

УДК 621.382.2

ПАРАМЕТРЫ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНОК С КРЕМНИЕВОЙ (ГЕРМАНИЕВОЙ) ПОДЛОЖКОЙ¹

© 2006 М.Б. Шалимова, А.С. Михайлова, С.В. Шерстнева²

Представлены результаты исследования электрофизических характеристик структур металл-туннельный диэлектрик-полупроводник. В качестве диэлектрика использовались фториды эрбия, тулия, гадолиния. Определены параметры границы раздела, такие как энергетическое распределение плотности поверхностных состояний, значение поверхностного потенциала.

Необходимость использования новых изолирующих материалов с высокой диэлектрической проницаемостью приводит к поиску и исследованию новых перспективных диэлектриков, обладающих разнообразными функциональными свойствами. К таким диэлектрикам относятся фториды редкоземельных элементов, которые характеризуются значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon = 8 \div 14$ и удельного сопротивления $\rho = 6 \cdot 10^{12} \div 10^{13}$ Ом·см, обладают химической, термической и радиационной стойкостью. В настоящей работе исследовались параметры границы раздела кремния с фторидами редкоземельных элементов. МДП-диоды получались путем электроформовки МДП-структур с толстым диэлектриком. В основе метода электроформовки лежит явление переключения проводимости, которое наблюдается в пленках фторидов редкоземельных элементов под действием сильных электрических полей [1]. В течение этого процесса в диэлектрической пленке создается локальная неомогенная область с высокой проводимостью площадью $A = 3 \div 80$ мкм².

1. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные образцы изготавливались на подложках монокристаллического кремния *n*- или *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 5 Ом·см и 4,5 Ом·см соответственно. В качестве германиевых подложек использовался монокристаллический германий *n*-типа с удельным со-

¹Представлена доктором технических наук профессором А.Н. Комовым.

²Шалимова Маргарита Борисовна (shalim@ssu.samara.ru), Михайлова Анна Сергеевна, Шерстнева Светлана Викторовна, кафедра электроники твердого тела Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

противлением 3 Ом·см и 2 Ом·см. Пленка фторида редкоземельного элемента наносилась термическим распылением в вакууме. На подложку методом термического распыления в вакууме наносился слой фторида редкоземельного элемента толщиной $d = 0,3 \div 0,4$ мкм. На фторид редкоземельного элемента наносились алюминиевые контакты диаметром $0,5 \div 0,7$ мм.

Под действием электрического поля напряженностью 10^8 В/м в однородной исходной пленке создается проводящий канал, который в основном состоит из металлической фазы. При этом, как показали исследования, в области канала проводимости на границе с кремнием формируется слой туннельного диэлектрика толщиной $d_t = 1 \div 3$ нм. Слой туннельного диэлектрика образуется при достаточно большой величине нагрузочного сопротивления ($R > 1,5$ кОм), включенного в цепь последовательно с образцом. Таким методом получались структуры Al-ErF₃-Si, Al-TmF₃-Si, Al-GdF₃-Si. Исследования показали, что при отсутствии внешнего приложенного напряжения на поверхности полупроводника реализуется состояние обеднения основными носителями заряда для всех исследованных структур.

Зависимость поверхностного потенциала от напряжения для $U \leq U_0 - 2kT/q$ (U_0 — напряжение плоских зон) рассчитывалось по формуле

$$\varphi_s(U) = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{A^* A T^2}{J(U)} \right] - \frac{E_c - F}{q}. \quad (1.1)$$

Расчеты показали, что φ_s и U для большинства исследованных МДП-диодов связаны прямо пропорциональной зависимостью, при этом выполняется соотношение [2]

$$|\varphi_s(U)| \cong \frac{U_0 - U}{b} = |\varphi_{s0}| - \frac{U}{b}, \quad (1.2)$$

$$b = 1 + \frac{q^2 N_t^0}{C_D}, \quad (1.3)$$

где N_t — плотность однозарядных поверхностных состояний, $C_D = \frac{\epsilon_0 \epsilon_D}{d}$ — емкость диэлектрика единичной площади. В данном случае условием прямо пропорциональной зависимости является $N_t = N_t^0 = \text{const}$, т.е. поверхностные состояния распределены с постоянной плотностью в заданном интервале энергий. На рис. 1–2 представлены зависимости поверхностного потенциала от напряжения МДП-структур на основе германия и кремния.

Из соотношения (1.2) следует, что экстраполяция данных прямых до $U = 0$ позволяет получить значение поверхностного потенциала φ_{s0} . Значения φ_{s0} представлены в таблице. Для некоторых образцов обнаруживалось наличие на экспериментальных вольт-амперных характеристиках туннельных МДП-диодов участков с нелинейной зависимостью $\ln J$ от U и, следовательно, нелинейной зависимостью φ_s от U . В этом случае выражение (1.2) справедливо только в узком интервале напряжений, в котором уровень Ферми на поверхности полупроводника пересекает поверхностные

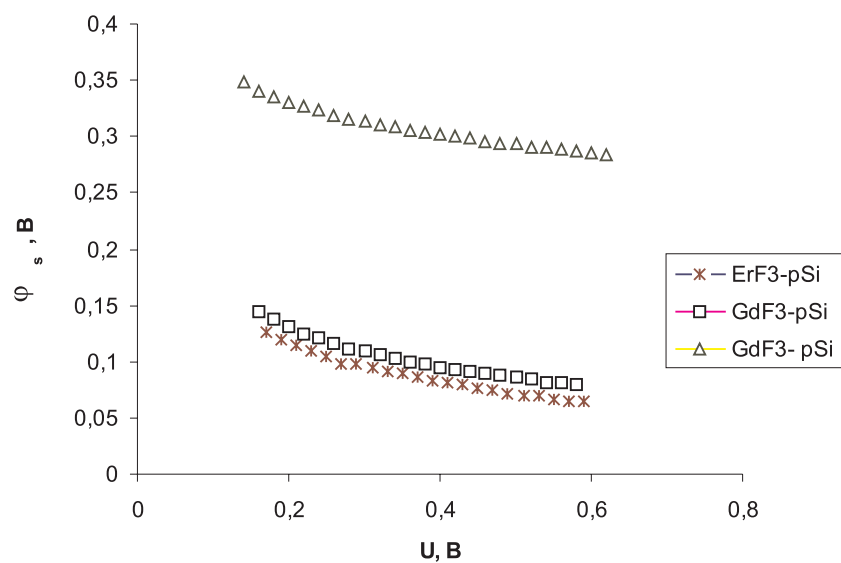


Рис. 1. Зависимость поверхностного потенциала от напряжения МДП-структур на подложках кремния *p*-типа проводимости

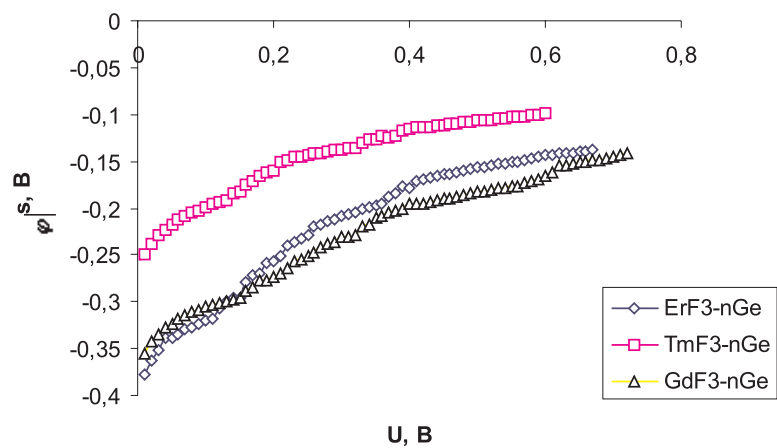


Рис. 2. Зависимость поверхностного потенциала от напряжения МДП-структуры с подложкой германия *n*-типа проводимости (ГМО-3)

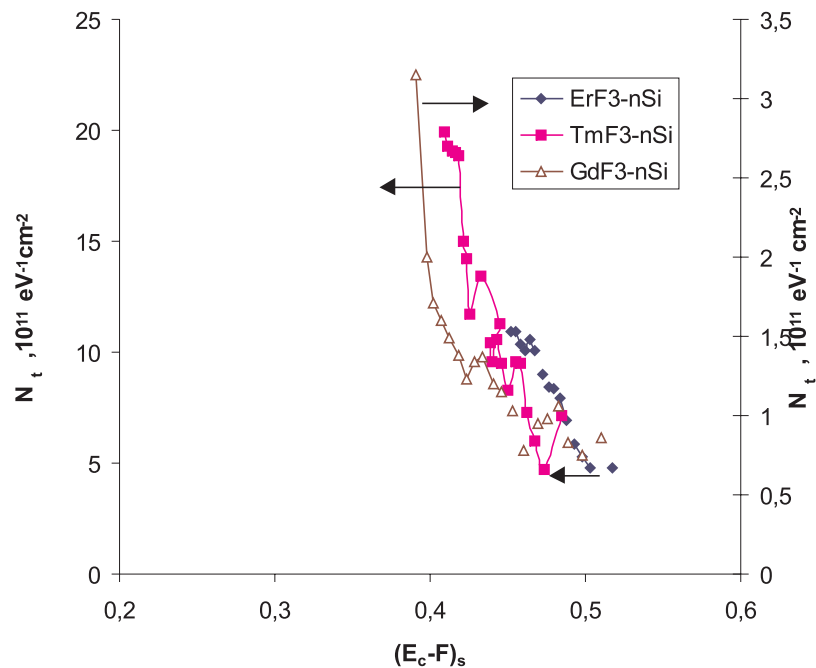


Рис. 3. Зависимость поверхностного потенциала от напряжения МДП-структур на подложках кремния p -типа проводимости

состояния с постоянной плотностью. Из (1.2) следует, что $\frac{d\varphi_s}{dU} = -b^{-1}$. С учетом выражения (1.3) будем иметь

$$N_t = \frac{\epsilon_0 \epsilon_D}{q^2 d} \left\{ \frac{q}{kT} \left[\frac{d(\ln J)}{dU} \right]^{-1} - 1 \right\}. \quad (1.4)$$

На рис. 3–4 представлены кривые распределения плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне полупроводника, рассчитанные по формуле (1.4). В этом случае на поверхности кремния, покрытой слоем фторида редкоземельного элемента, реализуется распределение N_t по энергиям с минимумом вблизи середины запрещенной зоны.

Значения N_t , рассчитанные по формуле (1.4), а также другие параметры полупроводниковых структур представлены в таблице.

Здесь ϵ_D — диэлектрическая проницаемость фторида редкоземельного элемента; d — толщина диэлектрика; N_t — энергетическая плотность поверхностных состояний; φ_s^0 — значение поверхностного потенциала.

Аналогичный результат для кремниевых структур с пленками фторидов церия, неодима, диспрозия получен в работе [3]. Для поверхности германия, покрытой слоем фторида РЗЭ, получено меньшее значение

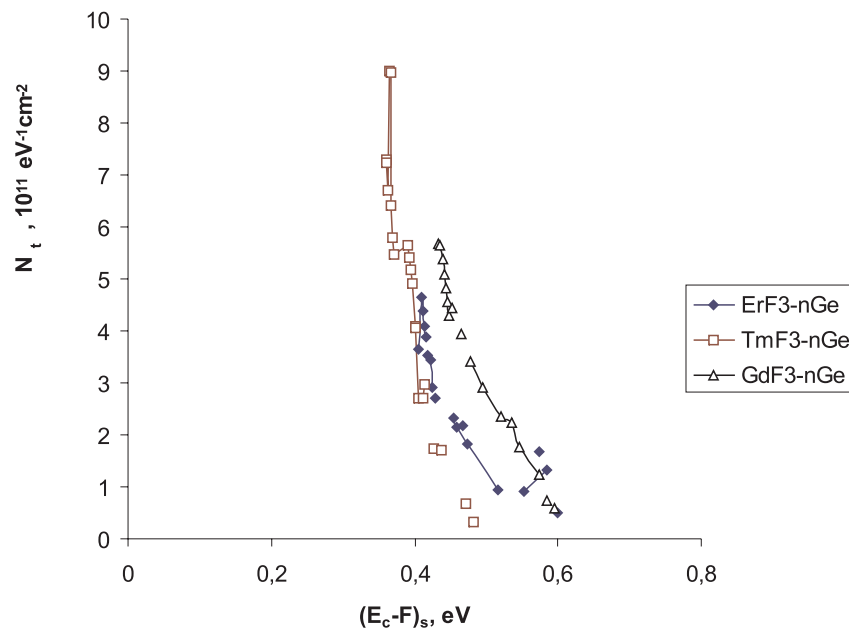


Рис. 4. Распределение плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне германия *n*-типа проводимости

Таблица 1

**Параметры границы раздела фторсодержащих пленок
с кремниевой (германиевой) подложкой**

Структура	ϵ_D	d, мкм	$N_t, 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$	ϕ_s^0, V
<i>GdF</i> ₃ -nSi (КЭФ-5)	14	1,48	0,7	0,35
<i>GdF</i> ₃ -pSi (КДБ-4,5)	14	1,0	1,19	0,37
<i>GdF</i> ₃ -nGe (ГМО-3)	14	1,12	0,556	0,35
<i>GdF</i> ₃ -nGe (ГЭС-2)	14	1,05	0,22	0,35
<i>ErF</i> ₃ -nSi (КЭФ-5)	15	0,45	4	0,27
<i>ErF</i> ₃ -pSi (КДБ-4,5)	15	1,59	3,23	0,17
<i>ErF</i> ₃ -nGe (ГМО-3)	15	0,84	0,49	0,37
<i>ErF</i> ₃ -nGe (ГЭС-2)	15	0,39	0,789	0,42
<i>TmF</i> ₃ -nSi (КЭФ-5)	7	0,18	4,1	0,19
<i>TmF</i> ₃ -pSi (КДБ-4,5)	7	-	3,33	0,22
<i>TmF</i> ₃ -nGe (ГМО-3)	7	0,64	0,32	0,25
<i>TmF</i> ₃ -nGe (ГЭС-2)	7	0,6	0,36	0,23

плотности поверхностных состояний, чем для поверхности кремния. Результаты работы указывают на возможность практического получения и исследования толстых и туннельно-тонких диэлектрических слоев фторидов редкоземельных элементов, изготовленных в одном технологическом цикле на одной подложке. Это позволяет определить такие параметры границы раздела, как энергетическое распределение плотности поверхностных состояний, значение поверхностного потенциала. Полученная малая величина плотности поверхностных состояний обеспечивает возможность использования данных слоев для пассивации поверхности кремния и германия.

Литература

- [1] Рожков, В.А. Электрофизические свойства переключающих слоистых структур на основе пленочных фторидов редкоземельных элементов / В.А.Рожков, М.Б.Шалимова // ФТП. – 1998. – № 11(sms32). – С. 1349–1353.
- [2] Гаман, В.И. Физика полупроводниковых приборов / В.И.Гаман. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
- [3] Шалимова, М.Б. Параметры границы раздела и механизмы протекания тока в структурах металл-туннельно тонкий фторид церия (неодима, диспрозия)-кремний / М.Б.Шалимова, Н.В.Щербакова // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 2. – С. 27–33.

Поступила в редакцию 10/II/2006;

в окончательном варианте — 15/IV/2006.

INTERFACE CHARACTERISTICS OF FLUORIDE CONTAINED FILMS WITH SILICON (GERMANIUM) SUBSTRATES³

© 2006 М.Б. Shalimova, A.S. Mikhailova, S.V. Sherstneva⁴

In the paper the electrical properties of metal-tunnel-thin isolator-silicon (MIS) structures with erbium, thulium, gadolinium fluorides as insulating layers are studied. The characteristics of interfaces (energy distribution of the density of surface states, surface potential) are determined.

Paper received 10/II/2006.

Paper accepted 15/IV/2006.

³Communicated by Dr. Tech.Sci. Prof. A.N.Komov.

⁴Shalimova Margarita Borisovna (shalim@ssu.samara.ru), Mikhailova Anna Sergeevna, Sherstneva Svetlana Victorovna, Dept. of Solid State Electronics, Samara State University, Samara, 443011, Russia.