если для ориентации Si(100) при фиксированном обратном токе через диод обычно наблюдается монотонное уменьшение интенсивности ЭЛ ионов эрбия при увеличении температуры от 80 К до комнатной [4,6], то в Si(Er,O)-диодах на основе Si(111) в режиме пробоя наблюдались "аномальные" температурные зависимости интенсивности ЭЛ, на которых присутствовал участок роста (температурного возгорания) интенсивности ЭЛ при увеличении температуры образца [3,5,6]. В работе [5] впервые было предложено объяснение этого эффекта, базирующееся на представлениях о наличии в легированной эрбием и кислородом области Si(111) высокой плотности уровней в запрещенной зоне кремния (при низких температурах — ловушек для дырок), которые заполняются в результате протекания тока. В рамках этой модели эффект температурного возгорания ЭЛ объясняется термическим опустошением ловушек, приводящим к изменению характеристик пробоя.

В настоящей работе обнаружено и исследовано еще одно необычное свойство (111)-Si(Er,O)-диодов, а именно — наличие при определенных, зависящих от дозы

имплантации эрбия и кислорода, температурах интервалов роста емкости на вольт-фарадных характеристиках обратно смещенных $p-n$ -переходов в допробойной области с ростом приложенного напряжения.

Экспериментальные условия

Имплантация ионов эрбия с энергиями 2.0 и 1.6 МэВ и дозами $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (образец 3.2) и $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (образцы 3.3 и 3.5), а также кислорода с энергиями 0.28 и 0.22 МэВ и дозами $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (образец 3.2) и $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (образцы 3.3 и 3.5) и проводилась в полированные пластины кремния n -типа проводимости, выращенные по методу Чохральского. Образцы 3.2 и 3.3 изготавливались на основе Si(111) с удельным сопротивлением $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а образец 3.5 — на основе Si(100) с удельным сопротивлением $15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Имплантация сопровождалась аморфизацией приповерхностного слоя. Ионы бора (40 кэВ , $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и фосфора (80 кэВ , 10^{15} см^{-2}) имплантировались в лицевую и обратную сторону пластин соответственно для создания сильно легированных p^+ - и n^+ -слоев. Отжиг при 620°C в течение 1 ч и 900°C в течение 0.5 ч приводил к перекристаллизации аморфного слоя и образованию оптически и электрически активных (донорных) центров. По данным вторичной ионной масспектрометрии (ВИМС), в результате имплантации и отжигов формировался легированный эрбием слой кремния, который на расстоянии 0.5–0.8 мкм от поверхности полупроводника имел практически постоянную концентрацию эрбия 10^{19} см^{-3} в образце 3.2 и $\sim 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в образце 3.3 [3]. По данным ВИМС [3], концентрация атомов бора в максимуме в этих образцах достигала $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Меза-диоды с рабочей площадью $s = 0.12 \text{ мм}^2$ изготавливались по обычной технологии [4]. Обратные ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов измерялись на частоте 32 Гц при длительности импульсов 0.5 мс. Величина экстраполированного (полученного

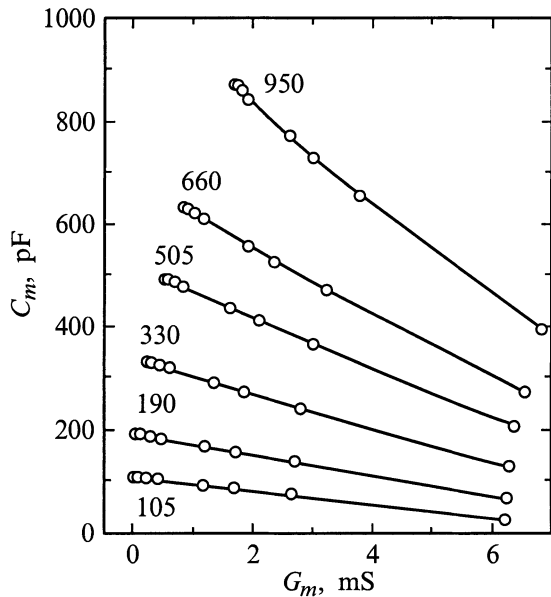


Рис. 1. Зависимости измеренной емкости C_m эквивалентной схемы диода, состоящей из параллельно включенных магазина сопротивлений R , магазина емкостей C и последовательно с ними включенного сопротивления $r = 50$ Ом, от измеренной активной проводимости G_m . Величина G_m варьировалась путем изменения R . Значения емкости C в пФ указаны цифрами у кривых.

экстраполяцией близкого к линейному участка ВАХ при больших токах) напряжения пробоя (V_{th}) при комнатной температуре для образцов 3.2, 3.3 и 3.5 составляла соответственно ~ 4.2 , ~ 5.2 и ~ 3.2 В. Для всех исследованных диодов имело место увеличение V_{th} при охлаждении, что характерно для механизма туннельного пробоя. Измерения емкости и активной проводимости диодов в режиме подачи допробойного обратного напряжения смещения V проводились с использованием измерителя емкости и активной проводимости E7-12 на частоте $f = 1$ МГц при амплитуде тестирующего сигнала 25 мВ. Измеритель E7-12 рассчитан на параллельную эквивалентную схему измеряемого объекта, состоящую из емкости и активного сопротивления. Эквивалентная схема исследованных нами диодов помимо параллельно включенных емкости C и активного сопротивления R $p-n$ -перехода включала последовательно соединенное активное сопротивление кремниевой подложки (базы) r . Из радиотехники известно, что величины емкостей C и сопротивлений R могут быть определены на основании измеряемых по параллельной схеме значений емкости C_m и активного сопротивления R_m из системы уравнений:

$$C_m = \frac{C}{(1 + r/R)^2 + \omega^2 C^2 r^2}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_m} = \frac{(r + R) + \omega^2 C^2 R^2 r}{(r + R)^2 + \omega^2 C^2 R^2 r^2}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$. Эта система в общем случае не решена из-за нелинейности входящих в нее уравнений. Поэтому

в настоящей работе значения C определялись из номограмм, принцип построения которых описан далее.

В результате исследований эквивалентной схемы, собранной из магазинов сопротивлений R и r , а также емкостей C , нами были построены зависимости измеряемой прибором емкости C_m от измеряемой проводимости G_m при различных C и r . Величина G_m варьировалась путем изменения R . Пример таких зависимостей для $r = 50$ Ом и различных C представлен на рис. 1. Как видно из рис. 1, множество экспериментальных зависимостей типа представленных на рис. 1 образуют систему номограмм для определения емкости $p-n$ -переходов по результатам измерения C_m , G_m и r . Сопротивление r приравнивалось к дифференциальному сопротивлению диода в режиме развитого пробоя, когда активное сопротивление $p-n$ -перехода мало по сравнению с сопротивлением подложки. Для образцов 3.2 и 3.3 при 300 К величина r составляла 50 Ом, а для образца 3.5 — 150 Ом. Уменьшение температуры приводило к уменьшению r . По нашим оценкам, применение описанной методики к полученным нами результатам измерения C_m и G_m с использованием E7-12 обеспечивало погрешность определения емкости C менее 10%.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследования ЭЛ и обратных ветвей ВАХ диодов, изготовленных по технологии образцов 3.2 и 3.3, описаны в работах [2,3]. На рис. 2 приведены измеренные при 300 К зависимости емкости обратно смещенных $p-n$ -переходов от напряжения, приложенного к диоду. Если для образцов 3.2 и 3.5 имеет место обычный вид

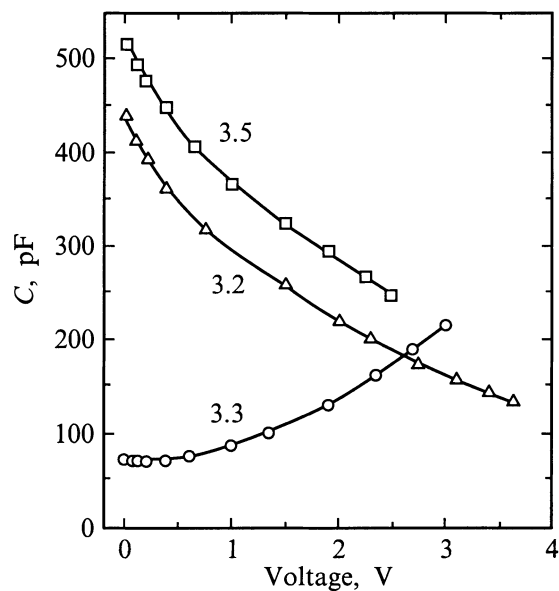


Рис. 2. Измеренные при 300 К зависимости емкости $p-n$ -переходов образцов 3.2, 3.3 и 3.5 от обратного напряжения, приложенного к диоду. Номера образцов указаны около кривых.

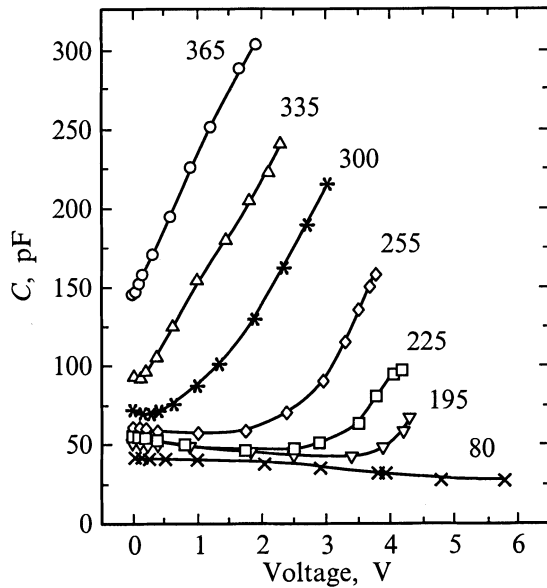


Рис. 3. Измеренные при различных температурах зависимости емкости $p-n$ -перехода образца 3.3 от обратного напряжения, приложенного к диоду. Температура измерений T , К указана цифрами у кривых.

$C-V$ -характеристик (уменьшение емкости $p-n$ -перехода с ростом напряжения, обусловленное увеличением ширины обедненного слоя), то в образце 3.3 при $V > 0.5$ В наблюдается рост емкости $p-n$ -перехода с ростом напряжения. Диапазон напряжений в допробойной области, в котором происходит рост емкости, соответствует средним напряженностям (F^*) электрического поля

$$\sim 3 \cdot 10^4 \text{ В/см} < F^* < \sim 5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$$

Величина F^* определялась по формуле

$$F^* = \frac{VC}{\varepsilon\varepsilon_0S}, \quad (3)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость Si, ε_0 — электрическая постоянная. Еще одним необычным свойством образца 3.3 является то, что при $V \approx 0$ емкость $p-n$ -перехода для него в несколько раз меньше емкостей образцов 3.2 и 3.5, имеющих такую же площадь и не превосходящих его по дозам введенного эрбия и кислорода. Отметим также, что вид зависимостей $G_m(V)$ при 300 К образцов 3.3 и 3.5 имеет одинаковый характер, и при $0.8 \leq V \leq 3$ В они различались не более чем на 40%; причем при $0 \leq V \leq 1.8$ В величина G_m в образце 3.5 была больше, чем в образце 3.3, а при $2.2 < V \leq 3$ В — наоборот, меньше.

На рис. 3 представлены $C-V$ -характеристики образца 3.3, измеренные при различных температурах в допробойной области напряжений. В диапазоне температур 195–385 К участки роста емкости с ростом напряжения наблюдаются на всех $C-V$ -характеристиках. Напряжение, соответствующее началу участка роста емкости,

возрастает с уменьшением температуры, и при температурах, близких к 80 К, рост емкости не наблюдался.

Измеренные при различных температурах $C-V$ -характеристики образца 3.2 представлены на рис. 4. Для этого образца также наблюдаются участки роста емкости с ростом V , но в диапазоне температур ниже комнатной, включая 80 К. Напряжение, соответствующее началу роста емкости в образце 3.2, также увеличивается с уменьшением температуры образца, но приращения емкости с ростом напряжения значительно меньше, чем для образца 3.3.

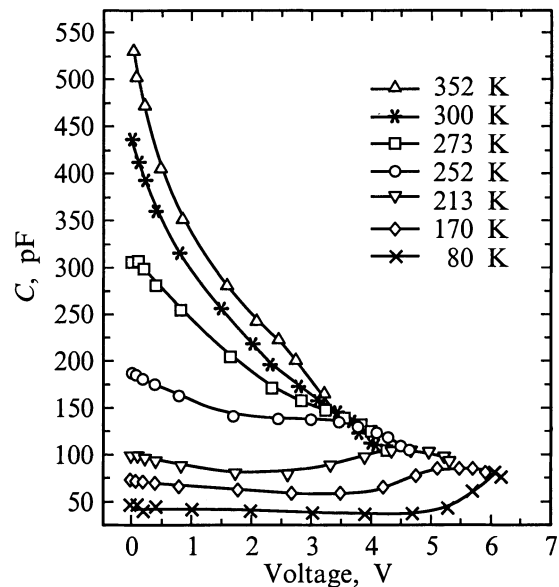


Рис. 4. Измеренные при различных температурах зависимости емкости $p-n$ -перехода образца 3.2 от обратного напряжения, приложенного к диоду.

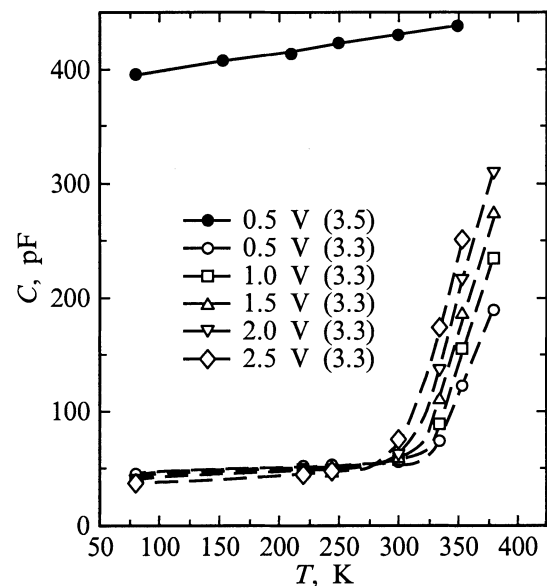


Рис. 5. Зависимости емкости $p-n$ -переходов образцов 3.3 и 3.5 при различных напряжениях на диодах от температуры.

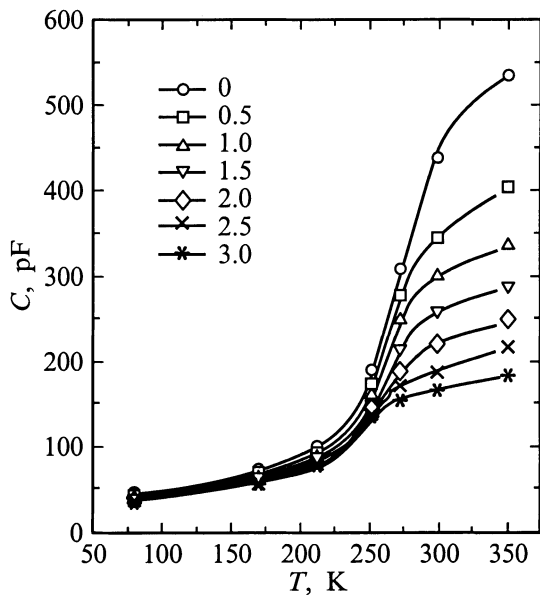


Рис. 6. Зависимости емкости $p-n$ -перехода образца 3.2 при различных напряжениях на диоде от температуры. Значения напряжения обратного смещения V , В указаны цифрами на рисунке.

Для образца 3.5 с ориентацией Si(100), прошедшего все те же технологические операции, что и образец 3.3, $C-V$ -характеристики в диапазоне температур 80–350 К не содержали участков роста емкости с ростом напряжения в допробойной области напряжений.

На рис. 5 для диодов 3.5 (при напряжении $V = 0.5$ В) и 3.3 ($V = 0.5-2.5$ В) представлены построенные по результатам измерений $C-V$ -характеристики зависимости емкости $p-n$ -перехода от температуры. Для образца 3.5 с ориентацией Si(100) имеет место относительно небольшое уменьшение емкости $p-n$ -перехода при уменьшении температуры от 350 до 80 К. Для образца 3.3 с ориентацией Si(111) емкость $p-n$ -перехода при 80 К на порядок величины меньше, чем для 3.5, и на зависимостях емкости от температуры наблюдаются участки резкого значительного увеличения емкости при увеличении температуры образца. При увеличении напряжения начало резкого роста емкости от температуры сдвигается в область более низких температур. Для образца 3.2 с меньшей, чем в 3.3 дозой имплантации эрбия и кислорода, резкий рост емкости проявляется при более низких температурах, чем в образце 3.3 (см. рис. 6).

Представленные экспериментальные результаты указывают на наличие в образцах с ориентацией Si(111) высокой концентрации глубоких уровней (ГУ) в запрещенной зоне n -области $p-n$ -перехода, степень заполнения которых электронами растет с уменьшением температуры. Центры освобождаются от электронов в области пространственного заряда (ОПЗ) в результате совместного действия тепловых колебаний кристаллической решетки и электрического поля. Влияние на концентрацию заполненных электронами ГУ может также

оказывать протекающий ток из-за возможности рекомбинации электронов на ГУ с дырками и захвата электронов на ГУ. Увеличение напряжения может приводить к росту вероятности выброса электронов с ГУ в зону проводимости [8], например в соответствии с эффектом Френкеля–Пула, а также увеличивать плотность тока. Заметим, что исследованные диоды характеризовались значительными обратными токами. Например, при $V \approx 2$ В токи в образцах 3.2 и 3.3 практически совпадали и составляли ~ 0.5 мА. Столь значительные токи также могут быть связаны с высокой плотностью уровней дефектов в запрещенной зоне Si, которые при определенных условиях являются эффективными центрами генерации носителей заряда. Измерения ВАХ продемонстрировали, что при 300 К, в диапазоне $0 \leq V \leq 3$ В и одинаковых значениях V токи в образцах 3.2 и 3.3 отличались не более чем на 40% и монотонно возрастали с ростом V , причем при $0 \leq V \leq 1.8$ В ток в образце 3.2 был меньше, чем в 3.3, а при $2.2 \leq V \leq 3$ В — наоборот, больше. Поэтому наблюдаемые различия $C-V$ - и $C-T$ -характеристик образцов 3.2 и 3.3 не могут быть объяснены только различием в протекающих через них обратных токах.

Уменьшение плотности электронов на ГУ в ОПЗ n -области и вызывает необычный рост емкости $p-n$ -переходов с ростом приложенного напряжения. В рамках таких представлений сдвиг интервала температур, в котором наблюдается рост емкости от напряжения, и смещение участка резкого роста емкости от температуры для образца 3.2 в область более низких температур по сравнению с образцом 3.3 могут быть связаны с меньшей энергией активации ГУ в образце 3.2 по сравнению с образцом 3.3. Представленные экспериментальные результаты свидетельствуют, что параметры дефектов, ответственных за появление ГУ в образцах 3.2 и в 3.3 различаются. Наиболее вероятным нам представляется образование в (111)Si в результате имплантации и последующих отжигов протяженных дефектов, параметры которых изменяются, например, за счет изменения их размеров в зависимости от дозы имплантации. Даже будучи нейтральными до захвата электронов такие дефекты за счет своей протяженности могут иметь значительную область действия потенциала дефекта, и по этой причине энергетический барьер для выброса захваченного электрона из них в электрическом поле может значительно снижаться. Действительно, в электрическом поле напряженностью F уменьшение энергетического барьера ΔE для выброса электрона в зону проводимости из потенциальной ямы радиуса δ может быть оценено из формулы [8]

$$\Delta E = eF\delta. \tag{4}$$

Согласно [8], $\Delta E = 10^{-3}$ эВ (т.е. пренебрежимо мал) при $F = 10^5$ В/см и $\delta = 0.1$ нм, но при такой же напряженности электрического поля и $\delta = 10$ нм уменьшение барьера составляет $\Delta E = 0.1$ эВ, т.е. существенно.

Как отмечалось выше, представления о наличии в (111)-Si(Er,O)-диодах высокой плотности ГУ в запрещенной зоне Si ранее уже привлекались для объяснения

эффекта температурного возгорания интенсивности ЭЛ эрбия в режиме пробоя диода. Полученные в настоящей работе результаты, таким образом, являются еще одним подтверждением образования высокой концентрации ГУ в таких структурах. В работе [6] было установлено формирование различных структурных дефектов в диодах (111)-Si(Er,O) и (100)-Si(Er,O), которые, по-видимому, и обуславливают различия как их электролюминесцентных, так и емкостных свойств.

Заключение

В (111)-Si(Er,O)-диодах в определенных, зависящих от дозы имплантации эрбия и кислорода, интервалах температур наблюдались участки роста емкости $p-n$ -переходов с ростом приложенного обратного напряжения. Рост емкости связывается с наличием в n -слое $p-n$ -перехода высокой плотности глубоких уровней в запрещенной зоне Si, которые в области пространственного заряда освобождаются от электронов при увеличении напряжения. Экспериментальные результаты указывают на то, что параметры дефектов, ответственных за появление уровней, зависят от дозы имплантации эрбия и кислорода.

Авторы благодарны Т.М. Мельниковой, Е.О. Паршину и А.В. Шестакову за помощь при изготовлении образцов.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 99-02-17750) и INTAS (грант № 99-01872).

Список литературы

- [1] G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, C. Spinella. *J. Appl. Phys.*, **81**, 2784 (1997).
- [2] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, П.Е. Хакушев, М.А. Трищенко. *ФТП*, **34**, 965 (2000).
- [3] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. *ФТП*, **34**, 1069 (2000).
- [4] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1930 (1997).
- [5] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1223 (1998).
- [6] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев, В.И. Вдовин. *ФТП*, **33**, 660 (1999).
- [7] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh, P.E. Khakushev, M.A. Trishenkov. *J. Luminesc.*, **80**, 315 (1999).
- [8] Ж. Бургуэн, М. Ланно. *Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты* Пер. с англ. под ред. В.Л. Гуревича (М., Мир, 1985).

Редактор Т.А. Полянская

Capacitance-voltage characteristics of the $p-n$ -structures based on (111)Si doped with erbium and oxygen

A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko*

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia
* St.Petersburg State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia

Abstract The capacitance-voltage characteristics of tunneling diodes prepared by erbium and oxygen ion co-implantation into single crystal (111)Si have been studied. An anomalous enhancement of the $p-n$ junction capacitance with increasing the reverse bias has been observed at certain temperatures depending on the implantation dose. The increase in capacitance (the decrease of the space charge region width) is associated with formation of deep levels having high density in the n -layer of $p-n$ junction and also with the electron emission from the levels in the space charge region as voltage increases. The results show that parameters of the defects responsible for the level formation may depend on the erbium and the oxygen implantation dose.