

**СЕКЦИЯ «ФИЗИКА»**

**ПОДСЕКЦИЯ «СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ»**

**Поверхностный ток р-п переходов на основе GaAs,  
пассивированных атомами серы**

**Богдан О.В.<sup>1</sup>**

*Аспирантка*

*Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, физический факультет,  
Одесса, Украина*

*E-mail: [emetse@rambler.ru](mailto:emetse@rambler.ru)*

Исследовано влияние пассивации атомами серы и последующего хранения в атмосфере гелия на вольт-амперные характеристики (ВАХ) прямого и обратного токов р-п переходов на основе GaAs. Пассивация р-п переходов проводилась в 30% водном растворе Na<sub>2</sub>S с разной продолжительностью.

ВАХ прямого тока исходных образцов, измеренные в области токов от 1<sup>μ</sup> А до 1 мА, имели вид  $I(V) = I_0 \exp(qV/n_i kT)$ , где  $I_0$  – константа;  $q$  – заряд электрона;  $n_i$  – коэффициент неидеальности, причем  $n_i \approx 2$ ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура. Такие ВАХ можно объяснить рекомбинацией носителей заряда на глубоких уровнях в р-п переходах в объеме и на поверхности [1]. В области малых напряжений наблюдался участок ВАХ с коэффициентом неидеальности  $n_i > 2$ . Этот участок ВАХ соответствует туннельной рекомбинации на глубоких центрах с участием фононов [1].

На ВАХ, измеренных после пассивации, в области низких уровней инжекции также наблюдался участок избыточного тока с  $n_i > 2$ . Хранение пассивированных р-п переходов в атмосфере гелия при комнатной температуре существенно уменьшало избыточный прямой ток, а также обратный ток. Можно предположить, что эти токи имеют одну и ту же природу. Как известно [1], избыточный ток в GaAs р-п структурах локализован на неоднородностях р-п переходов, соответствующих сужениям обедненного слоя. Изменения избыточного прямого тока и обратного тока при длительном хранении были идентичны. Поэтому можно сделать вывод, что прямой избыточный и обратный токи в исследованных р-п структурах локализованы на одних и тех же неоднородностях.

Обнаружено, что при длительном хранении после пассивации также уменьшалась рекомбинационная компонента тока, которая характеризуется коэффициентом неидеальности  $n_i \approx 2$ . Это свидетельствует, что при хранении уменьшалась концентрация рекомбинационных центров  $N_R$  на поверхности р-п структуры.

Уменьшение избыточного тока при хранении после пассивации было намного сильнее, чем рекомбинационного тока. Этот эффект можно объяснить с учетом туннельной рекомбинации носителей заряда, которая ответственна за избыточный ток. Вероятность туннелирования экспоненциально зависит от ширины барьера. Поэтому небольшое уменьшение концентрации электрически активных центров в неоднородностях р-п переходов ведет к существенному уменьшению избыточного тока. При хранении пассивированных р-п переходов в атмосфере гелия исчезают неоднородности на поверхности, которые отвечают за избыточный ток.

Основными дефектами, которые приводят к увеличению избыточного тока в р-п переходах на основе полупроводников группы А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>, являются дислокации. Атомы серы являются донорами в GaAs. Поэтому можно сделать вывод, что при длительном хранении атомы серы на поверхности диффундируют вдоль дислокаций и компенсируют их заряд.

**Литература**

1. Ptashchenko A. A., Ptashchenko F. A. Tunnel surface recombination in optoelectronic device modelling // Proc. SPIE. – 1997. – V. 3182. – P. 145 – 149.

Автор выражает признательность профессору, д. ф.-м. н. Птащенко А.А. за помощь в подготовке тезисов.

## Влияние окружающей атмосферы на поверхностный ток кремниевых р-п переходов

*Емец Е.В.<sup>1</sup>*

*Аспирантка*

*Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова, физический*

*факультет, Одесса, Украина*

*E-mail: [emetse@rambler.ru](mailto:emetse@rambler.ru)*

Изучено влияние паров аммиака, воды и этилового спирта на стационарные вольт-амперные характеристики (ВАХ), а также на кинетику поверхностных токов в р-п переходах на основе кремния. Парциальные давления воды, этилена и аммиака составляли 2000 Па, 5000Па и 50 Па, соответственно.

Прямая ветвь ВАХ исследованных р-п переходов, измеренная в сухом воздухе, в области токов от 10нА до 1 мА соответствовала выражению

$$I(V) = I_0(T) \exp(qV / n_i kT), \quad (1)$$

где  $I_0(T)$  – функция температуры, не зависящая от напряжения;  $q$  – заряд электрона;  $n_i$  – коэффициент неидеальности ВАХ (для сухого воздуха  $n_i=1,1$ );  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура р-п перехода.

Установлено, что пары воды, этилена и аммиака повышают как прямой, так и обратный ток р-п переходов. Коэффициент неидеальности ВАХ прямого тока, измеренных в парах воды, этилена и аммиака, был выше, чем в сухом воздухе, и составлял 1,13, 2,1 и 2,6, соответственно. Это свидетельствует, что увеличение прямого тока при воздействии данных паров приводит к увеличению интенсивности поверхностной рекомбинации носителей заряда вблизи р-п перехода. Данный эффект можно объяснить тем, что адсорбированные и впоследствии ионизированные молекулы донорного газа формируют электрическое поле, которое изгибает с- и v-зоны приповерхностного слоя и способствует повышению концентрации электронов вблизи поверхности в р-области. Чувствительность к парам воды, этилена и аммиака при прямом смещении 0,25 В оценивалась, как

$$S = \Delta I / \Delta P, \quad (2)$$

где  $\Delta I$  – изменение тока при изменении парциального давления паров на  $\Delta P$ , и составляла 6, 11, 11000 нА/кПа, соответственно.

При обратном смещении газовая чувствительность р-п структур была намного выше и составляла (при  $V = -3$  В) для паров воды, этилена и аммиака 70, 800, 20000 нА/кПа, соответственно. ВАХ обратного тока в данных парах имели продолжительные линейные участки. Поэтому газовую чувствительность изученных р-п структур при обратном смещении можно объяснить образованием проводящего канала, который закорачивает р-п переход. Данный канал с электронной проводимостью образуется в р-области под действием электрического поля адсорбированных положительных ионов.

Ограничение чувствительности кремниевых р-п структур как газовых сенсоров при прямом смещении можно объяснить экспоненциальным увеличением инжекционного тока с ростом прямого смещения и экранированием инжектированными электронами и дырками электрического поля, образованного адсорбированными ионами.

Кремниевые р-п переходы могут быть использованы как сенсоры указанных паров. Время отклика данных сенсоров не превышало 60 секунд при комнатной температуре при прямом и обратном смещениях.

<sup>1</sup> Автор выражает признательность профессору, д. ф.-м. н. Птащенко А.А. за помощь в подготовке тезисов.

## Исследование особенностей транспортных характеристик одноэлектронного молекулярного транзистора

Малинин В.А.<sup>2</sup>

Студент

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
**физический факультет, Москва, Россия**  
E-mail: malinin-vladimir@yandex.ru

В настоящее время проводятся исследования по созданию молекулярных электронных устройств с базовым элементом размером менее 5 нм. В наноструктурах такого масштаба определяющую роль играют квантовые и кулоновские эффекты, такие как коррелированное туннелирование электронов и размерное квантование. Эти устройства неизбежно должны быть построены на новых принципах функционирования. Среди перспективных устройств можно выделить молекулярные одноэлектронные устройства или устройства со слабой связью. Базовым элементом таких устройств является молекулярный одноэлектронный транзистор (MSET), исследованию транспортных свойств которого и посвящена данная работа.

На основе метода имитационного моделирования и метода решения системы кинетических уравнений нами были исследованы особенности вольтамперных и сигнальных характеристик MSET. Нами было показано, что соответствующие характеристики имеют ярко выраженную ступенчатую структуру. Была получена система уравнений, которая описывает положение токовых ступеней в зависимости от туннельного напряжения, напряжения управляющего электрода, от расстояния между энергетическими уровнями в молекуле, от соотношения емкостей туннельного перехода и от отношения проводимости туннельных переходов. Нами было показано, что значение туннельного тока на ступенях определяется линейной комбинацией темпов туннелирования, причем коэффициенты линейной комбинации являются рациональными дробями. Был определен способ вычисления таких коэффициентов, который позволяет наглядно описать картину туннельного транспорта и определить вклад каждого энергетического уровня. Полученная методика вычисления туннельного тока в молекулярном транзисторе на основе рациональных дробей имеет первостепенное значение на пути решения обратной задачи по расшифровке транспортных характеристик молекулярного одноэлектронного транзистора, полученных в результате экспериментальных измерений, и построении эффективного энергетического спектра молекулы (острова транзистора) через которую осуществляется транспорт.

### Литература

1. К.К.Лихарев, Т.Клаесон, Одноэлектроника, В мире науки 8 (1992).
2. Э. Бурштейн, С. Лундквист, Туннельные явления в твердых телах, Мир, Москва (1973).
3. Солдатов Е. С. et al. Одноэлектронный транзистор на основе одиночной кластерной молекулы при комнатной температуре// Письма в ЖЭТФ, 1996, 64, 510-514.
4. С.П.Губин, Н.А.Катаева, В.В.Колесов, Е.С.Солдатов, А.С.Трифонов, Г.Б.Хомутов, В.В.Шорохов, Нанофазные материалы в электронике - вещества, технология, устройства, Нелинейный Мир, 1-2, Т-3, (2005).
5. К. К. Likharev, Electronics below 10 nm, in Nano and Giga Challenges in Microelectronics. Amsterdam: Elsevier, (2003).
6. V. V. Shorokhov et al. The method for the determination of electrical self-capacitance of the atomic and molecular scale objects, Micro- and Nanoelectronics 2007.

<sup>2</sup>

Автор выражает признательность к.ф.-м.н. Шорохову В.В. за помощь в подготовке тезисов.

**Технология изготовления и исследование субмикронных SIS и NIS джозефсоновских переходов****Парамонов Максим Евгеньевич***Студент**Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова**II курс, физико-химический факультет, Москва, Россия**E-mail: [ff-max@narod.ru](mailto:ff-max@narod.ru)*

В современной микроэлектронике всё большее внимание уделяется сверхпроводниковым структурам, открывшим в этой области новые горизонты развития. Большую роль сыграли микрочипы, построенные на базе структур SIS и NIS, обеспечивающих джозефсоновский переход.

Джозефсоновский переход технологически представляет из себя тонкую (толщиной в несколько нанометров) пленку изолятора, оксида алюминия  $Al_2O_3$ , проложенную между двумя слоями сверхпроводящего ниобия. В силу так называемого "эффекта близости" два сверхпроводника (S) воздействуют друг друга на небольшом расстоянии, вследствие чего от одного сверхпроводника к другому может течь небольшой электрический сверхток, даже если на пути находится нормальный, не сверхпроводящий металл (N) или изолятор (I). Если же величина тока превышает некий предел (называемый критическим током  $J_c$ ), сверхпроводимость разрушается. Данный переход является аналогом p-n полупроводникового перехода. Из двух последовательно включенных джозефсоновских переходов строится компаратор - сверхпроводниковый аналог транзистора, из включенных параллельно - интерферометр, элемент, функционально близкий к Д-триггеру.

В работе рассматривается подробный план по изготовлению высококачественного, субмикронного Nb/ $AlO_x$ /Nb джозефсоновского перехода. Также рассматриваются возможные проблемы при изготовлении данных структур различными методами. Nb/ $AlO_x$ /Nb – переход показывает наилучшую воспроизводимость и незначительную утечку тока, по сравнению с остальными переходами. Устойчивость и надёжность джозефсоновского перехода улучшается в результате применения искусственного тунелирования барьеров.

**Транспортные свойства и фотопроводимость наноструктурированных пленок PbTe(In)****Черничкин В.И.***Студент**Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия**E-mail: [vlchern@yandex.ru](mailto:vlchern@yandex.ru)*

Узкощелевые полупроводники на основе теллурида свинца используются в оптоэлектронике в качестве источников и приемников ИК-излучения. Ширина запрещенной зоны в PbTe при 0К составляет 190мэВ. Легирование теллурида свинца индием приводит к стабилизации положения уровня Ферми на 70мэВ выше дна зоны проводимости, что обеспечивает высокую однородность электрофизических свойств.

Пленки PbTe(In) осаждались из паровой фазы на охлажденную стеклянную подложку. Толщина пленок составляла 1мкм. Исследования микроструктуры проведены методами атомной силовой и сканирующей электронной микроскопии. Пленки имели структуру столбиков, ориентированных перпендикулярно плоскости подложки. Изменение температуры подложки в пределах от -120 до 35°C позволило варьировать средний размер кристаллитов (диаметр столбиков) в интервале 60–150нм. Некоторые из пленок отжигались в атмосфере кислорода при температурах 300°C и 350°C.

Температурные и частотные зависимости компонент полного импеданса пленок исследовались при температурах от 4.2К до 300К в частотном диапазоне электрических

полей 20Гц–1МГц в темновых условиях и при подсветке. Анализ полученных импеданс-спектров проведен в рамках представления эквивалентных схем. Показано, что проводимость изученных пленок определяется двумя механизмами: транспортом носителей заряда по инверсионным каналам на поверхности зерен и активацией (или туннелированием) через барьеры на межзеренных границах. Определены параметры (сопротивления и емкости), соответствующие каждому из этих механизмов.

В области температур ниже 150К во всех структурах наблюдалось явление задержанной фотопроводимости. Кинетика фотопроводимости исследована при температурах 4.2 и 77К.

Показано, что суперпозиция двух различных механизмов проводимости в пленках PbTe(In) приводит к немонотонной частотной зависимости амплитуды фотоотклика, причем величина пика и соответствующая ему частота зависят от размера кристаллитов и режима окисления. Таким образом, в переменном электрическом поле реализуются оптимальные условия для наблюдения максимальной фотопроводимости.

### Двухщелевая сверхпроводимость и леггеттовские плазменные резонансы в LaOFeAs

Шаныгина Т.Е.<sup>1</sup>, Кузьмичёв С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Студент (специалист), <sup>2</sup>младший научный сотрудник

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Физический факультет, Москва, Россия

E-mail: [eldereth@list.ru](mailto:eldereth@list.ru)

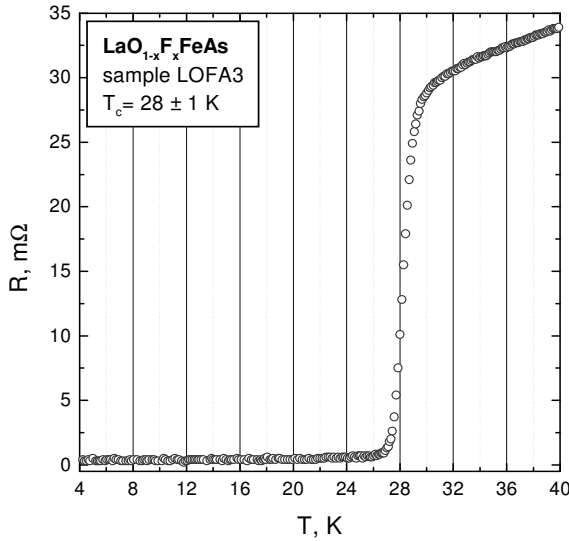
Кристаллическая структура соединения LaOFeAs представляет собой стопку чередующихся слоёв La-O и Fe-As. Сильный изотопический эффект по железу (<sup>56</sup>Fe замещался на <sup>54</sup>Fe), обнаруженный в работе [1], указывает на фононный характер механизма спаривания. Теоретические расчёты, проведённые в работе [2], показали, что поверхность Ферми LaOFeAs состоит из вложенных друг в друга, слегка гофрированных в с-направлении цилиндров: две электронные поверхности, расположенные в углах зоны Бриллюэна, и две дырочные в центре зоны Бриллюэна. Основной вклад в плотность состояний вносят двумерные носители заряда – дырки, локализованные в плоскостях FeAs.

В нашей лаборатории изучались поликристаллические образцы LaO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>FeAs, допированные фтором, с T<sub>C</sub> = 27.1 ÷ 28.1 К. Температурная зависимость сопротивления образца с T<sub>C</sub> = 28 К приведена на рис. 1. В качестве экспериментального метода использовалась андреевская спектроскопия; микроконтакты SnS-типа в образцах были получены с помощью техники «break-junction». Наши исследования подтверждают, что в LaOFeAs реализуется двухщелевая сверхпроводимость: на производных вольтамперных характеристиках SnS-контактов мы наблюдали две воспроизводящиеся субгармонические щелевые структуры на смещениях  $V = 2\Delta/en$ ,  $n = 1, 2, \dots$ . На dI(V)/dV-характеристике SnS-контакта, приведённой на рис. 2, хорошо видны две серии минимумов, соответствующие сверхпроводящим щелям  $\Delta_L$  и  $\Delta_S$  и связанные с эффектом многократных андреевских отражений. Были найдены значения для двух щелей:  $\Delta_L = 5,5 \pm 1$  meV,  $\Delta_S = 1 \pm 0,2$  meV. Полученные отношения  $2\Delta_L/kT_C = 3,5 \div 5,5$  и  $2\Delta_S/kT_C = 0,6 \div 1,1$  находятся в качественном согласии с результатами теоретической работы [3]. Производная ВАХ стопочного контакта, снятая по температуре, представлена на рис. 3.

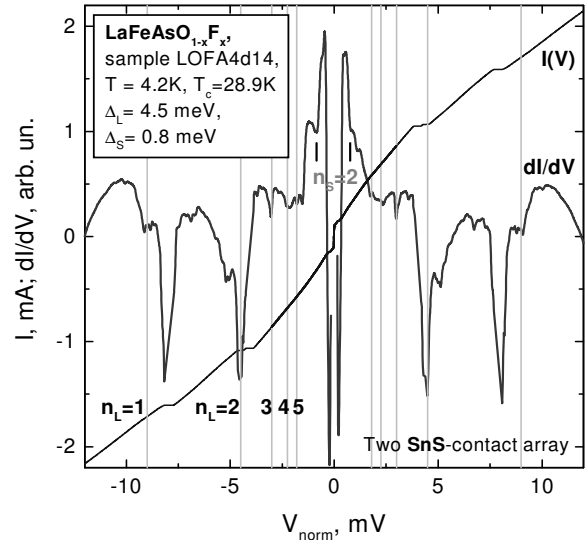
Поведение малой щели  $\Delta_S(T)$  в LaOFeAs, как и в MgB<sub>2</sub>, заметно отличается от БКШ-типа. Также было установлено, что обе щели закрываются при одной и той же локальной критической температуре. Появление слабой, тянущейся вплоть до T<sub>C</sub>, зависимости малой щели от температуры, так называемого «хвоста», по-видимому, указывает на наличие внутреннего эффекта близости между двумя сверхпроводящими конденсатами. Температурная зависимость малой щели в LaO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>FeAs приведена на рис. 4.

На наиболее качественных андреевских контактах при T = 4,2 К наблюдались расщепления особенностей, составляющих субгармоническую щелевую структуру обеих

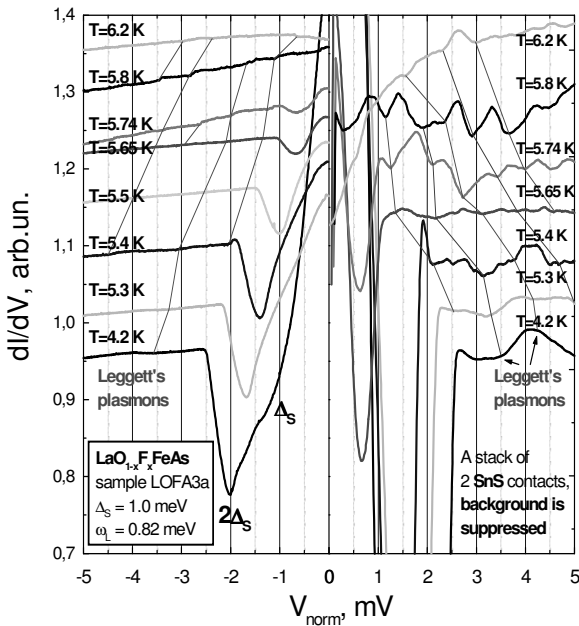
сверхпроводящих щелей  $\Delta_L$  и  $\Delta_S$ . Такой дублетный характер можно объяснить существованием на поверхности Ферми двух электронных и двух дырочных зон и соответствующим им парам сверхпроводящих щелей (см. рис. 2).



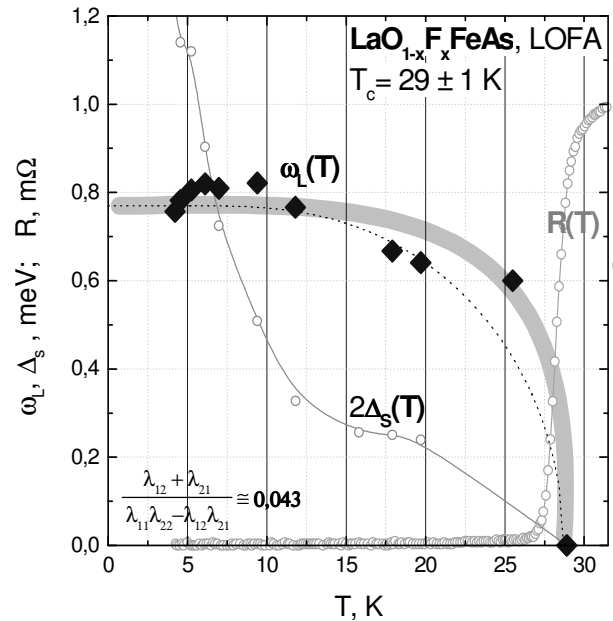
**Рис. 1.** Зависимость сопротивления от температуры для образца  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$  с  $T_C = 28$  К.



**Рис. 2.**  $dI(V)/dV$ -характеристика SnS-контакта  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$  с локальной  $T_C = 28,9$  К при  $T = 4,2$  К. Штрихами отмечены положения минимумов, соответствующих  $\Delta_L$  и  $\Delta_S$ .



**Рис. 3.**  $dI(V)/dV$ -характеристика стопочного контакта на образце  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ , снятая по температуре.



**Рис. 4.** Температурные зависимости удвоенной малой щели, энергии леггетовских плазмонов и сопротивления для образца  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$  (контакта 3b) с  $T_C = 29$  К. Сплошная линия приведена для удобства рассмотрения, а пунктир соответствует зависимости БКШ-типа.

В 1966 году Э. Леггетт теоретически предсказал, что в двухщелевых сверхпроводниках могут существовать коллективные возбуждения, связанные с малыми флуктуациями разности фаз двух сверхпроводящих конденсатов, – леггеттовские плазмоны [4]. На  $dI(V)/dV$ -характеристиках мы также наблюдали дополнительную субгармоническую щелевую структуру на смещениях  $V_{n,m} = (2\Delta + m\omega_0)/2ne$ , которая, по-видимому, соответствует процессам эмиссии низкочастотных леггеттовских плазмонов в процессе многократных андреевских отражений. Влияние температуры на тонкую структуру  $dI(V)/dV$ -характеристик, связанную с эмиссией

неравновесных леггеттовских плазмонов, показано на рис. 3. Установлено, что энергия леггеттовской моды в LaOFeAs  $\omega_0 = 0,8 \text{ meV}$ , что значительно меньше  $2\Delta_S$  и не противоречит условию наблюдения в эксперименте испускания плазмонов, указанному в теоретической работе [4]. Температурные зависимости удвоенной малой щели, энергии леггеттовских плазмонов и сопротивления для образца  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$  (контакта 3b) с  $T_C = 29 \text{ K}$  показаны на рис. 4.

### Литература

1. R.H. Liu et al., arXiv.org:0810.2694 (2008).
2. A.I. Coldea et al., arXiv.org:0807.4890 (2008).
3. F. Marsiglio, J.E. Hirsch, arXiv.org:0804.0002 (2008).
4. A. J. Leggett, Prog. Theor. Phys. 36 (1966) 901.

### Туннельный поверхностный ток в $p^+$ - $p$ - $n$ переходах на основе GaAs–AlGaAs, обусловленный адсорбцией молекул аммиака

**Шугарова В.В.**

*Соискатель физического факультета*

*Одесский национальный университет им. И.И.Мечникова, Одесса, Украина*

*E-mail: [varyak@ukr.net](mailto:varyak@ukr.net)*

Исследовано влияние паров аммиака на вольт-амперные характеристики (ВАХ) прямого и обратного токов и на кинетику поверхностных токов в  $p^+$ - $p$ - $n$  переходах на основе GaAs-AlGaAs с вырожденной  $p^+$ -областью.

В области токов  $10 \text{ nA} - 1 \text{ mA}$  ВАХ прямого тока  $p^+$ - $p$ - $n$  переходов, измеренных на сухом воздухе, соответствовали классическому выражению

$$I(V) = I_0(T) \exp(qV / nkT), \quad (1)$$

где  $I_0(T)$  – функция температуры, не зависящая от напряжения;  $q$  – заряд электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура. При этом коэффициент неидеальности  $n \approx 2$ . Такой вид ВАХ свидетельствует, что в данных гетероструктурах прямой ток обусловлен рекомбинацией электронов и дырок на глубоких уровнях.

Результаты измерений показали, что адсорбция молекул  $\text{NH}_3$  существенно увеличивает прямой ток при низких напряжениях смещения, а также обратный ток. ВАХ дополнительного поверхностного тока, обусловленного адсорбцией молекул  $\text{NH}_3$ , в  $p^+$ - $p$ - $n$  переходах не соответствовали выражению (1). При низком напряжении ВАХ дополнительного тока имели линейные участки, что может быть объяснено формированием поверхностного проводящего канала, который закорачивает  $p$ - $n$  переход. Дополнительный поверхностный ток линейно зависел от парциального давления паров аммиака. При достаточно высоких напряжениях характеристики имели сверхлинейный участок, который связан с двойной инжекцией носителей заряда в поверхностный проводящий канал.

$p^+$ - $p$ - $n$  переходы с вырожденной  $p^+$ -областью имели более высокую газовую чувствительность при обратном смещении, чем при прямом смещении. Этот эффект объясняется туннельной инжекцией электронов в проводящий канал из вырожденной  $p^+$ -области при обратном смещении.

При достаточно больших концентрациях аммиака в окружающей атмосфере на ВАХ прямого тока  $p^+$ - $p$ - $n$  переходов на основе GaAs–AlGaAs обнаружен максимум, характерный для туннельных диодов. Это свидетельствует о том, что при адсорбции молекул аммиака в данной гетероструктуре можно получить поверхностный канал с вырожденными электронами.

Изменения прямого и обратного токов в  $p$ - $n$  переходах под действием паров  $\text{NH}_3$  были обратимыми, что свидетельствует о физическом (а не химическом) механизме адсорбции молекул аммиака, а также о возможности использования данных гетероструктур как газовых сенсоров. Преимущество  $p^+$ - $p$ - $n$  переходов как сенсоров паров аммиака - высокая

чувствительность при обратном смещении, работа при комнатной температуре и низкий фоновый ток.

#### **Литература**

1. Птащенко А. А., Артеменко Е. С., Птащенко Ф. А. (2001) Влияние газовой среды на поверхностный ток в р-п гетероструктурах на основе GaAs-AlGaAs // Физика и химия твердого тела. Т. 2, № 3, с. 481 – 485.
2. Русских Д. В., Рембеза С. И. и др. (2008) Высокочувствительный полупроводниковый датчик газовых сред // Sensors & Systems. № 8, с. 14 – 16.