

УДК 620.183.27

PACS: 72.20.Jv, 73.40.Mr, 81.07.St,
82.80.Fk, 84.37.+q

Определение толщины эпитаксиальных слоев гетеропары AlGaAs/GaAs методом электрохимического вольт-фарадного профилирования

В. Е. Гончаров, А. В. Никонов, А. К. Ильясов, О. Д. Арич

Разработана методика вычисления толщин эпитаксиальных слоев GaAs и AlGaAs, применяемых в технологии изготовления матричных фотоприемных устройств с квантоворазмерной активной областью (QWIP), чувствительных в спектральном диапазоне 8–10 мкм. Реализована имитационная модель гетероперехода AlGaAs-GaAs со слоями, имеющими разные степени легирования, для использования в методике электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV). Проведен расчет границы гетероперехода для структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, из экспериментально полученных профилей концентрации носителей заряда по толщине структуры. Полученные с помощью данной методики на основе ECV-профилирования значения концентраций носителей заряда и толщин эпитаксиальных слоев позволили оптимизировать условия роста гетероэпитаксиальных структур с множественными квантовыми ямами для QWIP-фотоприемников.

Ключевые слова: электрохимическое вольт-фарадное профилирование, гетеропара AlGaAs/GaAs, концентрация носителей заряда, толщина эпитаксиального слоя, молекулярно-лучевая эпитаксия, гетероэпитаксиальная структура.

Ссылка: Гончаров В. Е., Никонов А. В., Ильясов А. К., Арич О. Д. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 61.

Reference: V. E. Goncharov, A. V. Nikonov, A. K. Ilyasov, and O. D. Arich, Prikl. Fiz., No. 3, 61 (2019).

Введение

Одним из важнейших направлений современной полупроводниковой фотоэлектро-

ники является ранняя диагностика полупроводниковых материалов и структур, применяемых в разработке перспективных фотоприемных устройств [1]. Важной задачей для разработчиков и технологов является оптимизация топологии многослойных структур, выращиваемых различными эпитаксиальными методами, в том числе выбор и коррекция значений толщины, состава и степени легирования эпитаксиальных слоев на ранних этапах технологического цикла [2]. Разработка и изготовление матричных фотоприемных устройств, чувствительных в диапазоне 8–10 мкм, в последние годы активно проводятся с применением структур с квантоворазмерной активной областью (QWIP-структуры) [3, 4], содержащих в себе чередующиеся слои Al_{0,27}Ga_{0,73}As (45 нм)/GaAs (5 нм, $9 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке арсенида галлия (полуизолятор ориентации <100>).

Гончаров Валерий Евгеньевич^{1,2}, инженер 2 кат., ассистент кафедры.

Никонов Антон Викторович^{1,3}, нач. НИЦ, зам. зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

Ильясов Артем Камильевич¹, инженер 2 кат.

Арич Олеся Дмитриевна^{1,2}, инженер, студентка магистратуры.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8(499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2019 г.

© Гончаров В. Е., Никонов А. В., Ильясов А. К., Арич О. Д., 2019

С целью расширения комплекса межоперационного контроля характеристик эпитаксиально выращиваемых слоев в сложных многослойных структурах (спектроскопия многослойных структур [5], метод Холла, эллипсометрия *in situ* [6], дифрактометрия и т. д.) используется метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (electrochemical capacitance-voltage profiling, ECV), позволяющий получать распределение концентрации носителей заряда по профилю структуры [7].

Данная работа посвящена разработке методики определения толщин эпитаксиальных слоев из экспериментально полученных ECV-профилей гетеропары AlGaAs/GaAs.

Имитационная модель гетероперехода

Электрохимическое вольт-фарадное профилирование экспериментальных образцов проводилось на установке Nanometrics ECVPro. На рис. 1 показан характерный результат измерения распределения концентрации носителей на гетеропереходе.

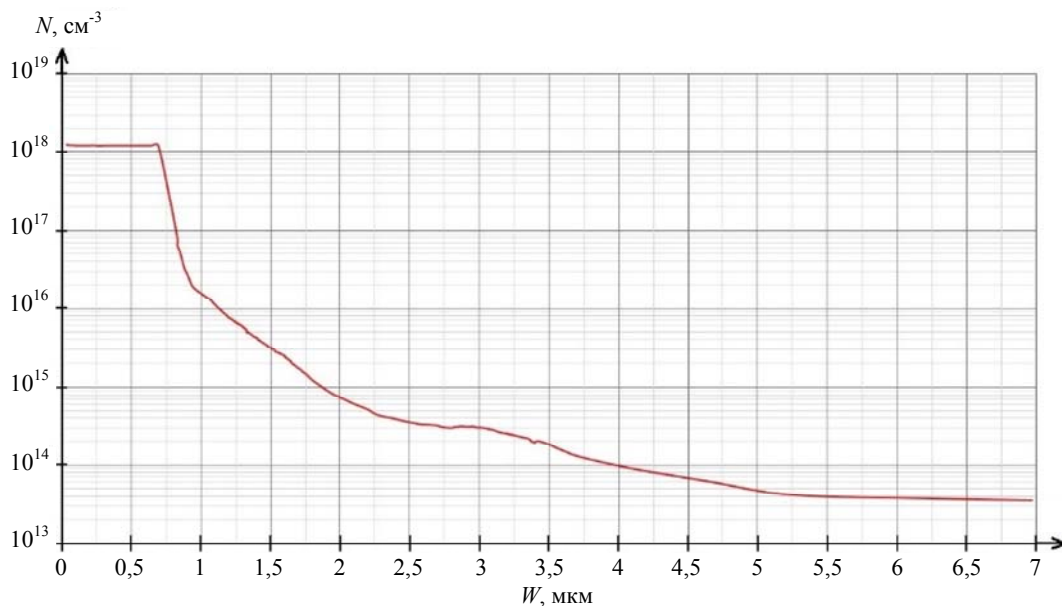


Рис. 1. Пример измеренного ECV-профиля концентрации носителей по толщине эпитаксиальной структуры.

Рассмотрим переход между двумя слоями с концентрациями носителей N_1 и N_2 (см. рис. 2). В идеальной структуре переход от первого слоя ко второму должен иметь вид ступеньки. Ожидаемое значение физического положения границы перехода d_1 соответствует

Методика измерений содержит два последовательных процесса: измерение вольт-фарадной характеристики и прецизионное электрохимическое травление [7–9]. На каждом шаге травления измеряется значение суммарной глубины профилирования:

$$W = W_r + W_d,$$

являющееся суммой глубины травления W_r и ширины области пространственного заряда (ОПЗ) W_d . Представленное на рис. 1 распределение является полным набором значений концентраций носителей заряда N_i , соответствующих суммарным глубинам W_i , поэтому напрямую оценить физическое положение глубины перехода затруднительно.

В ходе проведенного исследования разработана аналитическая модель расчета физического положения границы гетероперехода, в рамках которой решается обратная задача относительно ECV-профиля. Помимо этого, из расчета физической границы слоя для каждой точки появляется возможность оценки качества перехода между двумя различными слоями.

толщине верхнего эпитаксиального слоя. Глубина травления W_r увеличивается с каждым шагом электрохимического травления, и после каждой операции травления осуществляется контроль ширины ОПЗ. При последовательном травлении эпитаксиального слоя ширина

ОПЗ имеет постоянное значение и зависит от концентрации носителей заряда N в данном слое:

$$W_d = \sqrt{2(\Phi_0 - V)\epsilon\epsilon_0 / (qN)}, \quad (1)$$

где Φ_0 – контактная разность потенциалов, V – приложенное между электролитом и полупро-

водником напряжение смещения, q – заряд электрона. Ширина ОПЗ остаётся постоянной до тех пор, пока эпитаксиальный слой не будет протравлен до глубины $d_1 - W_d$. При дальнейшем травлении область пространственного заряда будет захватывать не только верхний, но и нижний слой с концентрацией N_2 .

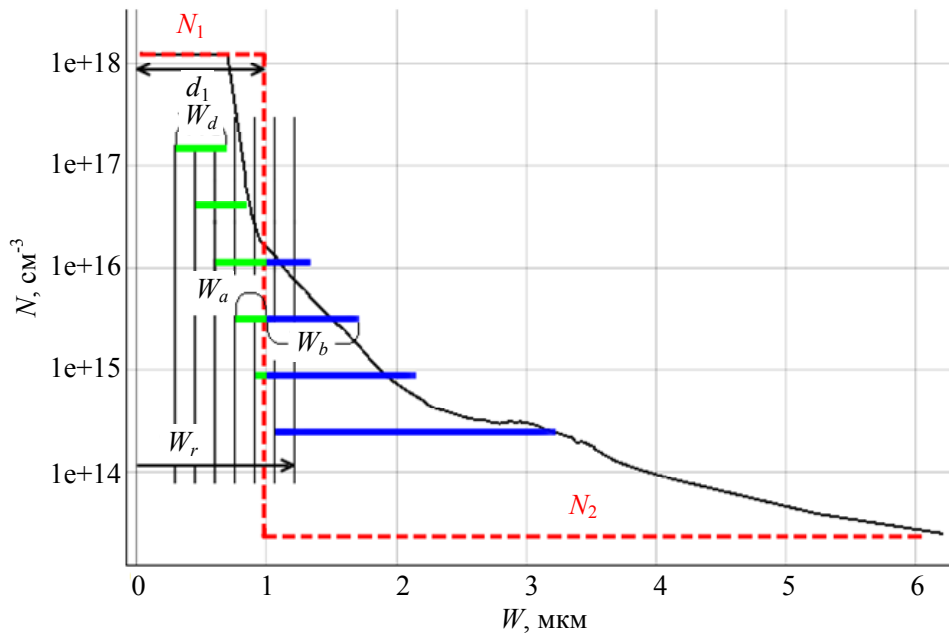


Рис. 2. Определение толщины эпитаксиального слоя из ECV-профиля.

На рис. 2 данный случай показан областью W_d , разделенной на две составляющие, а именно, W_a и W_b . Для такого распределения в формуле (1) концентрация носителей рассчитывается как средневзвешенное между концентрациями N_1 и N_2 :

$$N_{cp} = \frac{W_a}{W_d} N_1 + \frac{W_b}{W_d} N_2. \quad (2)$$

Используя соотношение (2), а также $W_d = W_a + W_b$, получаем зависимость между W_a , W_b и W_d :

$$W_a = W_d \frac{N_{cp} - N_2}{N_1 - N_2}, \quad W_b = W_d \frac{N_1 - N_{cp}}{N_1 - N_2}.$$

По рассчитанным значениям W_a для каждой экспериментальной точки распределения концентрации строится положение физической границы перехода между слоями.

Результаты расчета толщин эпитаксиальных слоев

Разработанная методика прошла апробацию на измеренных электрохимических профилях гетероэпитаксиальных структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на ростовых установках АО «НПО «Орион». На рис. 3 представлен электрохимический вольт-фарадный профиль экспериментального образца структуры, содержащей эпитаксиальный слой GaAs с концентрацией носителей $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, выращенный на нелегированной подложке арсенида галлия (график 1) и результат расчета толщины эпитаксиального слоя, содержащий информацию о качестве гетероперехода (график 2). Уточнено значение толщины выращенного эпитаксиального слоя 700 нм, что позволило оптимизировать технологические параметры эпитаксиального роста [10]. Кроме того, отмечена нелинейность границы гетероперехода, свидетельствующая о наличии нелинейного переходного слоя (интерфейса).

Разработанная методика даёт возможность оценивать качество выращиваемых эпитаксиальных слоев в части стабильности значений концентрации носителей по профилю слоя, а также контролировать интерфейсы.

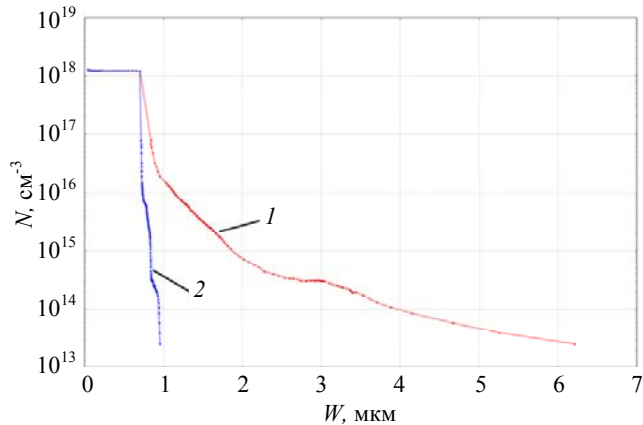


Рис. 3. Экспериментальный и расчетный профили концентрации для эпитаксиального слоя GaAs, выращенного на полуизолирующей подложке GaAs.

Исследования также проводились для структур с множественными квантовыми ямами. На рис. 4 приведен результат измерения распределения концентрации по профилю структуры, содержащей 10 пар: яма GaAs (толщиной 10 нм) – легированный кремнием барьер GaAs (толщиной 80 нм), выращенной на полуизолирующей подложке GaAs. Наблюдаемые колебания значений концентрации носителей показывают положения и толщины барьеров и ям. Применять разработанную расчетную модель для решения обратной задачи для таких структур затруднительно, так как ширина области пространственного заряда превышает суммарную толщину 3–5 эпитаксиальных слоев, и при расчете ширины ОПЗ необходимо учитывать влияние каждого из этих слоев.

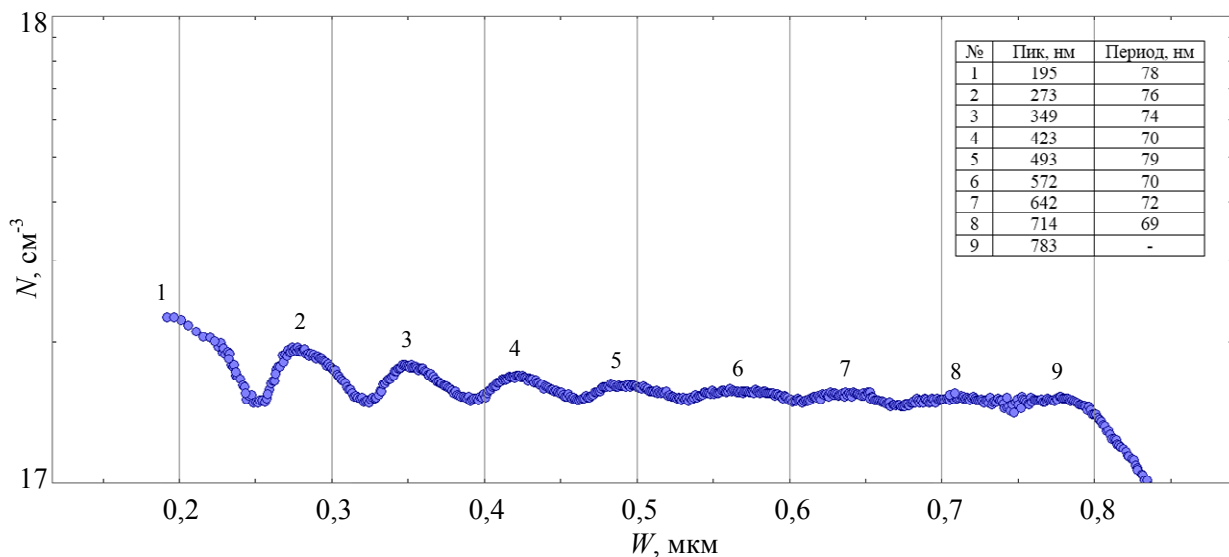


Рис. 4. Измеренный ECV-профиль концентрации носителей заряда в ЭС с множественными квантовыми ямами на основе GaAs.

Отмечено, что из-за влияния нескольких слоев с различной концентрацией носителей на значение ширины ОПЗ происходит уменьшение разброса и усреднение значений концентрации с увеличением глубины травления структуры. Вследствие такого усреднения, на измеренном ECV-профиле значения расстояний между соседними максимумами, соответствующими легированным барьерам, колеблются в диапазоне 70–80 нм. Полученные результаты соответствуют как характеристикам эпитаксиальных слоев, задаваемым при

эпитаксиальном росте, так и альтернативным методам контроля толщины эпитаксиальных слоев.

Заключение

Разработанная методика является эффективным инструментом как для контроля толщины отдельных слоев соединений группы $A^{III}B^V$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, так и оценки качества эпитаксиального роста в части контроля рас-

предела концентрации носителей в слоях и варизонных интерфейсах. Реализована и апробирована модель расчета и визуализации границы гетероперехода из экспериментально полученных электрохимических вольт-фарадных профилей. Данная модель является полезным дополнением к существующим методикам входного и межоперационного контроля полупроводниковых структур, чувствительных в ИК-диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дирочка А. И., Егоров А. В., Чепурнов Е. Л. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 275.
2. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филатов А. М. / Фотоника-2015. Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники (с участием иностранных ученых). Тезисы докладов. (Новосибирск, 2015). С. 19.
3. Дворецкий С. А., Валишева Н. А., Демьяненко М. А. и др. / Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотозлектронике и приборам ночного видения в 2-х томах. Том 1. (Москва, 2018). С. 27.
4. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Власов П. В. и др. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 37.
5. Никонов А. В., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 64.
6. Скребнева П. С., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 61.
7. Гончаров В. Е., Никонов А. В., Батмановская Н. С. и др. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 290.
8. Гончаров В. Е., Никонов А. В., Ильясов А. К. / Фотоника 2019: тезисы докладов (Новосибирск, 2019). С. 101.
9. Гончаров В. Е., Батмановская Н. С., Пашкеев Д. А. и др. / Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотозлектронике и приборам ночного видения в 2-х томах. Том 2. (Москва, 2018). С. 483.
10. Ильинов Д. В., Шабрин А. Д., Гончаров А. Е. и др. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 51.

PACS: 72.20.Jv, 73.40.Mr, 81.07.St, 82.80.Fk, 84.37.+q

Estimation of AlGaAs/GaAs epitaxial structures thickness by means of electrochemical capacitance-voltage profiling

V. E. Goncharov^{1,2}, A. V. Nikonov^{1,3}, A. K. Ilyasov¹, and O. D. Arich^{1,2}

¹ Orion R&P Association, JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

² MIREA – Russian Technological University

78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology

9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received June 10, 2019

The distribution of the charge carrier density along the thickness of the heteroepitaxial structures has a significant effect on the characteristics of the photodetector device, so we need to improve the characterization of the materials. The electrochemical capacitance-voltage (ECV) profiling allows to determine the concentration of charge carriers at a depth up to 50 microns. In this paper, we present our the latest results of the AlGaAs/GaAs heteroepitaxial structures investigations by means of ECV-profiling. Modeling of AlGaAs/GaAs epitaxial structures thickness from ECV-profiles has been made. Electrochemical capacitance-voltage profiling was integrated in technological analysis.

Keywords: electrochemical capacitance-voltage profiling, charge carriers concentration, heteroepitaxial structure, quantum wells, GaAs, AlGaAs, molecular-beam epitaxy.

REFERENCES

1. I. Dirochka, A. V. Egorov, and E. L. Chepurnov, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (4), 275 (2018).
2. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, in *Proc. Photonics-2015. Russian conference on actual problems of semiconductor photoelectronics* (Novosibirsk, 2015), p. 19.
3. S. A. Dvoretzkiy, N. A. Valisheva, M. A. Demianenko, et al., in *Proc. XXV International scientific conference on photoelectronics and night-vision devices* (Moscow, 2018), p. 27.
4. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, and P. V. Vlasov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 6, 37 (2016).
5. A. V. Nikonov and N. I. Yakovleva, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 64 (2017).
6. P. S. Skrebneva, I. D. Burlakov, and N. I. Yakovleva, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 61 (2014).
7. V. E. Goncharov, A. V. Nikonov, N. S. Batmanovskaya, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (4), 290 (2018).
8. V. E. Goncharov, A. V. Nikonov, and A. K. Ilyasov, in *Proc. Photonics-2019* (Novosibirsk, 2019), p. 101.
9. V. E. Goncharov, N. S. Batmanovskaya, D. A. Pashkeev, et al. in *Proc. XXV International scientific conference on photoelectronics and night-vision devices* (Moscow, 2018), p. 483.
10. D. V. Ilinov, A. D. Shabrin, A. E. Goncharov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 1, 51 (2019).