

ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА

УДК 538.935

АДМИТТАНС-СПЕКТРОСКОПИЯ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ В ДИОДАХ $p^+ \text{-Si}/n\text{-Si}:\text{Er}$

© 2013 г. Д.О. Филатов,¹ И.А. Зимовец,² В.П. Мишкин,³ И.А. Чугров,² Н.А. Алябина,¹
А.В. Корнаухов,¹ В.П. Кузнецов¹

¹НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

³Институт физики и химии Мордовского госуниверситета им. Н.П. Огарёва

filatov@phys.unn.ru

Поступила в редакцию 04.04.2013

Методом адмиттанс-спектроскопии светодиодов на основе структур $p^+ \text{-Si}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^+ \text{-Si}$, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии, исследован спектр глубоких уровней в активных слоях Si:Er. Определены энергии ионизации, эффективные сечения захвата электронов и концентрации глубоких уровней, связанных с примесью Er.

Ключевые слова: кремний, легированный эрбием; сублимационная молекулярно-лучевая эпитаксия, адмиттанс-спектроскопия, глубокие уровни.

Введение

Кремний, легированный эрбием (Si:Er), являлся в последние 15 лет объектом интенсивных исследований, что связано с перспективами использования данного материала в качестве активной среды для светоизлучающих приборов на базе Si: светоизлучающих диодов, а в перспективе — инжекционных лазеров, излучающих на длине волны $\lambda \approx 1.54$ мкм, соответствующей минимуму оптических потерь в кварцевых волоконных световодах [1]. Принцип действия указанных приборов состоит в электрической инжекции избыточных электронов и дырок из областей n - и p -типа, соответственно, в активную область Si:Er, где они образуют экситоны, связанные на примесных комплексах Er [2]. Энергия безызлучательной рекомбинации экситона передаётся внутренней $4f$ -оболочке иона Er^{3+} , возбуждая переход $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Из вышеизложенного очевидно, что глубокие уровни, связанные с примесными атомами Er, а также с их комплексами с другими примесями и структурными дефектами матрицы Si, играют существенную роль в механизме возбуждения Er-люминесценции в Si. Энергетический спектр и параметры глубоких уровней в Si:Er, связанных с различными Er-содержащими комплексами, интенсивно изучались на протяжении последних полутора десятилетий [3]. Было уста-

новлено, что примесь Er может образовывать большое количество различных глубоких уровней в запрещённой зоне Si. Их спектр и концентрации существенным образом зависят от метода и условий получения материала, а также от режимов последующей термообработки. Для повышения эффективности возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) в Si:Er применяют солегирование кислородом и др., что ещё более увеличивает многообразие возможных примесных комплексов. В целом, несмотря на большое количество опубликованных работ в данной области, многие вопросы формирования и свойств примесных комплексов Er в Si ещё далеко не полностью выяснены.

К настоящему времени наиболее полно изучен спектр глубоких уровней в слоях Si:Er, полученных методом ионной имплантации [4–6]. В то же время было продемонстрировано, что светодиоды на основе структур $p^+ \text{-Si}/n\text{-Si}:\text{Er}$, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ), также демонстрируют эффективную ЭЛ на длине волны $\lambda \approx 1.54$ мкм [7]. Однако спектр примесных комплексов Er в эпитаксиальных слоях (ЭС), выращенных методом СМЛЭ, остаётся недостаточно изученным. Для его изучения применялись методы спектроскопии ФЛ [8], нестационарной спектроскопии глубоких уровней

(НСГУ) [8, 9] и адмиттанс-спектроскопии барьеров Шоттки [9], температурной зависимости концентрации свободных электронов [10], баллистической электронной эмиссионной микроскопии (БЭЭМ) тонких ЭС $p^+-Si:Er$ на подложках $n^+-Si(001)$ [11]. Однако результаты указанных работ зачастую противоречивы и не дают полного спектра глубоких уровней в слоях $Si:Er$, полученных методом СМЛЭ. Это делает актуальными исследования глубоких уровней в слоях $Si:Er$, выращенных СМЛЭ, с применением различных альтернативных методов. В настоящей работе для этой цели применялся метод адмиттанс-спектроскопии светодиодов на основе структур $p^+-Si/n-Si:(Er, Al)/n^+-Si$, выращенных методом СМЛЭ.

Методика эксперимента

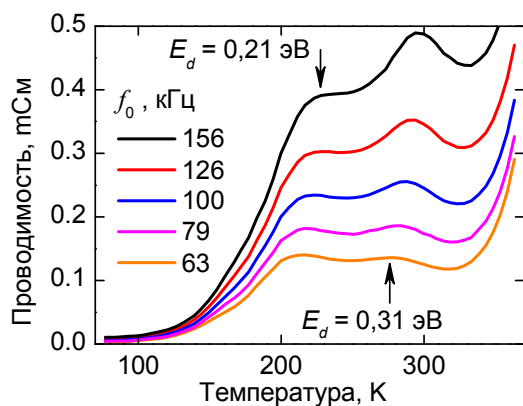
Структуры $p^+-Si/n-Si:Er/n^+-Si$ были выращены методом СМЛЭ на установке, сконструированной и изготовленной в Научно-исследовательском физико-техническом институте (НИФТИ) Нижегородского государственного университета (ННГУ). Ростовые методики описаны в [12]. Структуры были выращены на подложках $Si(001)$ при температуре подложки 580°C , дополнительному отжигу не подвергались. Концентрация В слое p^+-Si составляла $N_B \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. С целью увеличения квантового выхода ЭЛ активный слой $n-Si$ толщиной ≈ 400 нм легировался, кроме Er (концентрация $N_{Er} \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$), также Al (концентрация $N_{Al} \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Толщина подконтактного слоя n^+-Si , легированного P (концентрация P $N_P \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$), составляла ≈ 200 нм. Более подробно методика выращивания структур $p^+-Si/n-Si:(Er, Al)/n^+-Si$ описана в [7, 13].

На основе выращенных структур были сформированы меза-светодиоды с верхним омическим контактом в виде сетки. Размеры мез составляли $1.8 \times 1.2 \text{ мм}^2$. Результаты исследований электрических и люминесцентных характеристик светодиодов изложены в [13].

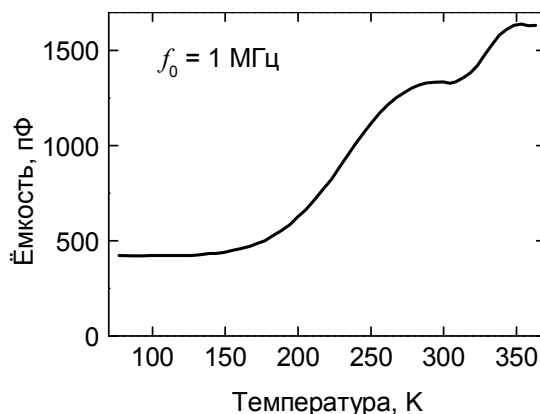
Измерения температурных и частотных зависимостей адмиттанса светодиодов проводились в диапазоне температур $T = 77 \div 370 \text{ К}$ и частот $f_0 = 1 \text{ кГц} \div 5 \text{ МГц}$ при помощи анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A при модуляции синусоидальным сигналом. Амплитуда модуляции составляла 1 мВ. Исследуемый диод укреплялся на держателе, который помещался в сосуд Дьюара с жидким азотом. В держатель был вмонтирован резистивный нагреватель. По мере выкипания жидкого азота при включённом нагревателе температура образца плавно менялась с течением времени от 77 до 370 К. Температура образца контролировалась при помощи термопары, встроенной в держатель образцов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1а, б приведены соответственно температурные зависимости высокочастотных (ВЧ) проводимости $G(T)$ и ёмкости $C(T)$ светодиода на базе структуры $p^+-Si/n-Si:(Er, Al)/n^+-Si$, измеренные на различных частотах f_0 . На зависимостях $G(T)$ наблюдаются пики, которым соответствуют ступени на температурной зависимости $C(T)$. Подобный характер зависимостей $G(T)$ и $C(T)$ типичен для случая, когда ВЧ проводимость и ёмкость диода определяются процессами перезарядки глубоких уровней в ОПЗ p^+-n -перехода [14]. Спектральное положение максимумов на кривых $G(T)$ определяется соотношением $2\pi f_0 \tau = 1$ [14], где



а



б

Рис. 1. Температурные зависимости ВЧ проводимости (а) и ёмкости (б) светодиода на базе структуры $p^+-Si/n-Si:(Er, Al)/n^+-Si$

$$\tau = \frac{g}{v_t \sigma_d N_c} \exp\left(\frac{E_d}{k_B T}\right) \quad (1)$$

– характерное время перезарядки глубокого уровня [15], g – фактор вырождения уровня, N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, v_t – средняя тепловая скорость электронов в зоне проводимости, σ_d – сечение захвата равновесного электрона глубоким примесным центром, E_d – энергия ионизации глубокого центра, k_B – постоянная Больцмана. На рис. 2 приведены зависимости $\ln(\tau T^2)$ от $1000/T$ для двух максимумов на кривых $G(T)$ на рис. 1а, по которым стандартным методом [15] с применением линейной регрессии были определены параметры соответствующих глубоких центров (E_d и σ), приведённые в таблице. Там же приведены значения концентрации соответствующих глубоких уровней, определённой по значениям ёмкости на плато зависимости $C(T)$ на рис. 1б по методике [14]. Глубокие доноры с $E_d \approx 0.2$ эВ и $0.31 \div 0.34$ эВ наблюдались ранее неоднократно методами ёмкостной спектроскопии глубоких уровней (ЕСГУ), НСГУ, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и в слоях Si:Er, полученных методом ионной имплантации [16, 17] и СМЛЭ [9], и связываются с комплексом иона Er^{3+} и неких дефектов в матрице Si. В то же время в адмиттанс-спектрах не были обнаружены уровни, связанные с комплексами Er с атомами кислорода, такими, например, как широко известные комплексы Er1,

Er2 и Er3 ($E_d \approx 0.07$, ≈ 0.13 и ≈ 0.15 эВ, соответственно) [5]. Сходные данные о спектре глубоких уровней в ЭС Si:Er, выращенных методом СМЛЭ, приводятся в [9]. Следует отметить также, что результаты адмиттанс-спектроскопии, полученные в настоящей работе, согласуются с результатами БЭЭМ, полученными в работе [11].

В работе [10] была изучена температурная зависимость эффекта Холла в ЭС Si:Er, полученных методом СМЛЭ. Было установлено, что температурная зависимость концентрации свободных электронов в слоях Si:Er имеет активационный характер, при этом энергия активации E_a плавно изменяется от ≈ 0.20 до ≈ 0.27 эВ при изменении температуры от 190 до 300 К. С учётом результатов адмиттанс-спектроскопии, полученных в настоящей работе, результаты холловских измерений в работе [10] могут быть интерпретированы следующим образом. При низких температурах ($T \sim 200$ К) концентрация свободных электронов в зоне проводимости Si:Er определяется процессом термической ионизации глубокого донора с $E_d \approx 0.2$ эВ. При $T \rightarrow 300$ К всё более существенный вклад в концентрацию свободных электронов начинает вносить термоионизация более глубокого донора с $E_d \approx 0.3$ эВ, что проявляется в соответствующем увеличении E_a . На рис. 3 приведена расчётная зонная диаграмма p^+ -Si/ n -Si:(Er, Al) перехода в равновесии (300 К), полученная путём численного решения уравнения Пуассона методом стрельбы.

Таблица

Параметры глубоких уровней в слоях Si:(Er,Al) в составе p^+ -Si/ n -Si:(Er,Al)/ n^+ -Si-диодов на базе структур, выращенных методом СМЛЭ

E_d , эВ	σ_{i_2} , см ²	N_{i_2} , см ⁻³	Тип центра	Источник	Метод обнаружения
0.21	$1.1 \cdot 10^{-15}$	$1.7 \cdot 10^{17}$	Er-дефект	[9–11, 16, 17]	НСГУ, ОНСГУ, ЕСГУ, эффект Холла, БЭЭС
0.31	$3.4 \cdot 10^{-15}$	$2.7 \cdot 10^{17}$	— // —	[9–11, 16]	НСГУ, ЕСГУ, эффект Холла, БЭЭС

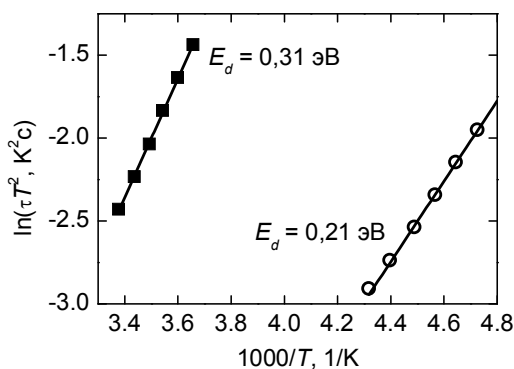


Рис. 2. Зависимость $\ln(\tau T^2)$ от $1000/T$ для глубоких уровней с $E_d \approx 0.21$ эВ и $E_d \approx 0.31$ эВ в слое Si:(Er, Al), выращенном методом СМЛЭ

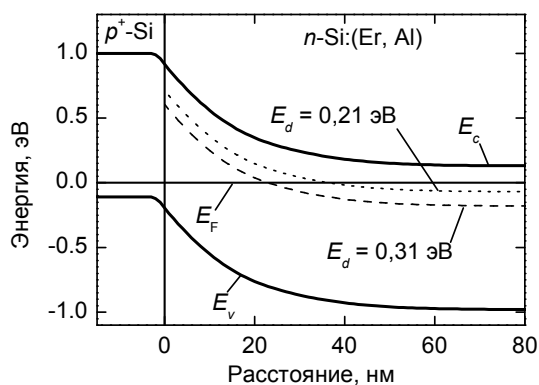


Рис. 3. Расчётная зонная диаграмма p^+ -Si/ n -Si:(Er, Al) перехода при 300 К. Значения концентрации и параметры глубоких уровней приведены в таблице

При $T < 150$ К ёмкость диода соответствует ёмкости плоского конденсатора с толщиной диэлектрического слоя ≈ 450 нм. При подаче на диод напряжения обратного смещения $\Delta V = 0.2$ В ёмкость диода изменяется на $\Delta C \approx -0.074$ пФ при 77 К, что соответствует значению $N_d - N_a \approx 2.4 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, что, в свою очередь, соответствует концентрации Р в материале сублимационного источника, из которого выращивались подконтактные n^+ -Si слои (КЭФ-0,008). Эти данные указывают на то, что при $T < 150$ К слой Si:(Er, Al) толщиной ≈ 400 нм полностью обеднён, и дифференциальная ёмкость диода dC/dV определяется концентрацией мелкой примеси в n^+ -Si:P, поскольку $N_B > N_P$.

Заключение

Результаты настоящей работы показывают, что применение метода адмиттанс-спектроскопии светодиодов на базе структур p^+ -Si/n-Si:(Er, Al)/ n^+ -Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии, позволило получить новые данные об энергетическом спектре и концентрациях глубоких уровней в слоях Si:Er, выращенных указанным методом, а также об электрофизических параметрах данных уровней. Установлено, что в эпитаксиальных слоях Si:Er, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии, методом адмиттанс-спектроскопии выявляются глубокие уровни, связанные с комплексами Er с дефектами матрицы Si. В то же время указанным методом не были обнаружены уровни, связанные с комплексами Er с атомами кислорода.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение 14.В37.21.0132).

Список литературы

1. Soref R. // Silicon. 2010. V. 2. № 1. P. 1–14.
2. Priolo F., Franzo G., Coffa S., Carnera A. // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. № 8. P. 4443–4455.
3. Kenyon A.J. // Semicond. Sci. Technol. 2005. V. 20. № 12. P. R65–R89.
4. Priolo F., Franzo G., Coffa S. et al. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. №6. P. 3874–3883.
5. Emtsev Jr.V.V., Poloskin D.S., Shek E.I. et al. // Mat. Sci. Eng. B. 2001. V. 81. №1–3. P. 74–76.
6. Evans-Freeman J.H., Kan P.Y.Y., Abdelgader N. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. №7. P. 3755–3760.
7. Кузнецов В.П., Ремизов Д.Ю., Шабанов В.Н. и др. // ФТП. 2006. Т. 40. № 7. С. 868–874.
8. Андреев А.Ю., Андреев Б.А., Дроздов М.Н. и др. // ФТП. 1999. Т. 33. № 2. С. 156–160.
9. Шмагин В.Б., Андреев Б.А., Антонов А.В. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. №2. С. 178–182.
10. Белова О.В., Шабанов В.Н., Касаткин А.П. и др. // ФТП. 2008. Т. 42. № 2. С.136–140.
11. Филатов Д.О., Зимовец И.А., Исаков М.А. и др. // ФТП. 2011. Т. 44. № 9. С. 1153–1158.
12. Кузнецов В.П., Красильник З.Ф. // ФТП. 2010. Т. 44. № 3. С. 413–417.
13. Кузнецов В.П., Шмагин В.Б., Марычев М.О. и др. // ФТП. 2010. Т. 44. №12. С. 1645–1648.
14. Losee D.L. // Appl. Phys. Lett. 1972. V. 21. № 2. P. 54–56.
15. Lang D.V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. № 7. P. 3023–3032.
16. Libertino S., Coffa S., Franzo G., Priolo F. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. № 6. P. 3867–3873.
17. Cavallini A., Fraboni B., Pizzini S. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. № 4. P. 468–470.

ADMITTANCE SPECTROSCOPY OF DEEP LEVELS IN p^+ -Si/n-Si:Er/ n^+ -Si DIODES

D.O. Filatov, I.A. Zimovets, V.P. Mishkin, I.A. Chugrov, N.A. Alyabina, A.V. Kornaukhov, V.P. Kouznetsov

The deep level spectrum in the Si:Er active layers of the LEDs based on the SMBE grown p^+ -Si/n-Si:Er/ n^+ -Si structures has been studied by admittance spectroscopy. The ionization energies, the electron capture cross-sections, and the concentrations of the Er-related deep levels have been determined.

Keywords: erbium-doped silicon, sublimation molecular beam epitaxy (SMBE), admittance spectroscopy, deep levels.