

## РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Электропроводность гетероструктур на основе линейно-цепочечного углерода**

А. Ф. Александров<sup>1</sup>, О. А. Стрелецкий<sup>1,a</sup>, В. В. Хвостов<sup>1,b</sup>, А. В. Фаустов<sup>2</sup>,  
Н. Д. Новиков<sup>1</sup>, А. А. Зайцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики. Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, д. 78.

E-mail: <sup>a</sup>enchanter@land.ru, <sup>b</sup>vkho@yandex.ru

Статья поступила 05.06.2012, подписана в печать 20.06.2012.

Приводятся результаты исследования проводимости гетероструктур на основе ДУ ЛЦУ типа Al-ЛЦУ-Al и p-Si-ЛЦУ-Al. Продемонстрировано, что структура Al-ЛЦУ-Al имеет нелинейный омический контакт с высотой потенциального барьера  $\sim 0.7$  эВ. Показано, что в гетероструктуре p-Si-ЛЦУ-Al реализуется надбарьерный механизм инжекции электронов в ЛЦУ (по Шоттки) в прямом направлении и туннельный эффект (по модели Фаулера–Нордгейма) в обратном.

**Ключевые слова:** двумерно-упорядоченный линейно-цепочечный углерод, гетероструктуры, контактные явления, инжекционная проводимость.

УДК: 539.21:547.31. PACS: 73.50.-h.

**Введение**

Логика развития физики низкоразмерных систем ставит фундаментальные задачи поиска новых материалов и структур на их основе и детального изучения их электрофизических свойств с целью создания приборов нового поколения на новых принципах работы. Поэтому чрезвычайно актуальны исследования, направленные на создание альтернативных материалов и устройств на их основе, способных обеспечить дальнейший рост производительности и интеграции электронных приборов. В связи с этим особый интерес представляют низкоразмерные формы углерода, такие как фуллерены, нанотрубки, графен и т. п. Например, в работах [1–5] приведены примеры диодных и транзисторных структур на основе полупроводниковых нанотрубок. В этих работах применение нанотрубок основано на использовании высоких транспортных свойств электронов в направлении оси нанотрубки. Еще более необычные транспортные характеристики можно ожидать в одномерной атомной цепочке [6].

В настоящей статье приводятся результаты исследования гетероструктур на основе двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУ ЛЦУ) [7]. Структура ДУ ЛЦУ представляет собой параллельные цепочки атомов углерода с  $sp^1$ -гибридизацией валентных связей, образующих гексагональные плотно упакованные слои. Углеродные цепочки ориентированы нормально по отношению к подложке и поверхности пленки. Одномерный характер структуры ДУ ЛЦУ определяет высокую анизотропию электрической проводимости (вдоль и поперек цепочек). Электрическая проводимость вдоль цепочек на шесть порядков выше, чем в перпендикулярном направлении. По своим электрофизическим свойствам пленки ДУ ЛЦУ явля-

ются полупроводником с шириной запрещенной зоны  $E_g = 0.8 - 1.5$  эВ [8]. Тонкие пленки ДУ ЛЦУ получают холодным методом импульсно-дугового ионно-стимулированного осаждения.

Целью настоящей работы было исследование возможности создания на основе пленок ДУ ЛЦУ нелинейных элементов электроники. Задачей исследования, результаты которого описаны в настоящей статье, являлось изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) следующих гетероструктур — металл-ЛЦУ-металл и полупроводник-ЛЦУ-металл.

**1. Описание эксперимента**

Осаждение углеродных пленок двумерно упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУ ЛЦУ) производилось на модернизированной вакуумной установке УРМ 3.279.070 [7]. Измерения электропроводности структур проводились в автоматическом режиме на стенде, схематически изображенном на рис. 1. Использовалась 16-разрядная плата NI PCI-6229 с дискретностью до 1 мВ. В работе стенда используется один

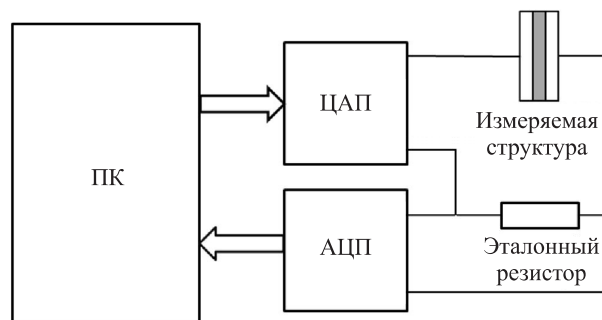


Рис. 1. Схематическое изображение измерительного стенда

аналоговый вход (измерение падения напряжения на сопротивлении нагрузки) и один аналоговый выход (генератор пилообразного напряжения). На сопротивление структуры ( $R_x$ ) и эталонный резистор ( $R_y$ ) подается напряжение  $V$  с цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) измеряет падение напряжения на эталонном сопротивлении ( $V_y$ ), что позволяет рассчитать ток в цепи  $I = V_y/R_y$ . Напряжение на структуре определяется по закону Кирхгофа как  $V_x = V - IV_y$ .

## 2. Полученные результаты

Контакт металл–полупроводник или диэлектрик может быть выпрямляющим, если при контакте возникает запирающий барьер между металлом и полупроводником и омическим, если нет барьера. Характеристики таких гетеропереходов определяются параметрами энергетических диаграмм как металла, так и полупроводника (диэлектрика). В связи с этим для установления механизма протекания тока через контакты металл–пленка ЛЦУ сначала были проведены исследования структуры Al–ЛЦУ–Al. Напыление пленок Al и ЛЦУ проводилось без нарушения вакуумных условий, что исключало окисление поверхности Al. Толщина пленки ЛЦУ составляла 200 нм. На рис. 2 (слева) приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) структуры Al–ЛЦУ–Al в прямом и обратном направлении. Как следует из симметричного вида ВАХ, контакт Al–ЛЦУ является омическим. Нелинейность ВАХ свидетельствует о наличии потенциального барьера на границе раздела металл-углерод. Так как работа выхода Al (4.25 эВ) близка к положению уровня Ферми в середине запрещенной зоны беспримесного ЛЦУ [8], то при контакте перераспределения зарядов не происходит, и данный контакт является нейтральным. Тогда нелинейность ВАХ обусловлена величиной потенциального барьера, образованного уровнем Ферми Al и дном зоны проводимости ЛЦУ с высотой, равной половине ширины запрещенной зоны ЛЦУ. В этом случае ток через структуру определяется механизмом Шоттки, связан-

ным с надбарьерной эмиссией:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi - e^{3/2}\sqrt{E}}{kT}\right),$$

где  $\phi$  — высота барьера, а  $E$  — напряженность электрического поля, приложенного к структуре, и ВАХ должна спрямляться в координатах  $\ln(J) \sim U^{1/2}$ .

ВАХ в этих координатах представлена на рис. 2 справа. Верхняя кривая соответствует отрицательным напряжениям, а нижняя — положительным. Различие между кривыми связано с разной высотой барьера контактов. Аппроксимация прямых к  $U = 0$  дает разницу в 0.02 эВ. Рассчитанная по известным параметрам (толщина пленки ЛЦУ, площадь контактов) и подгоночному параметру  $\phi$  (высота барьера) ВАХ представлена на рис. 2 пунктиром. Прекрасное соответствие эксперименту достигается при высоте барьера  $0.7 \pm 0.02$  эВ. Это значение соответствует ширине запрещенной зоны 1.4 эВ, что совпадает с результатами оптических измерений и теоретических расчетов.

Исследования гетероперехода p-Si–ЛЦУ–Al проводилось для пленки толщиной 20 нм. Полученная ВАХ представлена на рис. 3 сплошной линией. Как видно, ВАХ исследуемой структуры имеет ярко выраженный диодный вид. В прямом направлении (быстрый рост тока) порог открывания диода составляет примерно 0.5 В, в обратном направлении увеличение тока наблюдается при напряжении  $\sim 2$  В. При прямом напряжении более 5 В ВАХ имеет линейный вид (по закону Ома) с наклоном, соответствующим сопротивлению 3000 Ом. Это означает, что эквивалентная схема контакта представляет собой последовательное включение контактов p-Si–ЛЦУ–Al и сопротивления пластины кремния. После вычитания сопротивления p-Si была получена реальная ВАХ исследуемых контактов, показанная на рисунке точками. Полученная кривая имеет типичный для выпрямляющих контактов и переходов экспоненциальный вид ВАХ. В общем случае возможны три механизма переноса зарядов в диодных структурах: диффузионно-дрейфовый механизм (механизм Шокли), надбарьерная эмиссия или инжекция (эффект Шоттки)

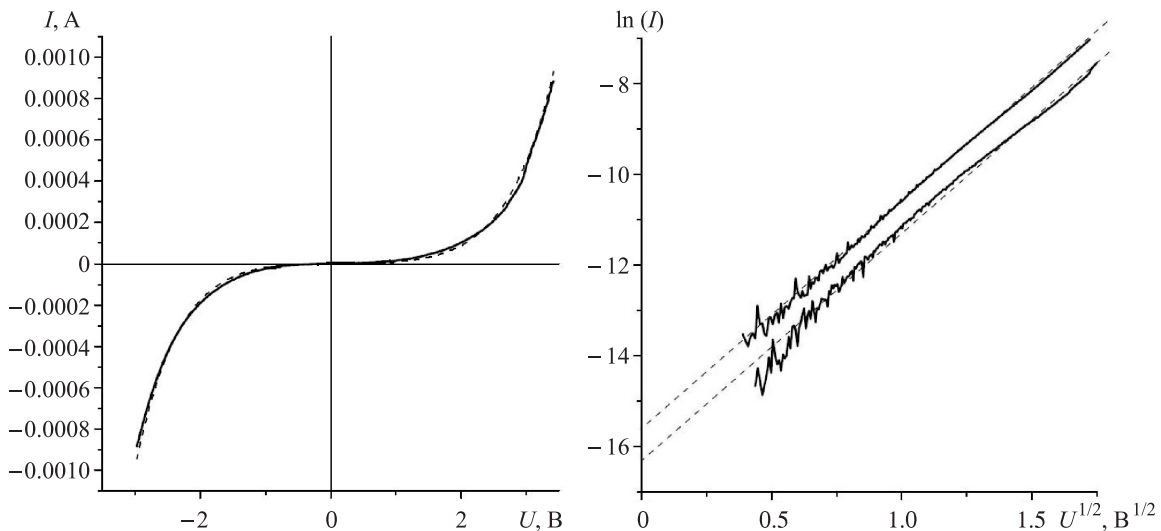


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика структуры Al–ЛЦУ–Al

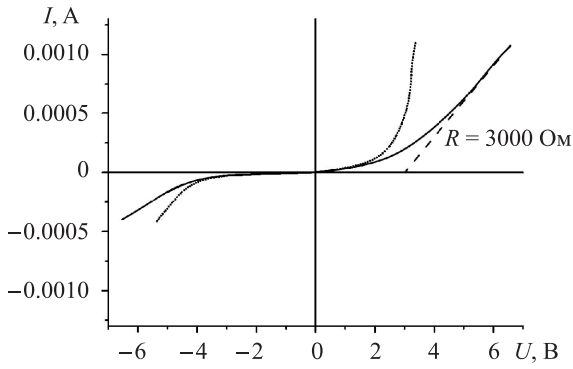


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика структуры p-Si-углерод-Al

и туннелирование (механизм Фаулера-Нордгейма). Для определения механизма переноса заряда следует спрямить ВАХ в соответствующих координатах.

Рассмотрим каждый механизм в отдельности.

Механизм Шокли реализуется в полупроводниковых диодных структурах с высокой концентрацией электронов, проявляется в  $p-n$ -переходах при напряженности электрического поля внутри перехода  $< 10^3$  В/см, и спрямляется в координатах  $(\ln(J), U)$ .

Механизм надбарьерной термоэмиссии по Шоттки проявляется при характерных напряженностях поля  $\sim 10^5$  В/см, и спрямляется в координатах  $(\ln(J), U^{1/2})$ .

Туннельный механизм Фаулера-Нордгейма (пробой Зинера) требует высокой напряженности электрического поля  $> 10^7$  В/см, и спрямляется в координатах  $(\ln(J/U^2), 1/U)$ .

При толщине пленки ЛЦУ 20 нм характерные напряженности поля в структуре составляют  $10^5 - 10^7$  В/см, поэтому первый механизм не реализуется.

Для определения механизма проводимости исследуемой структуры полученная ВАХ была построена в координатах Шоттки и Фаулера-Нордгейма и приведена на рис. 4 справа соответственно вверх и вниз. Как видно из рисунка, в прямом направлении ВАХ превосходно спрямляется в координатах Шоттки до напряжения 2 В. Выше 2 В ток растет быстрее, чем следует из уравнения Шоттки, что связано с дополнительным вкладом туннельного механизма при высоких полях. Проводимость в обратном направлении не спрямляется во всем диапазоне напряжений. Отрицательная часть ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма приведена на нижнем рисунке, на котором хорошо видно спрямление при напряжениях выше 4 В.

В правой части рисунка представлена энергетическая диаграмма, построенная по известным экспериментальным данным. Так как уровни Ферми ЛЦУ и Al совпадают, на контакте ЛЦУ-Al перераспределение зарядов не происходит и границы зон проводимости и валентной не искривляются. Уровни Ферми ЛЦУ и p-Si до контакта отличаются примерно на 0.7 эВ, поэтому в кремнии вблизи контакта возникает объемный заряд, приводящий к искривлению уровней. Поскольку ширина запрещенной зоны ЛЦУ больше, чем у кремния, уровень дна зоны проводимости испытывает разрыв  $\sim 0.25$  эВ. При этом в гетероструктуре между p-Si и Al возникает внутреннее электрическое поле (рис. 4, справа вверх).

В случае прямого смещения внешнее электрическое поле ( $U$ ) направлено противоположно внутреннему, что уменьшает потенциальный барьер между Al и ЛЦУ и увеличивает ток инжекции (рис. 4, справа в центре). В обратном направлении внешнее поле складывается с внутренним и рост тока не происходит. При больших

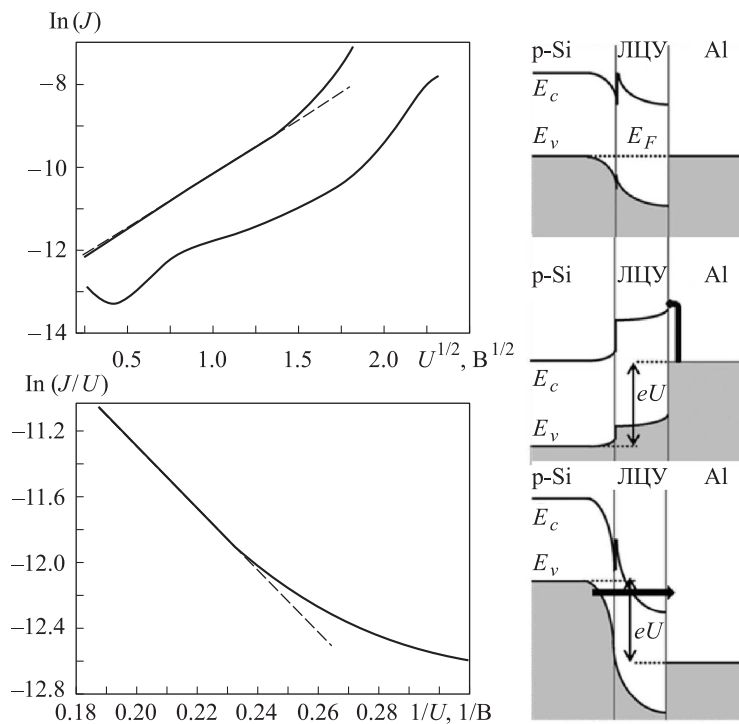


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика структуры p-Si-углерод-Al справа в координатах Шоттки (вверху) и Фаулера-Нордгейма (внизу). Энергетическая диаграмма гетероструктуры (справа)

обратных напряжениях (более 4 В) происходит туннелирование электронов из валентной зоны p-Si в зону проводимости ЛЦУ и Al (рис. 4, справа внизу).

Таким образом, из полученных результатов следует, что в прямом направлении ВАХ гетероперехода соответствует теоретической модели диода Шоттки, а в обратном направлении — туннелированию сквозь потенциальный барьер по модели Фаулера–Нордгейма.

### Заключение

Проведены измерения ВАХ двух гетероструктур на основе ДУ ЛЦУ типа Al-ЛЦУ-Al и p-Si-ЛЦУ-Al. Для структуры Al-ЛЦУ-Al показано, что контакт Al-ЛЦУ является омическим с нелинейной ВАХ и высотой потенциального барьера  $\sim 0.7$  эВ.

Измерения ВАХ гетероструктуры p-Si-ЛЦУ-Al показали выпрямляющие свойства такой гетероструктуры. С помощью анализа ВАХ и энергетической диаграммы структуры объяснен механизм ее проводимости в прямом и обратном направлении: в прямом направлении реализуется надбарьерный механизм инжекции электронов в ЛЦУ (по Шоттки), в обратном — туннельный пробой.

Результаты исследования открывают перспективу создания на основе ультратонких пленок ЛЦУ диодные структуры толщиной до 20 нм.

### Список литературы

1. Yang M.H., Teo K.B.K., Milne W.I., Hasko D.G. // Appl. Phys. Lett. 2005. **87**. 253116.
2. Manohara H.M., Wong E.W., Schlecht E. et al. // Nano Lett. 2005, **5**, N 7. P. 1469.
3. Heinze S., Tersoff J., Martel R. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. **89**, N 10. 106801.
4. Kalakodimi R.P., Nowak A.M., McCreery R.L. // Chem. Mater. 2005. **17**. P. 4939.
5. Ngo Q., Petranovic D., Krishnan S. et al. // IEEE Trans. Nanotechnol. 2004. **3**, N 2. P. 311.
6. Molina R.A., Weinmann D., Pichard J.-L. // Europhys. Lett. 2004. **67**. P. 96.
7. Бабаев В.Г., Гусева М.Б., Савченко Н.Ф. и др. // Поверхность. 2004. № 3. С. 16.
8. Babaev V.G., Guseva M.B., Novikov N.D. et al. Carbon material with a highly ordered linear-chain structure // 4532-Cataldo/Pageproofs/3d/4532-Cataldo-011.3d. 2005. P. 219.

### Conductivity of structures on basis of linear-chain carbon

A. F. Aleksandrov<sup>1</sup>, O. A. Streletskiy<sup>1,a</sup>, V. V. Khvostov<sup>1,b</sup>, A. V. Faustov<sup>2</sup>, N. D. Novikov<sup>1</sup>, A. A. Zaitsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of General Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup>Moscow State Institute of Radio-Engineering, Electronics and Automation. Prospekt Vernadskogo 78, Moscow 119454, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>enchanter@land.ru, <sup>b</sup>vkhv@yandex.ru.

In this article presents results of research of heterostructures on basis of two dimensional linear oriented chain carbon (2D LCC) Al-2D LCC-Al and p-Si-2D LCC-Al types. It was shown that structure Al-2D LCC-Al has nonlinear ohmic contact with height of a potential barrier  $\sim 0.7$  eV. It was shown that in heterostructure pSi-2D LCC-Al is realised overbarrier gear of electron injection through 2D LCC (on Schottky) in a direct direction and tunnel effect (on Fowler–Nordheim) in the return.

**Keywords:** two-dimensionally ordered linear-chain carbon, heterostructures, contact effect, injection conductivity.

PACS: 73.50.-h.

Received 5 June 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2012).

### Сведения об авторах

1. Александров Андрей Федорович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-29-53.

2. Стрелецкий Олег Андреевич — мл. науч. сотрудник, тел.: (495) 939-29-53, e-mail: enchanter@land.ru.

3. Хвостов Валерий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-29-53, e-mail: vkhv@yandex.ru.

4. Фаустов Артем Владимирович — аспирант; тел.: (495) 939-29-53.

5. Новиков Николай Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-53, e-mail: nick.d.nov@mail.ru.

6. Зайцев Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-29-53.