

## ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В СЛОЯХ SiO<sub>2</sub>, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ In<sup>+</sup> И Sb<sup>+</sup>

В.Ю. Слабухо<sup>1), 2)</sup>, А.К. Федотов<sup>1)</sup>, Ю.А. Федотова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, Институт ядерных проблем,  
ул. Бобруйская 11, Минск 220006, Беларусь, julia@hep.by

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, akf1942@gmail.com

Исследована прыжковая проводимость в слоях SiO<sub>2</sub>, имплантированных ионами In<sup>+</sup> и Sb<sup>+</sup>, до и после отжига при температурах 800 и 1100 °С для создания нанокристаллов InSb. Проводимость гетероструктур Al/Si/SiO<sub>2</sub><InSb>/Al исследовались как функция электрического поля (в диапазоне 0–7·10<sup>7</sup> В/м) и температуры (в интервале 2–300 К). Установлено, что при  $T > 100$  К и в полях  $E \leq 3 \cdot 10^7$  В/м температурные зависимости проводимости  $\sigma(T)$  описываются моделью прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка. Во всем диапазоне температур и при значениях напряженности поля  $E > 3 \cdot 10^7$  В/м зависимости  $\sigma(E, T)$  описываются в рамках модели Шкловского для прыжковой проводимости в сильных электрических полях. Установлено уменьшение с ростом поля средней длины прыжка, что соответствует модели Шкловского. Полученные результаты обсуждаются с точки зрения эволюции структурных свойств имплантированных ионами пленок SiO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** ионная имплантация; SiO<sub>2</sub>; InSb; нанокристаллы; прыжковая проводимость.

## HOPPING CONDUCTIVITY IN SiO<sub>2</sub> LAYERS IMPLANTED WITH In<sup>+</sup> AND Sb<sup>+</sup> IONS

V.Yu. Slabukho<sup>1), 2)</sup>, A.K. Fedotov<sup>1)</sup>, J.A. Fedotova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,  
11 Bobruiskaya Str., 220006 Minsk, Belarus, julia@hep.by

<sup>2)</sup>Belarusian State University,  
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, akf1942@gmail.com

In this paper, we investigate the temperature and electric field dependence of the electrical conductivity  $\sigma(T, E)$  in unannealed and annealed heterostructures of the Al/Si/SiO<sub>2</sub><InSb>/Al type obtained by ion-beam synthesis. These structures containing InSb nanocrystals in SiO<sub>2</sub> layers were manufactured using 280 nm thick SiO<sub>2</sub> layer, which was grown by heating a *p*-type (100) silicon wafer with 100 mm diameter, in which In<sup>+</sup> and Sb<sup>+</sup> ions were implanted with energies of 200 keV and fluences of  $8.0 \cdot 10^{15}$  cm<sup>-2</sup>. Before the annealing, the 600 nm thick Si layers were transferred onto the ion-implanted SiO<sub>2</sub> layers. Samples were subjected to post-implantation annealing in an N<sub>2</sub> ambient at temperatures  $T_a = 800$  and  $1100$  °C for 30 min. After the annealing, the top Si layer was removed. The temperature dependences of the electrical conductivity  $\sigma(T)$  in the temperature range of 2–300 K with the applied electric fields  $E = 0 \div 7 \cdot 10^7$  V/m were obtained by numerical differentiation of the current-voltage characteristics  $j(E)$ , i.e.  $\sigma = dj/dE$  ( $j$  is the current density). It was established that the carrier transport is provided by variable range hopping (VRH) conductivity due to hopping of electrons over localized states in the SiO<sub>2</sub> layers induced during implantation of In<sup>+</sup> and Sb<sup>+</sup> ions. Above 100 K, the  $\sigma(T)$  at  $E \leq 3 \cdot 10^7$  V/m K is described by the modified Mott's model, which considers the field-assisted thermally-driven VRH regime, while at  $E > 3 \cdot 10^7$  V/m solely field-driven hopping conductivity  $\sigma(T)$  is observed in the entire temperature range, which obeys the theory of Shklovskii. The results obtained are discussed in terms of the evolution of the structural properties of ion-implanted SiO<sub>2</sub> films.

**Keywords:** ion implantation; SiO<sub>2</sub>; InSb; nanocrystals; hopping conductivity.

### Введение

Основным методом модернизации технологии создания МДП приборов для электроники является создание гибридных

структур путем внедрения в кремний или SiO<sub>2</sub> других химических элементов. В этом смысле, комбинация технологии кремний-на-изоляторе (КНИ), где в слое

SiO<sub>2</sub> содержатся полученные ионно-лучевым синтезом нанокристаллы InSb, создает новый тип структур для современной электроники и оптоэлектроники. Имплантация ионов In<sup>+</sup> и Sb<sup>+</sup> в слои SiO<sub>2</sub> сопровождается возникновением большого количества точечных дефектов (ионы примесей, междоузельные атомы и вакансии), по которым возможна прыжковая проводимость носителей заряда. В данной работе определены параметры прыжковой проводимости в слоях SiO<sub>2</sub> в зависимости от вида постимплантационного отжига.

### Методика эксперимента

Изучаемые в работе МДП-структуры типа Al/Si/SiO<sub>2</sub><InSb>/Al были изготовлены методом DeleCut, подробно описанного в [1]. Слои SiO<sub>2</sub> толщиной 280 нм были термически выращены на подложках моно-Si *p*-типа. В слои SiO<sub>2</sub> имплантировались ионы Sb<sup>+</sup> и In<sup>+</sup> с энергией 200 кэВ и дозами  $8.0 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. С целью предотвращения испарения In на имплантированный SiO<sub>2</sub> методом водородного переноса был перенесен покрывающий слой Si. Постимплантационный отжиг КНИ структур проводился при температурах  $T_{отж} = 800$  и  $1100$  °С в течение 30 минут в парах азота. В результате в пленке захороненного SiO<sub>2</sub> слоя формировались нанокристаллы (НК) InSb, структура и геометрические параметры которых зависели от  $T_{отж}$  [1, 2]. Затем покрывающий слой Si удалялся в кипящем водном растворе аммиака.

С целью изучения механизмов прыжковой проводимости в слоях SiO<sub>2</sub> с дефектами и НК InSb, после удаления слоя Si были изготовлены МДП-структуры путем приваривания искровой сваркой фольги из Al толщиной 50 мкм с обеих сторон образца. Затем к слоям Al с помощью ультразвуковой пайки индия были прикреплены медные проволоки, которые распаивались в измерительном зонде. Температурные зависимости проводимости  $\sigma(T)$  в диапазоне температур 2 – 300 К при электрических полях  $E = 0 \div 7 \cdot 10^7$  В/м были получены численным дифференцированием

вольтамперных характеристик  $j(E)$  (ВАХ), т.е.  $\sigma = dj/dE$ , где  $j$  – плотность тока.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости  $\sigma(T)$  при  $E = const$  в координатах Мотта. Из кривых 1-4 на рис. 1а следует, что выше 100 К зависимости  $Lg \sigma - (1/T)^{1/4}$  для исходного образца линейаризуются в полях  $E < 4 \cdot 10^7$  В/м. Последнее указывает на реализацию в нем моттовского прыжкового механизма переноса носителей заряда типа VRH по дефектам, образованным в слое SiO<sub>2</sub> в процессе имплантации. После отжига при 800 °С этот механизм также проявляется, однако температурная область его реализации начинает сильно зависеть от величины  $E$  (см. кривые 1-3 на рис. 1б). При более высокой  $T_{отж}$  механизм Мотта полностью исчезает (рис. 1в), видимо, вследствие отжига точечных дефектов при формировании НК InSb.

Отметим, что модель Мотта не учитывает вклад электрического поля в параметры прыжковой проводимости. По этой причине для более адекватного описания зависимостей  $\sigma(T, E)$  был использован подход, предложенный в [3]. В соответствии с ним выделяют два режима прыжковой проводимости. В области малых полей ( $E = (1-3) \cdot 10^7$  В/м) рассматривается VRH режим для термически стимулированной прыжковой проводимости, который описывается законом:

$$\sigma(T, E) = \sigma_1 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} \exp\left(\frac{0.17r(T)eE}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $\sigma_1$  – константа,  $T_0$  – характеристическая температура в модели Мотта,  $r$  – средняя длина прыжка электронов. Параметры  $T_0$  и  $r$  позволяют вычислить плотность состояний на уровне Ферми  $N(E_F) = \frac{19}{k_B T_0 \xi^3}$  [3] ( $\xi$  – характерная длина спада волновой функции электрона,  $\xi = \frac{8}{3} r \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{4}}$ ), по которым могут осуществляться прыжки. Из соот-

ношения (1) следует, что с ростом  $E$  величина  $r$  уменьшается.

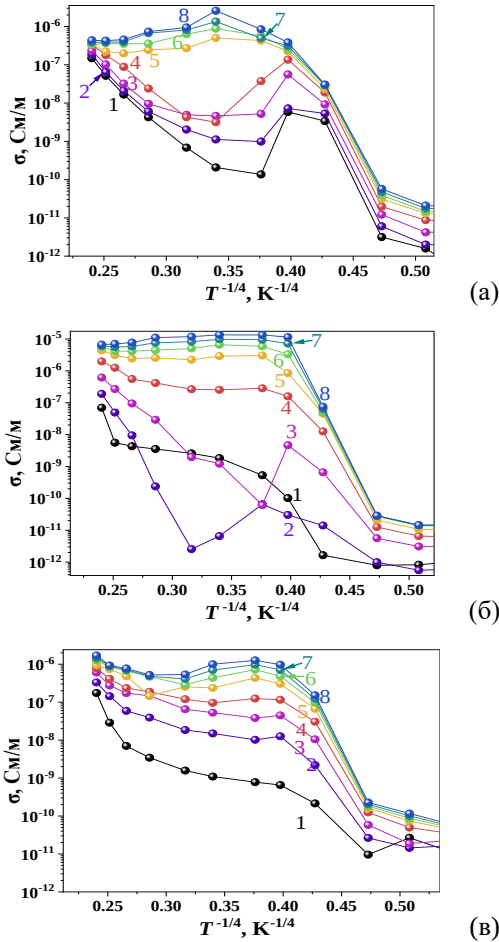


Рис. 1. Зависимость удельной электропроводности от температуры  $\sigma(T)$  в координатах Мотта в исследованных МДП структурах до (а) и после отжига при температуре 800 °С (б) и 1100 °С (в). Значения напряженности электрического поля  $E$  (В/м): 1 –  $1 \cdot 10^7$ , 2 –  $2 \cdot 10^7$ , 3 –  $3 \cdot 10^7$ , 4 –  $4 \cdot 10^7$ , 5 –  $5 \cdot 10^7$ , 6 –  $5.5 \cdot 10^7$ , 7 –  $6 \cdot 10^7$ , 8 –  $7 \cdot 10^7$

Обнаружено, что наименьшие значения  $r$  (8.0 – 6.2 нм) наблюдаются для образца после  $T_{\text{отж}} = 800$  °С, а наибольшие (62 – 24 нм) – после  $T_{\text{отж}} = 1100$  °С. Для исходного образца получаем  $N(E_F) \approx 2 \cdot 10^{18}$  эВ $^{-1}$ см $^{-3}$ , после  $T_{\text{отж}} = 800$  °С имеем  $N(E_F) \approx (2-7) \cdot 10^{18}$  эВ $^{-1}$ см $^{-3}$ , а после  $T_{\text{отж}} = 1100$  °С –  $N(E_F)$  снижается до  $9 \cdot 10^{15}$  эВ $^{-1}$ см $^{-3}$ .

При  $E > 3 \cdot 10^7$  В/м реализуется лишь полевой вклад в VRH режим (модель Шкловского [4]):

$$\sigma(E) = \sigma_2 \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_2$  – константа,  $E_0$  – параметр, позволяющий оценить длину спада волновой функции  $\xi$ . Установлено, что величина  $\xi$  минимальна после  $T_{\text{отж}} = 800$  °С и максимальна после  $T_{\text{отж}} = 1100$  °С. Другими словами, оптимальные условия для прыжковой проводимости создаются после промежуточной  $T_{\text{отж}}$ , когда часть дефектов, внесенных имплантацией, аннигилировала, но не все ионы приняли участие в образовании НК InSb.

## Заключение

Установлено, что в слоях SiO $_2$ , имплантированных ионами Sb $^{+}$  и In $^{+}$ , реализуется VRH режим прыжковой проводимости. При этом выше 100 К в полях  $E \leq 3 \cdot 10^7$  В/м проводимость описывается модифицированной моделью Мотта, учитывающей влияние электрического поля. При  $E > 3 \cdot 10^7$  В/м наблюдается прыжковая проводимость, стимулированная полем, которая подчиняется закону Шкловского. Докazано, что оптимальные условия для прыжковой проводимости создаются в образце, отожженном при 800 °С.

## Библиографические ссылки

1. Tyschenko I.E., Voelskow M., Cherkov A.G., Popov V.P. Ion-beam synthesis of InSb nanocrystals in the buried SiO $_2$  layer of a silicon-on-insulator structure. *Semiconductors* 2014; 48(9): 1228-1233.
2. Zukowski P., Koltunowicz T.N., Czarnacka K., Fedotov A.K., Tyschenko I.E. Carrier transport and dielectric permittivity of SiO $_2$  films containing ion-beam synthesized InSb nanocrystals. *Journal of Alloys and Compounds* 2020; 846: 156482.
3. Cheah C.Y., Kaiser A. Variable-range hopping transport: Crossovers from temperature dependence to electric field dependence in disordered carbon materials. *International Journal of Nanotechnology* 2014; 11: 412-418.
4. Шкловский Б.И. Прыжковая проводимость полупроводников в сильном электрическом поле. *Физика и техника полупроводников* 1972; 6(12): 2335-2340.