

ВАХ СТРУКТУР Al/SiO₂<InSb>/Si/Al: ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ОТЖИГА

В. Ю. Леоненко^{1,2}, А. К. Федотов¹, И. Е. Тыщенко³, Ю. А. Федотова¹

¹⁾ Научно-исследовательское учреждение "Институт ядерных проблем" Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, 9, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: akf1942@gmail.com

²⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: vs.4550817@gmail.com

³⁾ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, просп. Лаврентьева, 13, Новосибирск, Россия, e-mail: tys@isp.nsc.ru

Изучена зависимость плотности тока J от электрического поля смещения E и температуры T в структурах Al/Si/SiO₂<InSb>/Al до и после отжига при температурах 800 and 1100 °С, в слой SiO₂ которых были имплантированы ионы Sb⁺ and In⁺. Показано, что при $0 < E < 6.7 \times 10^7$ В/м и $2 < T < 300$ К кривые $J(E, T)$ для всех образцов подчиняются омическому закону. В целом при $T < 40$ К кривые $J(E, T)$ описываются моделью токов, ограниченных объемным зарядом (ТООЗ) Мотта-Герни, которая учитывает наличие моноэнергетических ловушек в середине запрещенной зоны SiO₂ слоя. При $T > 40$ К поведение кривых $J(E, T)$ соответствует модели ТООЗ Марка-Хельффриха, учитывающей перезарядку состояний ловушек в экспоненциальных «хвостах» локализованных состояний в разрешенных зонах SiO₂. Полученные результаты обсуждаются с точки зрения перемещения уровня Ферми по локализованным состояниям в энергетических зонах слоя SiO₂<InSb> под действием температуры, поля и эволюции дефектов структуры вследствие отжига.

Ключевые слова: структуры металл-диэлектрик-полупроводник; технология кремний-на-изоляторе; слои SiO₂; нанокристаллы InSb; токи, ограниченные объемным зарядом.

I-V CHARACTERISTICS IN Al/SiO₂<InSb>/Si/Al STRUCTURES: EVOLUTION OF DEFECTS DUE TO ANNEALING

V. Yu. Leonenko^{1,2}, A. K. Fedotov¹, I. E. Tyschenko³, J. A. Fedotova¹

¹⁾ Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, 220006 Minsk, Bobruiskaya str. 11, Belarus

²⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

³⁾ A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Lavrentyev av. 13, 630090 Novosibirsk, Russia
Corresponding author: V. Yu. Leonenko (vs.4550817@gmail.com)

The dependences of the current density J on the bias electric field E and temperature T in the Al/Si/SiO₂<InSb>/Al structures after implantation of Sb⁺ and In⁺ ions into the SiO₂ layer have been studied before and after post-implantation annealing at 800 and 1100 °С. It was shown that at $0 < E < 6.7 \times 10^7$ V/m and $2 < T < 300$ K, the $J(E, T)$ curves for all the samples obey the ohmic law. In general, at $T < 40$ K, the $J(E, T)$ curves are described by the Mott-Gurney space charge-limited current (SCLC) model, which considers the presence of

monoenergetic traps in the mid-band gap of the SiO₂ layer. At $T > 40$ K, the behavior of the $J(E, T)$ curves corresponds to the Mark-Helfrich SCLC model considering the trap states recharging in the exponential “tails” of localized states of SiO₂ allowed bands. The results obtained are discussed from the perspective of the Fermi level shift over localized states in the SiO₂<InSb> layer energy bands under subsection of temperature, field, and the evolution of structural defects due to annealing.

Key words: metal-insulator-semiconductor structures; silicon-on-insulator technology; SiO₂ layers; InSb nanocrystals; space charge-limited current.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития кремниевой электроники является создание гибридных структур путем внедрения в кремний или SiO₂ кластеров разных веществ. В этом смысле, получение структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) со слоем SiO₂, содержащим полученные ионно-лучевым синтезом нанокристаллы (НК) InSb, представляет интерес для современной электроники и оптоэлектроники. Имплантация ионов In⁺ и Sb⁺ в слой SiO₂ сопровождается возникновением большого количества точечных дефектов (ионы примесей, междоузельные атомы и вакансии). Постимплантационный отжиг должен приводить к зарождению фазы InSb, в процессе которого могут также формироваться разного рода дефектные комплексы (например, на основе кислородных вакансий) [1]. Как НК InSb, так и дефекты могут обеспечивать донорные и акцепторные уровни энергии в запрещенной зоне SiO₂, а также приводить к поляризации оксида кремния, изменяя механизмы проводимости в слоях SiO₂ [2–4] и диэлектрические характеристики затвора МДП-устройств.

В данной работе феноменологически изучено влияние эволюции дефектов структуры под действием имплантации и отжига на вольтамперные характеристики (ВАХ) структур Al/Si/ SiO₂<InSb>/Al, в слое SiO₂ которых формируются НК InSb различного размера и распределения, полученные ионно-лучевым синтезом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучаемые в работе МДП-структуры типа Al/Si/SiO₂<InSb>/Al были изготовлены методом DeleCut [5]. В термически выращенные на подложках моно-Si *p*-типа слой SiO₂ толщиной 280 нм имплантировались ионы Sb⁺ и In⁺ с энергией 200 кэВ и дозами $8.0 \cdot 10^{15}$ см⁻². На имплантированный оксид методом водородного переноса был перенесен покрывающий слой Si с целью предотвращения испарения In. Постимплантационный отжиг структур проводился при температурах $T_a = 800$ и 1100 °С в течение 30 минут в парах N₂. В результате в захороненном слое SiO₂ формировались НК InSb, структура и геометрические параметры которых зависели от T_a [5, 6]. После удаления покрывающего слоя Si в кипящем водном растворе NH₃ на изготовленных структурах изучались поперечные ВАХ в диапазоне электрических полей от $-7 \cdot 10^7$ до $7 \cdot 10^7$ В/м при температурах 2 – 300 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены измеренные при $3 < T < 40$ К прямые ветви зависимостей плотности тока J от величины электрического поля E до и после отжига при $T = T_a$. Из рисунка видны две области электрических полей, в которых линейные части $\lg J(\lg E)$ имеют различные наклоны: омические в области $E < 1 \cdot 10^7$ В/м во всем интервале $2 < T < 300$ К и более крутые при $E > 1 \cdot 10^7$ В/м, и величина E перехода от омического к неомическому закону зависит от T_a . В работе [3] было показано, что

при $T < 40$ К высокополевой вклад в $J(E)$ имеет квадратичный вид, что соответствует модели Мотта-Герни для ТООЗ с учетом моноэнергетических локализованных состояний:

$$J(E) = ne_m E + \frac{9}{8} \kappa \kappa_0 m \Theta \frac{E^2}{d}, \quad (1)$$

где Θ – отношение свободных носителей заряда (НЗ) к полному их числу, n и μ – концентрация и подвижность равновесных свободных НЗ, соответственно, e – заряд электрона, κ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, κ – диэлектрическая проницаемость изолятора, d – толщина слоя диэлектрика.

При температурах выше 40 К (рис. 2) тангенс угла наклона линейных участков зависимостей $\lg J(\lg E)$ в полях $E > 2 \times 10^7$ В/м существенно превышает 2, иногда достигая 12 (рис. 3а). Последнее было приписано в [7] наличию ловушек для подвижных НЗ с экспоненциальным распределением их плотности состояний по энергии, что описывается моделью ТООЗ Марка-Хельфриха:

$$J(E) = e_m N_C \left[\frac{\kappa \kappa_0 m}{e N_i (m+1)} \right] \left[\frac{2m+1}{m+1} \right] \frac{E^m}{d^{2m}}, \quad (2)$$

где показатель степени $m = (k_B T_i / k_B T) = (T_i / T)$ определяется шириной $\epsilon_{ch} = k_B T_i$ области занятых экспоненциальных ловушек, нормированной на тепловую энергии решетки $k_B T$, N_C – эффективная плотность состояний в разрешенной зоне, а N_i – концентрация ловушек в «хвосте» разрешенных зон. Область ϵ_{ch} представлена на рис. 3, б заштрихованной областью.

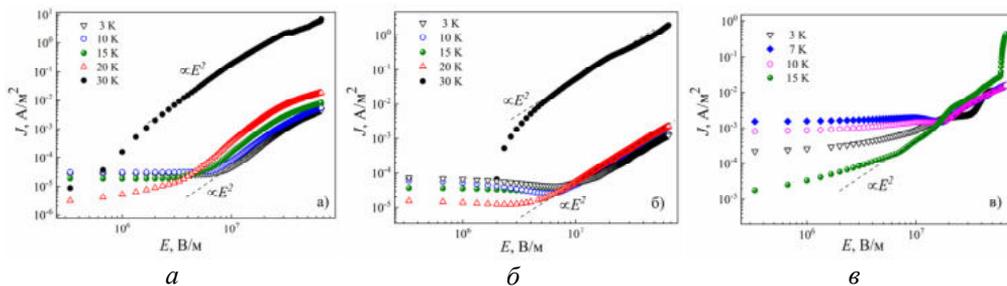


Рис. 1. Прямая ветвь зависимости плотности тока J от электрического поля E , измеренной при температурах 3–15 К для образцов: а – неотожженных; б – отоженных при 800 °С; в – отоженных при 1100 °С

Из рисунка 3, а следует, что при низких температурах $1/k_B T \approx 70 \text{ эВ}^{-1}$ ($T < 150$ К) показатель m достигает насыщения независимо от типа образцов и направления поля. Лишь при температурах выше 150 К диапазон энергий ϵ_{ch} ловушек, занимаемых электронами, становится зависимым от температуры. При увеличении T_a возрастают значения m , и их разброс для прямой и обратной ветви растет, а значение E , после которого m начинает превышать 2, уменьшается с увеличением T_a (пунктирные линии на рис. 2). Первое означает уширение энергетического интервала занятых локализованных состояний с ростом температуры отжига имплантированных слоев SiO_2 . Ход зависимости $m(T)$ на рис. 3, а для всех исследуемых образцов указывает на сдвиг

уровня Ферми к краю «хвоста» локализованных состояний на рис. 3, б с повышением температуры. Такое поведение $\epsilon_F(T)$ можно объяснить наличием двух типов НЗ, инжектированных в неупорядоченный слой SiO_2 , содержащий дефекты и НК InSb: дырки из подложки Si *p*-типа и электронов из Al контактов.

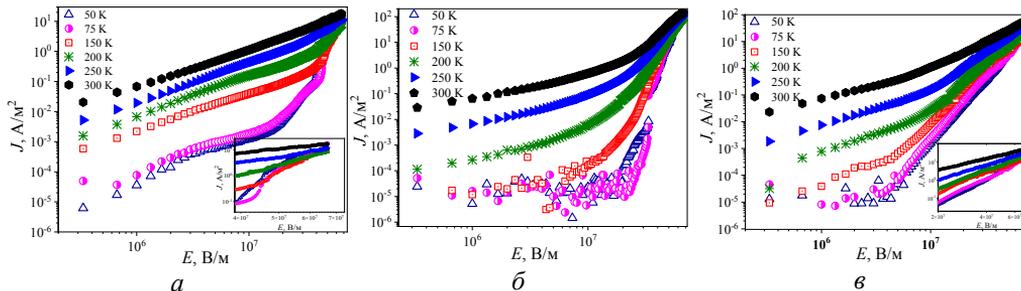


Рис. 2. Обратные J – E характеристики, измеренные при температурах 50–300 К: *a* – для неотожженных образцов; *б* – образцов, отожженных при 800 °С; *в* – образцов, отожженных при 1100 °С.

На вставках показаны соответствующие кривые J – E в полях $E > 2 \times 10^7$ В/м

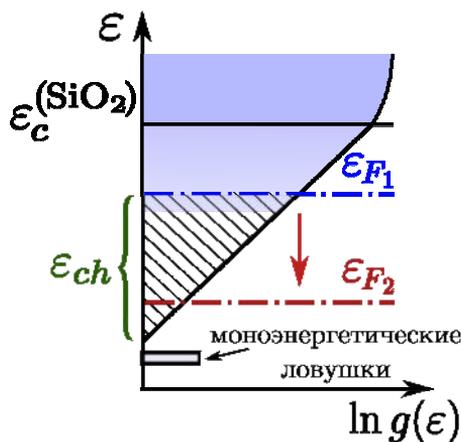
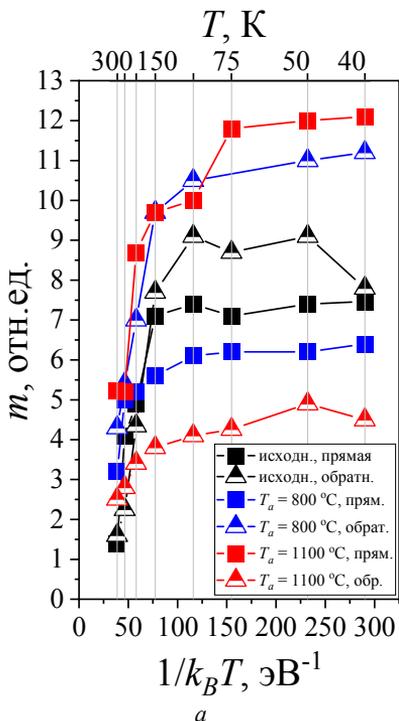


Рис. 3. Температурная зависимость $m = (k_B T_i / k_B T) = (T_i / T)$ (а) в формуле (2) и схематическое изображение распределения моноэнергетических и экспоненциальных локализованных состояний в слое SiO_2 (б), где $\epsilon_c^{(\text{SiO}_2)}$ – край подвижности *C*-зоны SiO_2 , ϵ_{F1} и ϵ_{F2} – положения уровня Ферми при 40 К $< T < 150$ К и 150 К $< T < 300$ К соответственно

Следующая из описанных выше зависимостей $J(E, T)$ и представленная на рис. 4 эволюция структуры дефектов под действием имплантации SiO_2 и отжига структур $\text{Me}/\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Me}$, влияющая на механизмы ТООЗ, феноменологически (качественно) может быть описана следующим образом:

1. В середине запрещенной зоны исходной (до имплантации) структуры в слое SiO_2 присутствуют только энергетические уровни, соответствующие собственным дефектам оксида, в виде моно-энергетических ловушек в центре запрещенной зоны и на интерфейсах Me/SiO_2 и Si/SiO_2 , а также небольшого их количества в «хвостах» локализованных состояний, которые обусловлены неидеальностью его структуры (рис. 4, а).

2. В неотожженном образце «хвосты» локализованных состояний на краях разрешенных V - и C -зон SiO_2 уширяются за счет индуцированных имплантацией In^+ и Sb^+ точечных дефектов (рис. 4, б).

3. После среднетемпературного постимплантационного отжига ($T_a = 800^\circ\text{C}$) плотность и ширина распределения локализованных состояний в экспоненциальных «хвостах» уменьшается за счет отжига точечных дефектов и образования мелких НК InSb диаметром ≈ 5 нм [8], которое сопровождается возникновением дополнительных пиков вблизи центра запрещенной зоны в связи с малой шириной запрещенной зоны InSb (рис. 4, в).

4. Высокотемпературный постимплантационный отжиг ($T_a = 1100^\circ\text{C}$) приводит к упорядочиванию кристаллической решетки SiO_2 и исчезновению большинства точечных дефектов в запрещенной зоне, что приводит к дальнейшему сужению области «хвостов» локализованных состояний (рис. 4, г), и к возникновению бимодального распределения НК InSb по размерам [8] (и соответственно, по энергиям уровней в запрещенной зоне).

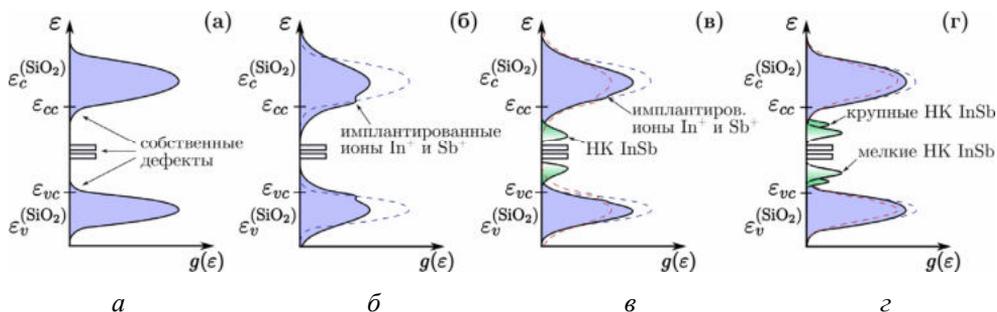


Рис. 4. Схематическое изображение распределения плотности числа состояний по энергии в слое SiO_2 : а – до имплантации; б – после имплантации; в – после отжига при $T_a = 800^\circ\text{C}$; г – после отжига при 1100°C ; ε_{vc} и ε_{cc} – края подвижности валентной зоны и зоны проводимости, соответственно

Нами предполагается, что влияние сильного электрического поля на встречный дрейф инжектированных электронов и дырок приводит к перезарядке (нейтрализации) как моноэнергетических ловушек в центре запрещенной зоны, так и экспоненциальных ловушек в «хвосте» разрешенной зоны. Это приводит к уменьшению концентрации электронов с энергиями выше уровня Ферми, что и означает сдвиг $\varepsilon_F(T)$ к

концу «хвоста» локализованных состояний, сопровождающийся уменьшением показателя m ($\epsilon_{ch}/k_B T$) с повышением температуры, как показано на рис. 3, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена феноменологическая (качественная) схема плотности числа состояний в слое SiO₂ до и поле имплантации и отжига при 800 и 1100 °С, иллюстрирующая эволюцию системы дефектов, которая определяет особенности протекания токов, ограниченных объемом зарядом. Установлено, что с ростом температуры отжига имплантированных слоев SiO₂ увеличивается энергетическая ширина занятых носителями заряда ловушек в экспоненциальных «хвостах» локализованных состояний разрешенных V- и С-зон слоя SiO₂. Предполагается, что в полях $E > 2 \times 10^7$ В/м встречный дрейф инжектированных электронов и дырок приводит к перезарядке (нейтрализации) моноэнергетических ловушек в центре запрещенной зоны и экспоненциальных ловушек в «хвосте» разрешенной зоны, что вызывает сдвиг уровня Ферми с увеличением температуры к концу «хвоста» локализованных состояний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Gritsenko, V. Atomic and Electronic Structures of Traps in Silicon Oxide and Silicon Oxynitride / V. Gritsenko, H. Wong // Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. – 2011. – Vol. 36, № 3. – P. 129–147.
2. Слабухо, В. Ю. Прыжковая проводимость в слоях SiO₂, имплантированных ионами In⁺ и Sb⁺ / В. Ю. Слабухо, А. К. Федотов, Ю. А. Федотова // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2023) : матер. 15-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 26–29 сентября 2023 г. / редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. БГУ, 2023. – С. 436–438.
3. Механизм электронной проводимости пленок SiO₂, имплантированных большими дозами ионов In⁺ и Sb⁺ / А. К. Федотов [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2023) : материалы 15-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 26–29 сент. 2023 г. / редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. БГУ, 2023. – С. 314–316.
4. Dielectric properties of nanocomposite (Cu)_x(SiO₂)_(100-x) produced by ion-beam sputtering / T. N. Koltunowicz [et al.] // J. Alloys Compd. – 2015. – Vol. 652. – P. 444–449.
5. Ion-beam synthesis of InSb nanocrystals in the buried SiO₂ layer of a silicon-on-insulator structure / I. E. Tyschenko [et al.] // Semiconductors. – 2014. – Vol. 48, № 9. – P. 1196–1201.

ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР Si/SiO₂/Si НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. И. Мухаммад, П. И. Гайдук

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: rct.muhammadAI1@bsu.by*

Обнаружено нетривиальное влияние вертикальной геометрии на величину оптического поглощения в микроструктурах p^+ -Si/SiO₂/ n^+ -Si. Установлено, что увеличение толщины подложки p^+ -Si приводит к расширению спектрального диапазона с интенсивностью поглощения выше 60%. Показано, что увеличение высоты островкового слоя приводит к нелинейному росту поглощения в диапазоне 8–17 мкм с максимумом 98% при высоте Si-островка 2000 нм. Толщина слоя SiO₂ влияет на спектр поглощения структур p^+ -Si/SiO₂/ n^+ -Si в диапазоне 10–20 мкм. Уменьшение толщины