

Электрические и оптические свойства нерелаксированных гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$

© Р.Р. Гусейнов¹, В.А. Танрывердиев¹, G.L. Belenky², G. Kipshidze², Е.Н. Алиева¹,
Х.В. Алигулиева¹, Э.Г. Ализаде¹, Х.Н. Ахмедова¹, Н.А. Абдуллаев^{1,¶},
Н.Т. Мамедов¹, В.Н. Зверев³

¹ Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,
Az-1143 Баку, Азербайджан

² Stony Brook University, Stony Brook,
11794 N. Y., USA

³ Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

¶ E-mail: abnadir@mail.ru

Поступила в Редакцию 10 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 18 декабря 2018 г.

Принята к публикации 18 декабря 2018 г.

Исследованы электрические и гальваномагнитные свойства нерелаксированных гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.43$ и 0.38) в широком интервале температур 5–300 К и магнитных полей до 8 Тл. Из термоактивационной зависимости электропроводности оценена ширина запрещенной зоны состава $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$, она равна 120 мэВ. Определенные из эффекта Холла концентрации электронов в $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ и $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$) хорошо согласуются с концентрацией электронов, вычисленной из осцилляций Шубникова–де Гааза. Также проведены спектральные эллипсометрические исследования нерелаксированных гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.43$ и 0.38) в области энергий фотонов 1–6 эВ. Определены спектральные зависимости мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости. Вычислены и приведены дисперсионные зависимости коэффициентов преломления и экстинкции.

Ключевые слова: гетероэпитаксиальные структуры, удельное сопротивление, эффект Холла, осцилляции Шубникова–де Гааза, спектральная эллипсометрия, диэлектрическая функция.

DOI: 10.21883/FTP.2019.07.47868.9044

1. Введение

Материалы на основе твердых растворов группы III–V, способные поглощать и излучать свет в технологически важной области спектра от 3 до 12 мкм, в которую попадают окна прозрачности атмосферы, являются перспективными материалами для инфракрасной технологии. Наиболее подходящими для практического применения являются твердые растворы $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, обладающие уникальным свойством широкого диапазона варьирования ширины запрещенной зоны от состава (от величины x), попадающие в указанную область спектра.

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

2. Электрические и гальваномагнитные исследования

Исследования электропроводности проводились в широкой области температур 5–300 К стандартным четырехзондовым методом по селективной методике на частоте 20.5 Гц с использованием Lock in Amplifier SR 905. Точечные контакты наносились с помощью серебряной пасты. Магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом, образцы помещались в центр соленоида, максимальное магнитное поле достигало 8 Тл. Величина тока не превышала 1 мА для исключения перегрева образцов.

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

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

с уменьшением температуры удельное сопротивление пленки экспоненциально возрастает. Здесь ΔE — ширина запрещенной зоны. Оценки ширины запрещенной зоны из (1) дают величину $\Delta E \approx 120$ мэВ, что

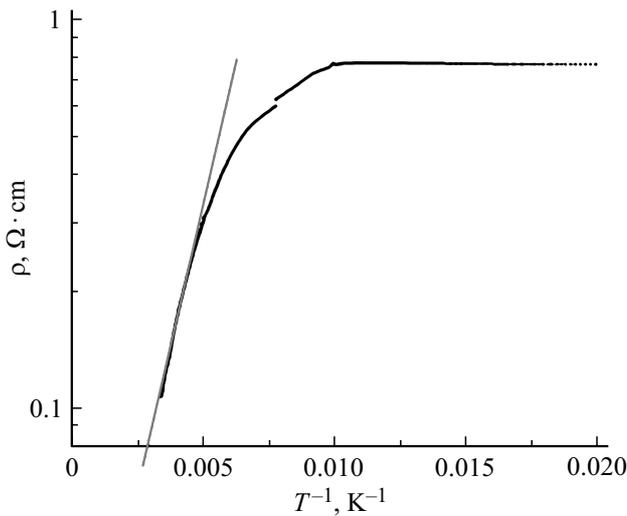


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления образца $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ в области 5–300 К.

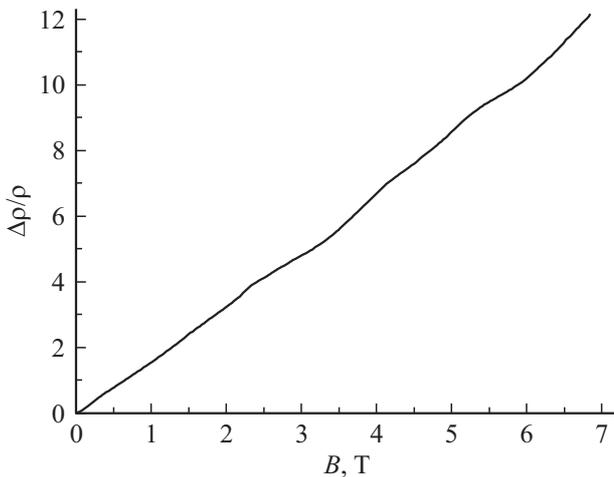


Рис. 2. Магнитополевая зависимость сопротивления в образцах $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ при температуре $T = 5$ К.

удовлетворительно согласуется с данными измерений фотолуминесценции твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ [2]. Наблюдаемое плато в области температур $T < 100$ К на рис. 1 обусловлено тем, что повышение сопротивления шунтируется более низкоомными нижележащими слоями гетероэпитаксиальной структуры.

Исследования эффекта Холла показали, что все образцы были n -типа проводимости. Оцененная из полевой зависимости холловского напряжения для $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ величина концентрации электронов оказалась равной $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для состава $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ концентрация электронов равна $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Как видно, с увеличением содержания атомов Sb концентрация электронов в твердом растворе $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ уменьшается.

На рис. 2 приведена магнитополевая зависимость сопротивления в образцах $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$. Как видно, наблюдается наличие значительного магнитосопротивления:

при величине магнитного поля $B = 7$ Тл сопротивление возрастает почти в 13 раз, т. е. относительное изменение $\Delta\rho/\rho \approx 12$. Это свидетельствует о высокой подвижности носителей заряда — электронов. Кроме того, на полевой зависимости магнитосопротивления наблюдаются биелия, характерные для осцилляций Шубникова—де Газа.

Период выделенных фурье-анализом осцилляций на полевой зависимости магнитосопротивления в обратном магнитном поле напряженности H оказался примерно равен $P(1/H) = 2.25 \cdot 10^{-5} \text{ Э}^{-1}$.

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 [3]

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

Здесь S_F — экстремальная площадь сечения поверхности Ферми $E(\mathbf{k}) = \mu_F$ плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля. Для соединений типа InSb концентрация носителей заряда определяется из соотношения

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

Вычисления согласно (3) дают величину $n \approx 5.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

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

3. Оптические исследования

Для определения оптических параметров гетероэпитаксиальных $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ -структур нами были проведены спектральные исследования методом эллипсометрии, являющимся высокочувствительным и точным оптическим методом исследования поверхностей и границ раздела различных сред. Этот метод основан на изучении изменения состояния поляризации отраженного света после взаимодействия его с поверхностью границ раздела этих сред. Измерения проводились на эллипсометре оптического диапазона M-2000 DI (J.A. Woollam Co, Inc.). Спектральная зависимость эллипсометрических параметров Δ и Ψ снималась в диапазоне энергий фотонов 1–6 эВ с шагом 50 мэВ при углах падения 50, 55 и 60°.

Основное уравнение эллипсометрии, связывающее между собой эллипсометрические параметры Δ , Ψ и комплексные значения коэффициентов отражения Френеля r_p и r_s для p - и s -компонент эллиптически поляризованного света, записывается в виде [4]

$$\text{tg}(\Psi) \exp(i\Delta) = \frac{r_p}{r_s}. \quad (4)$$

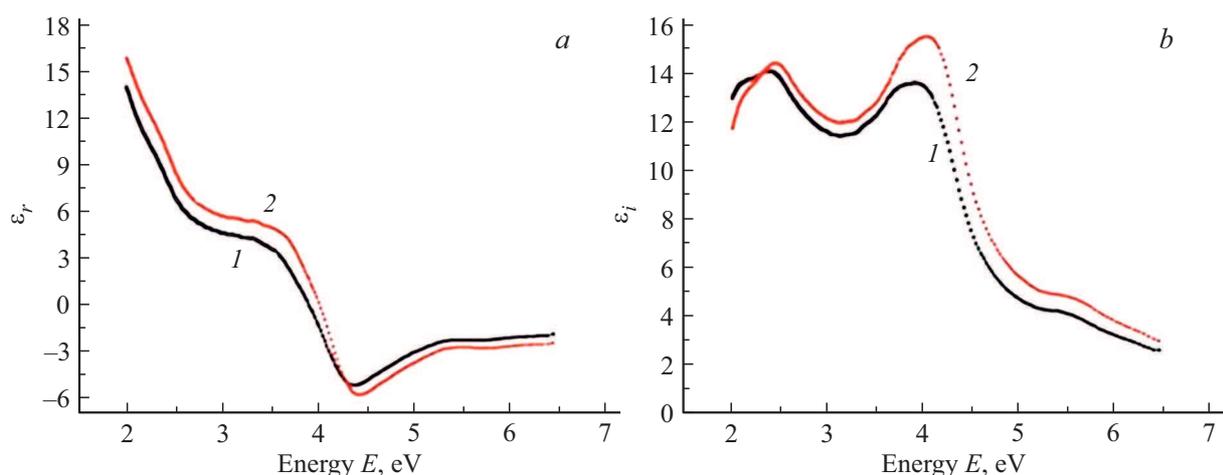


Рис. 3. Спектральные зависимости действительной ε_r (a), и мнимой, ε_i (b) частей диэлектрической функции гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ (1) и $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ (2).

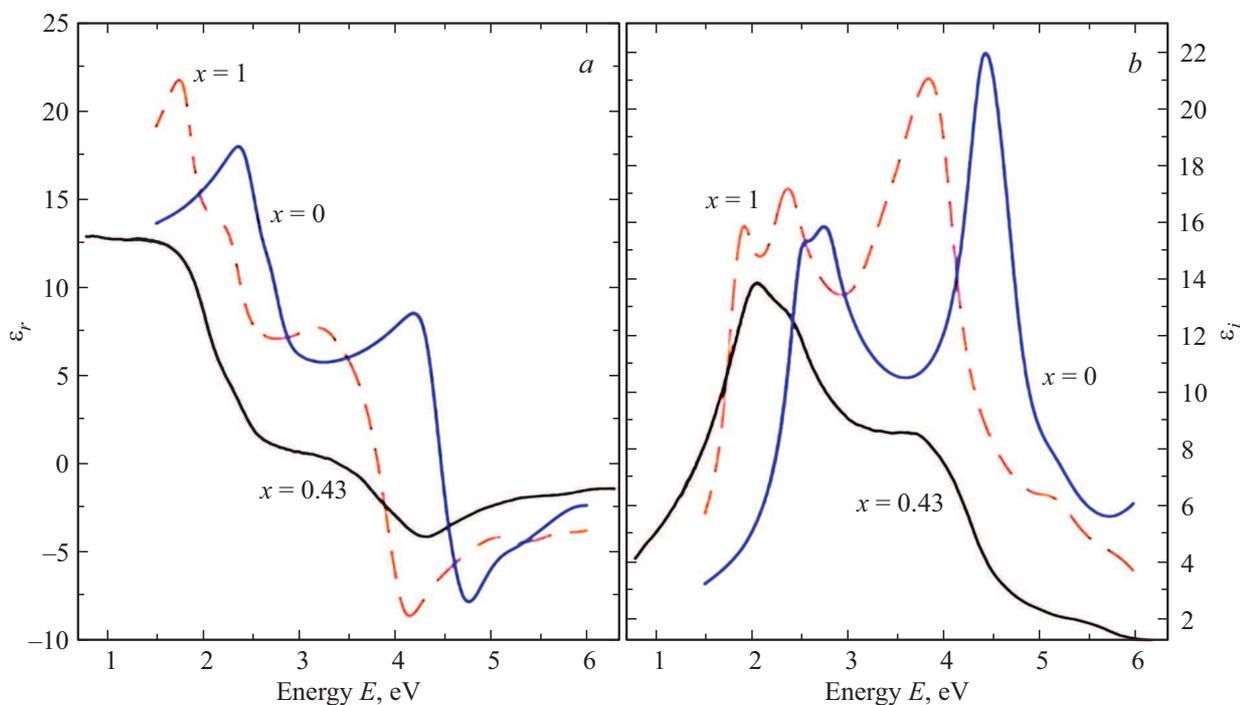


Рис. 4. Спектральные зависимости действительной (a) и мнимой (b) частей диэлектрической функции $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ ($x = 0.43$), InAs ($x = 0$), InSb ($x = 1$).

Выбор адекватной оптической модели, правильно описывающей отражательные свойства исследуемого образца, является одним из важных этапов при эллипсометрических исследованиях. Глубина проникновения оптического излучения может быть оценена из соотношения $\lambda/2\pi k$, где k — коэффициент экстинкции. Для оптического излучения видимого диапазона при анализе системы InAsSb такая глубина составляет с учетом данных по коэффициенту экстинкции для InAs и InSb [5] до ~ 100 нм. В нашем случае толщина верхнего рабочего эпитаксиального слоя в исследуемых структурах составляет ~ 400 нм [1]. Это позволяет утверждать, что

при эллипсометрических исследованиях мы получаем информацию лишь от верхнего слоя исследуемого многослойного покрытия.

На рис. 3 приведены действительная, ε_r , и мнимая, ε_i , части диэлектрической функции $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ (кривые 1), $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ (кривые 2). Надо отметить схожий характер зависимостей, что неудивительно для соединений со столь схожей структурой и близкими составами.

Для сравнения на рис. 4 показаны действительная, ε_r , и мнимая, ε_i , части диэлектрической функции исследованной нами гетероэпитаксиальной структуры

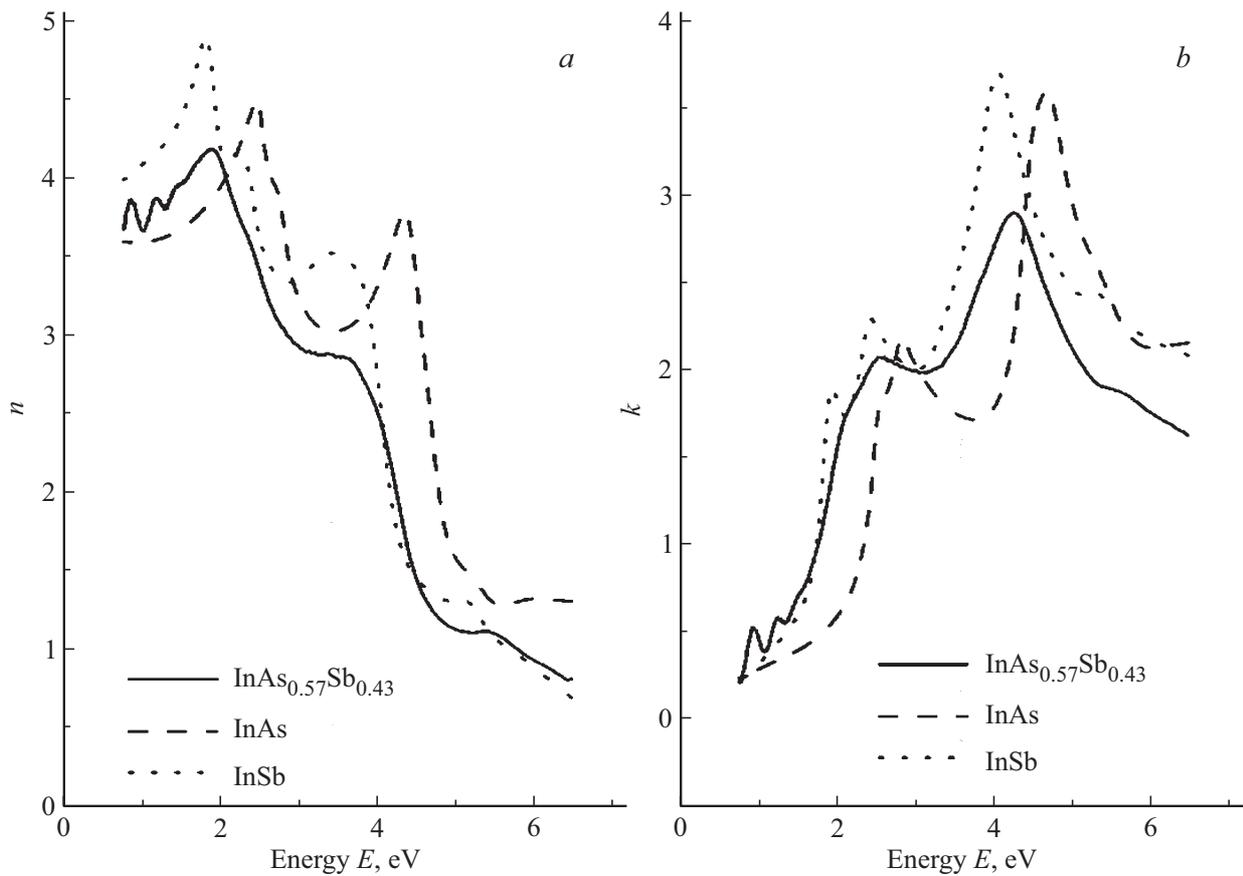


Рис. 5. Спектральные зависимости показателей преломления, $n(E)$, и экстинкции, $k(E)$, для гетероэпитаксиальной структуры $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ и монокристаллов InAs , InSb [5].

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.43$) и материнских составов InAs ($x = 0$) и InSb ($x = 1$) для различных энергий фотонов [5]. Наблюдается хорошая корреляция особенностей на зависимостях $\epsilon_r(E)$ и $\epsilon_i(E)$.

Для расчета показателя преломления n и коэффициента экстинкции k нами применялись формулы

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon_r + \sqrt{\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2}}{2}}, \tag{5}$$

$$k = \frac{\epsilon_i}{\sqrt{2 \left(\epsilon_r + \sqrt{\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2} \right)}}. \tag{6}$$

Вычисленные зависимости $n(E)$ и $k(E)$ для гетероэпитаксиальной структуры $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ приведены на рис. 5. На этом же рисунке приведены зависимости $n(E)$ и $k(E)$ для монокристаллов InAs и InSb [5].

4. Заключение

Вычисленная из активационной зависимости сопротивления от температуры для гетероэпитаксиальной структуры $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ энергия активации оказалась

равной 120 мэВ, что согласуется с данными о ширине запрещенной зоны из исследований фотолюминесценции этих соединений.

Из данных измерений эффекта Холла выявлен электронный характер проводимости с концентрацией электронов $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (для $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$) и $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (для $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$). Как видно, с увеличением содержания атомов Sb концентрация электронов в твердом растворе $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ уменьшается.

Исследования магнитосопротивления выявили большое положительное магнитосопротивление в гетероэпитаксиальных структурах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.43$ и 0.38): при величине магнитного поля $B = 7 \text{ Тл}$ сопротивление возрастает почти в 13 раз, т.е. $\Delta\rho/\rho = 12$. Это свидетельствует о высокой подвижности носителей заряда — электронов. Кроме того, на полевой зависимости магнитосопротивления наблюдаются биения, характерные для осцилляций Шубникова—де Гааза.

Проведен фурье-анализ осцилляций магнитосопротивления. Оцененная из периода осцилляций магнитосопротивления величина концентрации носителей заряда оказалась равной $n \approx 5.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что удовлетворительно согласуется с данными по измерению эффекта Холла.

Из спектральных эллипсометрических измерений получены значения действительной, ε_r , и мнимой, ε_i частей диэлектрической функции $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ и $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ в диапазоне энергий фотонов 1–6 эВ. Вычислены и приведены дисперсионные зависимости показателей преломления $n(E)$ и экстинкции $k(E)$.

Благодарности

Часть работы выполнена В.Н.З. в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Финансирование работы

Работа выполнена благодаря финансовой поддержке US National Science Foundation (Grant No. DMR1160843) и Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской республики (гранты EIF-2013-9(15)-46/06/1 и EIF/MQM/Elm-Tehsil-1-2016-1(26)-71/16/1).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P.P. Гусейнов, В.А. Танрывердиев, G. Kipshidze, E.H. Алиева, X.B. Алигулиева, H.A. Абдуллаев, H.T. Мамедов. ФТП, **51**, 551 (2017).
- [2] Z.M. Fang, K.Y. Ma, D.H. Jaw, R.M. Cohen, G.B. Stringfellow. J. Appl. Phys., **67**, 7034 (1990).
- [3] И.М. Лифшиц, А.М. Косевич. ЖЭТФ, **29**, 730 (1955).
- [4] H. Fujiwara. *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* (West Sussex, John Wiley & Sons Ltd, 2007).
- [5] D.E. Aspnes, A.A. Studna. Phys. Rev. B, **27**, 985 (1983).

Редактор Л.В. Шаронова

Electrical and optical properties of unrelaxed $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ heteroepitaxial structures

R.R. Guseynov¹, V.A. Tanriverdiyev¹, G.L. Belenky², G. Kipshidze², Y.N. Aliyeva¹, Kh.V. Aliguliyeva¹, E.G. Alizade¹, Kh.N. Akhmedova¹, N.A. Abdullayev¹, N.T. Mamedov¹, V.N. Zverev³

¹ Institute of Physics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Az-1143 Baku, Azerbaijan

² Stony Brook University, Stony Brook, N. Y. 11794, USA

³ Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, 142432 Chernogolovka, Russia

Abstract The electrical and galvanomagnetic properties of unrelaxed heteroepitaxial structures of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.43$ and 0.38) were studied in the wide temperature range of 5–300 K and magnetic fields up to 8 T. The band gap of the composition $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$ was estimated from the thermo-activation dependence of the electrical conductivity, and is equal to 120 meV. The electron concentration in $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($n = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for $\text{InAs}_{0.62}\text{Sb}_{0.38}$ and $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for $\text{InAs}_{0.57}\text{Sb}_{0.43}$) was determined from the Hall effect and consistent with the electron concentration calculated from Shubnikov–de Haas oscillations. Also, spectral ellipsometric studies of unrelaxed heteroepitaxial structures of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.43$ and 0.38) were implemented in the photon energy range of 1–6 eV. The spectral dependences of the imaginary and real parts of the dielectric constant are determined. The dispersion dependences of the refractive indices and extinction are calculated and given.