

# Коррекция метода вольт-амперных характеристик для определения плотности поверхностных состояний в системе германий–фторид редкоземельного элемента

© М.Б. Шалимова<sup>¶</sup>, Е.Г. Бесчасная

Самарский государственный университет,  
443011 Самара, Россия

(Получена 17 ноября 2006 г. Принята к печати 4 декабря 2006 г.)

Сообщается о проведенных исследованиях границы раздела германия с фторидами диспрозия, лантана, самария в структурах металл–диэлектрик–полупроводник. Определены характер энергетического спектра и плотность поверхностных состояний для границы раздела германия с различными фторидами редкоземельных элементов, для чего проводился сравнительный анализ результатов, полученных на основе двух методов: вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Анализ показал, что информация, извлеченная из вольт-амперных характеристик, должна быть скорректирована с учетом результатов, полученных с помощью других измерений, например с помощью вольт-фарадных характеристик. Подобное сравнение позволило также получить дополнительные сведения о границе раздела, в частности удалось определить толщину слоя туннельно-тонкого диэлектрика.

PACS: 73.20.At, 73.40.Qv

## 1. Введение

В последние годы возрос интерес к структурам металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) на основе германия, так как дальнейшее увеличение быстродействия полевых транзисторов ограничивается сравнительно невысокой подвижностью носителей заряда в кремнии. Потенциальные возможности германия могут быть реализованы только при условии получения достаточно совершенной границы раздела германия и диэлектрика. Однако природный окисел германия имеет низкую термическую стабильность и плохое качество, что делает крайне трудным высококачественную пассивацию поверхности. Поэтому поиск диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости, который способен поддерживать высокую подвижность в канале полевого транзистора на основе германия, а также оценка надежности методик получения информации о границе раздела германий–диэлектрик являются задачей текущего периода времени.

В настоящей работе исследовались параметры границы раздела германия с фторидами лантана, самария, диспрозия. Особое внимание уделено оценке надежности полученной информации о параметрах исследуемых структур, для чего проводился сравнительный анализ результатов, полученных на основе двух методов измерения; это позволило получить дополнительные сведения о границе раздела.

## 2. Экспериментальные образцы и методика эксперимента

В качестве подложек использовались монокристаллические пластины германия *n*-типа с ориентацией (111) марки ГЭС-2 и ГМО-3. Специальная процедура очистки

германиевых подложек не проводилась для возможности оценки в дальнейшем пассивирующих свойств пленок фторидов редкоземельных элементов (РЗЭ).

На германиевую подложку методом термического распыления в вакууме порошкообразных  $DyF_3$ ,  $LaF_3$ ,  $SmF_3$  наносился слой фторида РЗЭ толщиной  $d = 0.04–0.30$  мкм. С целью идентификации фаз напыленных пленок проводился рентгенографический анализ поверхности пленок фторидов лантана, самария и диспрозия на германиевой подложке. Также проводилось исследование состава полученных пленок, нанесенных на кварцевые подложки, методами резерфордовского обратного рассеяния и ядерных реакций. Проведенные исследования показали, что полученные пленки фторидов лантана, самария и диспрозия как на кварцевых, так и на германиевых подложках являются стехиометрическими.

Впоследствии на фторид РЗЭ наносились алюминиевые контакты диаметром 0.5–0.7 мм. Таким образом получались МДП-структуры с „толстым“ диэлектриком. Измерительная технология высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ), примененная к данным структурам, позволила получить данные о распределении энергетической плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне германия, а также зависимость поверхностного потенциала от напряжения. Затем исследуемые структуры подвергались процессу электроформовки. В основе метода электроформовки лежит явление переключения проводимости с памятью, которое наблюдается в пленках фторидов РЗЭ под действием сильных электрических полей напряженностью  $\sim 10^8$  В/м. В течение этого процесса в диэлектрической пленке создается локальная неомогенная область с высокой проводимостью площадью  $A = 3–80$  мкм<sup>2</sup>. При этом, как показали исследования, в области канала проводимости на границе с германием формируется слой туннельного диэлектрика [1].

<sup>¶</sup> E-mail: shalim@ssu.samara.ru

Таким образом, МДП-структуры с туннельно-тонким диэлектриком, т.е. МДП-диоды, получались на основе МДП-структур с „толстым“ диэлектрическим слоем; это гарантировало, что оба типа структур получались в одном технологическом цикле и на одной подложке. К сформированным таким образом МДП-диодам применялся метод определения параметров границы раздела германий-фторид РЗЭ из прямых ветвей вольт-амперных характеристик (ВАХ). На заключительном этапе проводилось сравнение результатов, полученных на основе двух методов измерения.

### 3. Метод высокочастотных вольт-фарадных характеристик

Измерение вольтемкостных зависимостей проводилось на частоте 1 МГц, результаты измерений представлены на рис. 1 для структуры Al-LaF<sub>3</sub>-n-Ge.

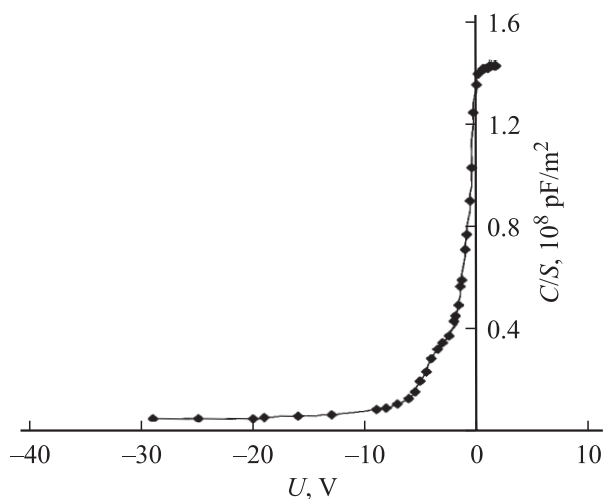


Рис. 1. Вольт-фарадная характеристика структуры Al-LaF<sub>3</sub>-Ge. *S* — площадь МДП-структуры.

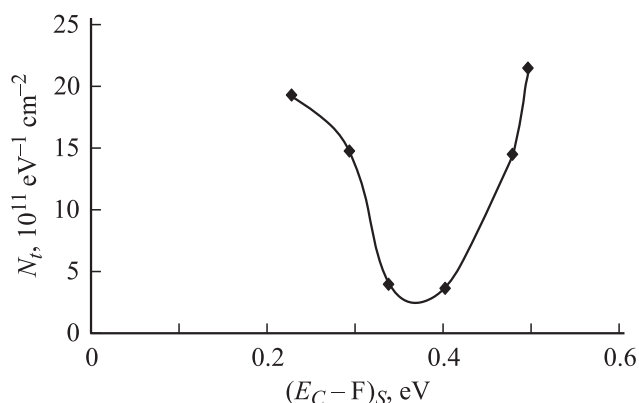


Рис. 2. Распределение энергетической плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне германия для МДП-структуры на основе n-Ge (ГМО-3) со слоем LaF<sub>3</sub> (метод ВФХ).

Энергетическая плотность поверхностных состояний  $N_t$  определялась по формуле [2]

$$N_t = \frac{C_D}{q^2} \left( \frac{dU}{d\varphi_s} - 1 \right) + \frac{C_S}{q^2}, \quad (1)$$

где  $C_D$  — емкость диэлектрика,  $C_S$  — емкость области пространственного заряда,  $q$  — заряд электрона,  $\varphi_s$  — величина поверхностного потенциала.

Характер энергетического спектра и плотность поверхностных состояний  $N_t$  для структуры Al-LaF<sub>3</sub>-n-Ge представлены на рис. 2, аналогичные зависимости наблюдались для структур с фторидом самария и фторидом диспрозия. Таким образом, в системе германий-фторид РЗЭ имеет место характерный для большинства обработок поверхности германия непрерывный энергетический спектр быстрых состояний. Плотность состояний возрастает по мере удаления от середины запрещенной зоны, минимум плотности находится вблизи середины запрещенной зоны. Величина плотности состояний в минимуме имеет некоторый разброс значений, минимальная плотность  $3 \cdot 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  наблюдалась для границы раздела LaF<sub>3</sub>-n-Ge и DyF<sub>3</sub>-n-Ge.

### 4. Метод вольт-амперных характеристик

Вольт-амперные характеристики снимались на постоянном сигнале на МДП-диодах, т.е. МДП-структурах, предварительно подвергнутых процессу электроформовки, как описано выше. Вольт-амперные характеристики полученных МДП-диодов были униполярны, для исследований отбирались структуры с коэффициентом выпрямления  $10^3 - 10^4$ . В области прямого смещения, когда напряжение, подаваемое на структуру,  $U < \varphi_{s0}$  ( $\varphi_{s0}$  — величина поверхностного потенциала при  $U = 0$ ), ВАХ определяются зависимостью

$$J = D_T A A^* T^2 \exp \left[ - \frac{q\varphi_s(U) + (E_C - F)}{kT} \right], \quad (2)$$

где  $D_T$  — коэффициент туннельной прозрачности,  $A^*$  — постоянная Ричардсона,  $A$  — площадь проводящего канала,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $E_C$  — энергия дна зоны проводимости,  $F$  — энергия уровня Ферми полупроводника.

В данной работе предполагается постоянство коэффициента туннельной прозрачности диэлектрика в области используемых напряжений. Таким образом, ВАХ при прямом смещении в данной области напряжений аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. Однако для большинства образцов наблюдалось отклонение зависимости  $\ln J(U)$  от линейной, что связано с неоднородностью распределения поверхностных состояний на границе раздела германий-фторид РЗЭ. В этом случае

Параметры границы раздела германия с фторидами редкоземельных элементов

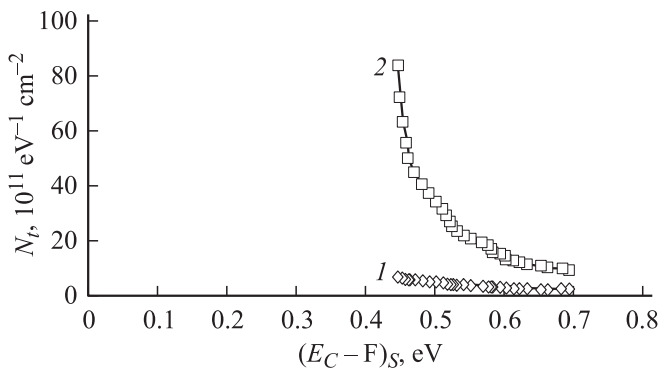
Структура фторид РЗЭ– <i>n</i> -Ge	Толщина диэлектрика <i>d</i> сразу после напыления, мкм	Значения $N_t$ в минимуме, полученные методом ВФХ, $10^{11} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	Значения $N_t$ в минимуме, полученные методом ВАХ, $10^{11} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	Коэффициент туннельной прозрачности $D_T$	Расчетная толщина туннельного диэлектрика $d_t$ после электроформовки, Å
LaF <sub>3</sub> –Ge (ГМО-3)	0.09	$3.77 \pm 0.10$	$4.68 \pm 0.15$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	7.37–9.87
LaF <sub>3</sub> –Ge (ГЭС-2)	0.07	$3.00 \pm 0.13$	$8.0 \pm 0.11$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	7.33–9.84
SmF <sub>3</sub> –Ge (ГМО-3)	0.2	$3.8 \pm 0.09$	$15.23 \pm 0.13$	$8.6 \cdot 10^{-6}$	5.44–7.23
SmF <sub>3</sub> –Ge (ГЭС-2)	0.3	$4.00 \pm 0.09$	$4.19 \pm 0.05$	$7.6 \cdot 10^{-6}$	5.47–7.38
DyF <sub>3</sub> –Ge (ГМО-3)	0.2	$3.00 \pm 0.12$	$3.0 \pm 0.02$	$7.8 \cdot 10^{-6}$	5.46–7.37
DyF <sub>3</sub> –Ge (ГЭС-2)	0.2	$4.96 \pm 0.09$	$8.33 \pm 0.11$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	6.29–8.44

значения  $N_t$  рассчитываются по формуле [2,3]:

$$N_t = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_D}{q^2 d} \left\{ \frac{q}{kT} \left[ \frac{d(\ln J)}{dU} \right]^{-1} - 1 \right\}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\varepsilon_D$  — диэлектрическая проницаемость фторида РЗЭ.

Расчитанные согласно формуле (3) зависимости распределения  $N_t$  по энергиям в запрещенной зоне германия представлены на рис. 3 для германиевых структур с пленками фторидов лантана и самария.



**Рис. 3.** Распределение плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне германия, рассчитанное методом вольт-амперных характеристик для структур: 1 — Al-SmF<sub>3</sub>-Ge, 2 — Al-LaF<sub>3</sub>-Ge.

## 5. Обсуждение результатов

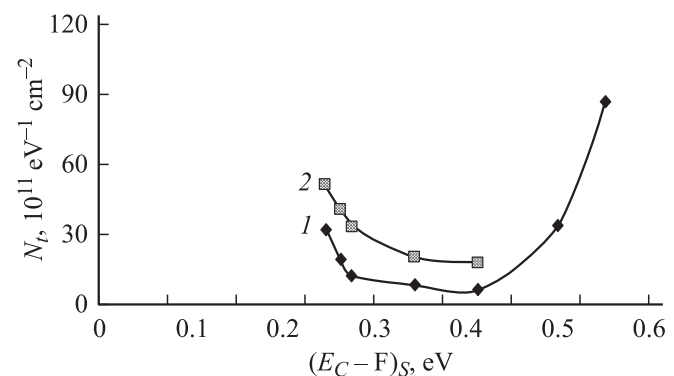
Имеется ряд отличий энергетических спектров поверхностных состояний, полученных вторым методом, от зависимостей, найденных первым методом:

- не совпадают значения энергий, при которых наблюдается минимальное значение  $N_t$ ;
- в методе ВАХ не проявляется правая ветвь энергетического спектра;
- почти во всех случаях значения  $N_t$ , полученные методом ВАХ, несколько превышали аналогичные значения  $N_t$ , полученные методом вольт-фарадных характеристик.

Анализ показывает, что наилучшее соответствие между двумя методами можно получить, если использовать в качестве подгоночного параметра коэффициент туннельной прозрачности  $D_T$ . В качестве начального условия коэффициент туннельной прозрачности полагался равным единице.

Совмещая минимум на спектральных зависимостях  $N_t$ , измеренных вторым методом, с минимумом, установленным в первом методе, подобно тому как это представлено на рис. 4 для структуры с фторидом самария, были получены значения коэффициента туннельной прозрачности  $D_T = 1.4 \cdot 10^{-7} - 8.6 \cdot 10^{-6}$ , данные представлены в таблице. Распределение плотности поверхностных состояний по энергиям, полученное методом ВАХ с учетом коэффициента туннельной прозрачности в качестве подгоночного параметра, представлено на рис. 4 (кривая 2) для структуры Al-SmF<sub>3</sub>-*n*-Ge. Превышение значения  $N_t$  в методе ВАХ обусловлено вкладом в величину  $N_t$  быстрых и медленных поверхностных состояний, так как скорость их ответа в данном случае не ограничивается частотой сигнала, как в методе вольт-фарадных характеристик.

Совмещая минимум на спектральных зависимостях  $N_t$ , измеренных вторым методом, с минимумом, установленным в первом методе, подобно тому как это представлено на рис. 4 для структуры с фторидом самария, были получены значения коэффициента туннельной прозрачности  $D_T = 1.4 \cdot 10^{-7} - 8.6 \cdot 10^{-6}$ , данные представлены в таблице. Распределение плотности поверхностных состояний по энергиям, полученное методом ВАХ с учетом коэффициента туннельной прозрачности в качестве подгоночного параметра, представлено на рис. 4 (кривая 2) для структуры Al-SmF<sub>3</sub>-*n*-Ge. Превышение значения  $N_t$  в методе ВАХ обусловлено вкладом в величину  $N_t$  быстрых и медленных поверхностных состояний, так как скорость их ответа в данном случае не ограничивается частотой сигнала, как в методе вольт-фарадных характеристик.



**Рис. 4.** Распределение плотности поверхностных состояний, рассчитанное методом ВФХ (кривая 1) и методом ВАХ с учетом коэффициента туннельной прозрачности диэлектрика (кривая 2) для германиевой структуры (ГМО-3) со слоем SmF<sub>3</sub>.

Если коэффициент  $D_T$  рассматривать в качестве эффективной прозрачности, то [4]

$$D_T = \exp(-1.01\Phi^{1/2}d_t), \quad (4)$$

где  $\Phi$  — высота барьера (в эВ),  $d_t$  — толщина диэлектрика (в ангстремах).

Полагая, что значение высоты барьера в системе германий-фторид РЗЭ ориентировочно составляет  $\Phi = 2.5-4.5$  эВ, были рассчитаны из формулы (4) значения толщины слоя туннельно-тонкого диэлектрика. Данные представлены в таблице, расчетные значения лежали в пределах  $5.44-9.87$  Å, что является типичным для туннельно-тонких структур, близких по свойствам к характеристикам диодов Шоттки.

Таким образом, результаты работы указывают на то, что информация о свойствах границы раздела германий-фторид РЗЭ, извлеченная из вольт-амперных характеристик, должна быть скорректирована с учетом результатов, полученных с помощью других методов измерения, например с помощью вольт-фарадных характеристик.

## Список литературы

- [1] В.А. Рожков, М.Б. Шалимова. ФТП, **32** (11), 1349 (1998).
- [2] В.И. Гаман. *Физика полупроводниковых приборов*. (Томск, Изд-во НТЛ, 2000) гл. 9, с. 311.
- [3] М.Б. Шалимова, Н.В. Щербакова. Письма ЖТФ, **31** (2), 27 (2005).
- [4] И. Живер. В сб.: *Туннельные явления в твердых телах*, под ред. Э. Бурштейна, С. Лундквиста и В.И. Переля (М., Мир, 1973) с. 27.

Редактор Л.В. Беляков

## Correction of current–voltage characteristics method for density of states evaluation in the system germanium–rare earth fluoride

*M.B. Shalimova, E.G. Beschasnaja*

Samara State University,  
443011 Samara, Russia

**Abstract** We report on researches of Ge interfaces with dysprosium, lanthanum and samarium fluorides in metal–insulator–semiconductor structures. Energy spectrum features and density of states were determined for interface of Ge with various rare earth fluorides. For this purposes a comparative analysis of current–voltage and capacitance–voltage characteristics was performed. The analysis has shown that information received from the current–voltage characteristics should be corrected in view of the results of another measurements, e.g. capacitance–voltage characteristics. Such a comparison has allowed to receive some additional data concerning interface, as an example, the thickness of the tunnel–thin insulating layer.