

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НЕРЕЛАКСИРОВАННОЙ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$

Н.А. АБДУЛЛАЕВ<sup>1</sup>, Г.Л. БЕЛЕНЬКИЙ<sup>2</sup>, Г. КИПШИДЗЕ<sup>2</sup>, О.А. АЛИЕВ<sup>1</sup>,  
Х.В. АЛИГУЛИЕВА<sup>1</sup>, К.М. ДЖАФАРЛИ<sup>1</sup>, К.Ш. КАХРАМАНОВ<sup>1</sup>,  
Н.Т. МАМЕДОВ<sup>1</sup>, В.Н. ЗВЕРЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Азербайджана,

Az-1143 Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Stony Brook University,

Stony Brook, New York 11794, USA

<sup>3</sup>Институт физики твёрдого тела РАН,

142432, Черноголовка, Россия

[abnadir@physics.ab.az](mailto:abnadir@physics.ab.az)

Исследованы электропроводность, эффект Холла и магнитосопротивление в нерелаксированной гетерозитаксиальной структуре  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x = 0.43$  и  $0.38$ ) в широкой области температур 5-300К и магнитных полей вплоть до 8Т. Из температурной зависимости электропроводности оценена ширина запрещённой зоны,  $\Delta E \sim 120\text{meV}$ . На магнитополевой зависимости сопротивления выявлены биения, характерные для осцилляций Шубникова-де Гааза. Оцененная из периода осцилляций магнитосопротивления концентрация электронов удовлетворительно согласуется с концентрацией электронов, определённой из измерений эффекта Холла.

**Ключевые слова:** твёрдые растворы, гетерозитаксиальная структура, нерелаксированная структура, электропроводность, эффект Холла, магнитосопротивление, осцилляции Шубникова-де Гааза

**PACS:** 72.20. i ; 73.43.Qt ; 73.50. h

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе твёрдых растворов элементов группы III-V, которые могут поглощать и излучать свет в технологически важной области спектра от 3 до 12 мкм, в которую попадают окна прозрачности атмосферы, делают их перспективными материалами для инфракрасной технологии. Наиболее подходящими для практического применения являются твёрдые растворы  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , обладающие уникальным свойством широкого диапазона варьирования ширины запрещённой зоны от состава (величины  $x$ ), попадающие в указанную область спектра. С увеличением содержания атомов сурьмы  $\text{Sb}$  ширина запрещённой зоны  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  меняется от  $\sim 0.4$  до  $\sim 0.1$  eV [1].

В предыдущей статье [2] нами было подробно изложена методика получения гетерозитаксиальных структур и их характеристика методами высокоразрешающей рентгеновской дифракции, сканирующей атомно-силовой микроскопии и микро-рамановского рассеяния. Показано, что получены нерелаксированные слои твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x = 0.43$  и  $0.38$ ) методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием градиентных буферных слоев  $\text{GaInSb}$  и  $\text{AlGaInSb}$ . Целью настоящей работы являлось исследование электрических и гальваномагнитных свойств гетерозитаксиальных структур  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x = 0.43$  и  $0.38$ ).

### 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Исследования электропроводности проводились в широкой области температур 5-300К стандартным четырёхзондовым методом по селективной методике на частоте 20,5 Гц с

использованием *Lock in Amplifier SR 905*. Точечные контакты наносились с помощью серебряной пасты. Величина тока через образец не превышала 1 мА.

На рисунке 1 приведена температурная зависимость удельного сопротивления образца  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$  в области температур 5-300К в координатах Аррениуса. Хорошо заметен термоактивационный характер температурной зависимости сопротивления в области температур 300-100К, характерный для собственной проводимости:

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (1)$$

с уменьшением температуры удельное сопротивление плёнки экспоненциально возрастает. Здесь  $\Delta E$  - ширина запрещённой зоны. Оценки ширины запрещённой зоны из (1) дают величину  $\Delta E \sim 120\text{meV}$ , что удовлетворительно согласуется с данными измерений фотолюминесценции твёрдых растворов  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  [3]. Наблюдаемое плато в области температур ниже  $T < 100\text{K}$  на рис.1 обусловлено тем, что повышение сопротивления шунтируется более низкоомными нижележащими слоями гетерозитаксиальной структуры.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА ХОЛЛА И МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Гальваномагнитные исследования проводились в магнитных полях вплоть до 8 Тл и при температуре  $T = 5\text{K}$ . Образцы при гальваномагнитных измерениях помещались внутрь сверхпроводящего соленоида, при

этом магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости эпислоя.

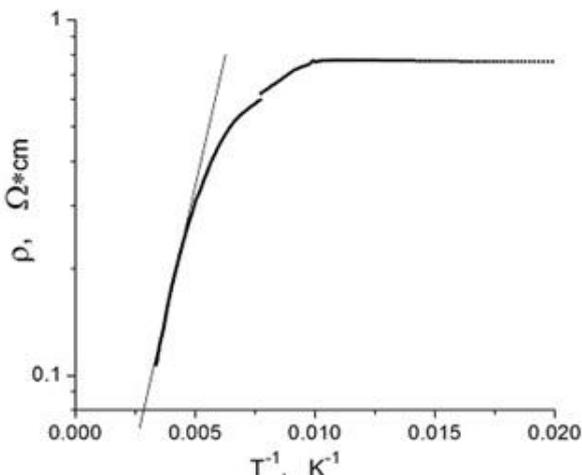


Рисунок 1. Температурная зависимость удельного сопротивления образца  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$  в области температур 5-300К в координатах Аррениуса.

Исследования эффекта Холла проводились при двух взаимно противоположных направлениях магнитного поля для исключения вклада магнитосопротивления в холловское напряжение. Величина тока через образец не превышала 1 мА.

Исследования эффекта Холла показали, что все образцы были *n*-типа. Зависимость холловского напряжения от приложенного магнитного поля была линейной вплоть до 2Т. Оцененная из полевой зависимости холловского напряжения для  $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$  величина концентрации электронов оказалась равной  $n \sim 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для состава  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$  концентрация электронов равна  $n \sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Как видно с увеличением содержания атомов Sb концентрация электронов в твёрдом растворе  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  уменьшается.

На рисунке 2 приведена магнитополевая зависимость сопротивления в образцах  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ . Как видно наличие значительного магнитосопротивления: при величине магнитного поля  $B=7 \text{ Т}$  сопротивление возрастает почти 13 раз, т.е.  $\Delta\rho/\rho \approx 12$ . Это свидетельствует о высокой подвижности носителей заряда – электронов. Кроме того, на полевой зависимости магнитосопротивления наблюдаются биения, характерные для осцилляций Шубникова-де Газа.

Как известно, из периода  $P$  осцилляций магнитосопротивления можно оценить концентрацию  $n$  носителей заряда. В общем случае, для замкнутой поверхности Ферми произвольной формы период осцилляций определяется выражением [4]:

$$P\left(\frac{1}{H}\right) = \frac{2\pi e}{\hbar c S_F} \quad (2)$$

здесь  $S_F$  - экстремальная площадь сечения поверхности Ферми  $\varepsilon(\vec{k}) = \mu_F$  плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля.

Для соединений типа InSb концентрация носителей заряда определяется из соотношения:

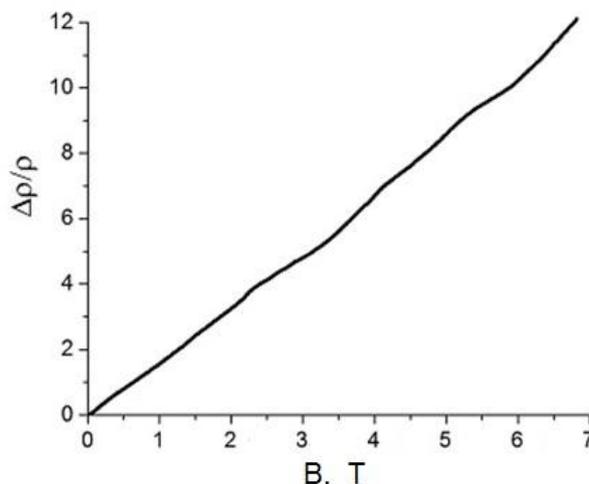


Рисунок 2. Магнитополевая зависимость сопротивления в образцах  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$  при температуре  $T=5\text{К}$ .

Выделенные Фурье-анализом осцилляции на температурной зависимости магнитосопротивления (рис.2) приведены на рисунке 3.

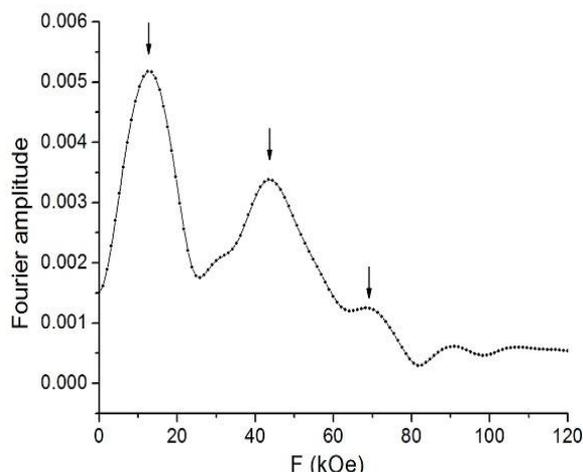


Рисунок 3. Осцилляции магнитосопротивления в образцах  $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ , выделенные Фурье-анализом.

$$n = \frac{1}{3\pi^2} \left( \frac{2e}{c\hbar P(1/H)} \right)^{3/2} \quad (3)$$

вычисления (3) дают величину  $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Таким образом, концентрация носителей заряда определённая из осцилляций Шубникова-де Газа хорошо согласуется с концентрацией, вычисленной из данных измерений эффекта Холла.

Работа выполнена при финансовой поддержке US National Science Foundation (Grant No DMR1160843) и Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской республики (грант № EIF/MQM/Elm-Tehsil-1-2016-1(26)-71/16/1).

- [1] *Z.M. Fang, K.Y. Ma, D.H. Jaw, R.M. Cohen and G.B. Stringfellow. J. Appl. Phys., 1990, 67, 7034*
- [2] *G.L. Belenky, D. Donetsky, G. Kipshidze, D. Wang, L. Shterengas, W.L. Sarney, S.P. Svensson. Appl. Phys. Lett., 2011, 99, 141116*
- [3] *R.R. Guseynov, V.A. Tanriverdiyev, G. Kipshidze, Y.N. Aliyeva, Kh.V. Aliguliyeva, N.A. Abdullayev, N.T. Mamedov. Semiconductors, 2017, 51, 524*
- [4] *И.М. Луфшунц, А.М. Косевич. ЖЭТФ, 1955, 29, 730*