

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОК $Al_2O_3$ НА ПОДЛОЖКАХ GaAs(100)

©2014 П. В. Середин<sup>1</sup>, Д. Л. Голошапов<sup>1</sup>, А. Н. Лукин<sup>1</sup>, А. Д. Бондарев<sup>2</sup>, И. Н. Арсентьев<sup>2</sup>,  
М. Г. Растегаева<sup>2</sup>, И. С. Тарасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия  
e-mail: paul@phys.vsu.ru

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, 194021  
Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: arsentyev@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 21.02.2014 г.

**Аннотация.** В работе изучены оптические свойства ультратонких пленок оксида алюминия, полученных методом ионно-плазменного распыления. Экспериментально показано, что в изготовленных таким образом аморфных пленках зарождаются кристаллы  $\alpha$ -оксида алюминия  $Al_2O_3$ , при этом пленки пропускают оптическое излучение в ИК, видимом и ультрафиолетовом диапазоне и потенциально значимы для создания на их основе просветляющих покрытий зеркал мощных полупроводниковых лазеров на основе  $A_{III}B_V$ .

**Ключевые слова:**  $Al_2O_3$ , оксид алюминия, инфракрасная спектроскопия, ультрафиолетовая спектроскопия.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все чаще для создания на-ноэлектронной компонентной базы на замену кремния выходят полупроводники группы  $A_{III}B_V$  [1—6]. Хорошо известно, что полупроводниковые соединения класса GaAs обладают многими превосходящими электрическими свойствами по сравнению с кремнием, в том числе более высокой подвижностью электронов, большей энергией запрещенной зоны, а также возможностью получать сверхструктурные фазы упорядочения [7—10].

Применение всех этих качеств в электронике на сегодняшний день выражается в создании на основе полупроводников  $A_{III}B_V$  полевых транзисторов металл — полупроводник — полупроводник (*MESFET*) или транзисторов с высокой подвижностью электронов (*HEMT*) [11].

Однако полупроводниковые соединения класса GaAs не имеют собственного оксида, который есть у кремния, что, несомненно, препятствует созданию высокоэффективных устройств на основе этих материалов. Альтернативой собственному оксиду в данном случае является создание искусственных диэлектрических покрытий, лидирующее место среди которых занимает оксид алюминия  $Al_2O_3$ .

Одновременно с этим, высокая прозрачность в широком спектре и значительная стойкость к большим плотностям оптического излучения делает  $Al_2O_3$  очень перспективным для использования в качестве оптических зеркал полупроводниковых лазеров. Для нас этот материал, в первую очередь, представляет интерес в качестве просветляющего покрытия переднего зеркала мощных полупроводниковых лазеров.

Ранее были проведены исследования структуры пленок оксида алюминия, полученных различными методами в вакууме [12—17].

Однако нам не удалось обнаружить ссылок в литературе на получение тонких пленок оксида алюминия ионно-плазменным распылением, поэтому целью работы стала отработка технологии получения качественных ультратонких слоев  $Al_2O_3$  на подложках GaAs методом ионно-плазменного распыления, а также диагностика структурных и оптических свойств созданных образцов.

### ОБЪЕКТЫ, ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе пленки  $Al_2O_3$  получали на установке ионно-плазменного распыления УБ-15 в одинаковых условиях роста. Производилась бом-

бардировка мишени из алюминия (чистота 99.999) ионами кислорода в плазме чистого кислорода без специального добавления аргона. Было подобрано оптимальное соотношение потенциалов катода, анода, мишени и образца, а также давление кислорода в рабочей камере установки, для устойчивого горения плазмы. Рабочее давление варьировалось в диапазоне  $(1-3) \cdot 10^{-3}$  мм.рт.ст. при этом температура подложки составляла 150—200 °С. Использовались сравнительно невысокие для подобных процессов потенциалы мишени — 400—600 В, что позволяло добиваться практически 100% окисления атомов распыляемого алюминия в рабочем объеме камеры до подлета их до образца. Скорость роста пленки  $Al_2O_3$  составляла 20—40 ангстрем в минуту.

Диагностику полученных на подложках GaAs (100) ультратонких слоев  $Al_2O_3$  проводили методами оптической спектроскопии. ИК-спектры отражения в области фононного резонанса GaAs для анализа тонких структурных свойств пленок  $Al_2O_3$ , были получены с использованием ИК-Фурье спектрометра Vertex-70 Bruker, оснащенного приставкой на отражение с изменяемым углом падения излучения в широком диапазоне. Оптические свойства пленок оксида алюминия изучались в диапазоне 190—900 нм, методом ультрафиолетовой (UV)-спектроскопии с помощью прибора LAMBDA 650 фирмы Perkin Elmer, оснащенного универсальной приставкой URA, позволяющей получать спектры отражения в интервале углов падения от 8 до 80 град. Толщины пленок были определены с привлечением метода лазерной эллипсометрии.

Технологические данные по образцам приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики исследованных образцов

Образец	Цвет пленки	Толщина, nm
69	Желтый	175
73	Синий	240
74	Фиолетовый	220
75	Темно-синий	350

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из наиболее удобных методов изучения тонких решеточных свойств и оценки структурного качества конденсированных сред является ин-

фракрасная спектроскопия, позволяющая судить не только о составе вещества, но и о внутренних напряжениях в его решетке, к которым данный метод является очень чувствительным [18—19]. Так как колебательные спектры решетки различных слоев наблюдаются как совмещение спектров каждого слоя, то используя этот инструмент, мы имеем возможность изучить отдельные слои, не повреждая структуру. В виду того, что колебания решетки очень чувствительны к ближайшим атомам — мы можем исследовать кристаллическую структуру и ее качество в чрезвычайно мелком масштабе — порядка параметра решетки. В эксперименте мы использовали спектроскопию на отражение под большими углами падения ( $\sim 80^\circ$ ) на образец, что позволило получить отклик от наноразмерной пленки  $Al_2O_3$ .

На рис. 1 приведены ИК-спектры отражения от исследуемых структур  $Al_2O_3/GaAs$  (100). Как видно из эксперимента, во всех спектрах присутствует высокоинтенсивная колебательная мода, расположенная в области  $260-300 \text{ см}^{-1}$ , являющаяся фононной модой колебаний атомов подложки Ga — As. В тоже время во всех спектрах присутствует слабоинтенсивная колебательная мода — поперечный оптический фонон TO, с максимумом, расположенным около  $430 \text{ см}^{-1}$ . В соответствии с литературными данными [20] появление этого колебания в ИК-спектре отражения свидетельствует об образовании **колебаний растяжения** связи O-Al-O с симметрией ( $E_u$ , TO), характерных для кристаллического  $\alpha$ -оксида алюминия  $Al_2O_3$ .

На рис. 2 приведены спектры отражения-пропускания для ряда пленок при углах падения 8 (рис. 4a) и 45 (рис. 4b) градусов. Как видно из полученных результатов (коэффициент отражения-пропускания, форма и характер кривых, наличие интерференции) в области 200—900 нм пленки хорошо пропускают электромагнитное излучение. Следует отметить, что для всех образцов в области 190—900 нм не наблюдается край поглощения, что свидетельствует о большей, чем 6.5 эВ ширине запрещенной зоны пленки  $Al_2O_3$ .

Необходимость получения спектров отражения от поверхности образцов при двух углах падения излучения на пленку заключалась в применении для расчетов разработанной нами методики определения дисперсии показателя преломления по интерференционной картине. Толщины пленок были определены с привлечением метода лазерной эллипсометрии и составляли в исследуемых образцах 150—200 нм.

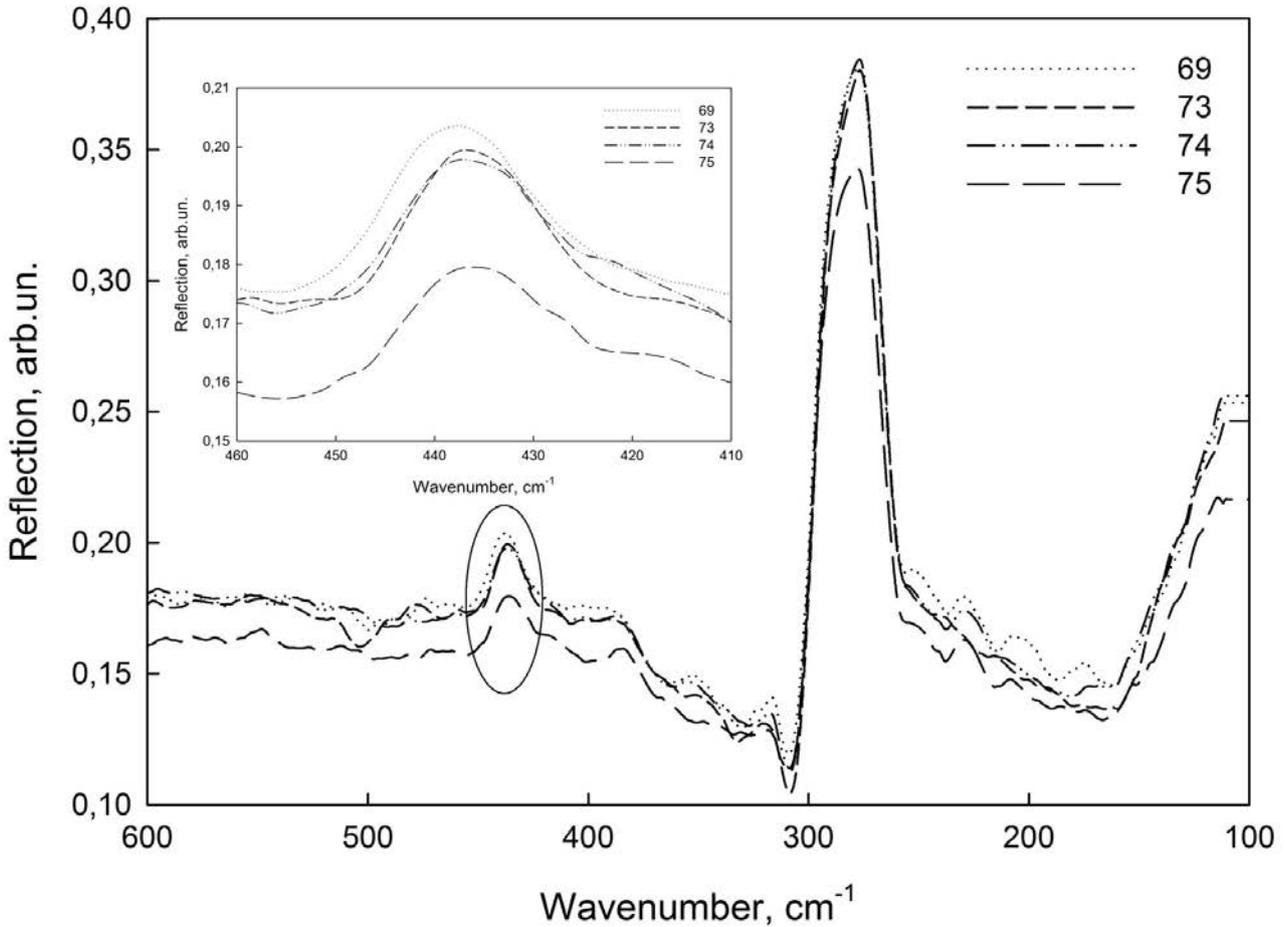


Рис. 1. Результаты ИК-спектроскопии структур  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$  (100)

Применяя соотношение, связывающее толщину пленки  $d$  и показатель преломления  $n$ :

$$d = \frac{N\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)(n^2 - \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

с использованием данных, полученных из анализа максимумов и минимумов в спектрах отражения-пропускания для двух углов падения, мы рассчитали дисперсию показателя преломления для всех образцов. Здесь (1)  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн максимумов/минимумов интерференции в спектре,  $N$  — порядок интерференции,  $n$  — показатель преломления пленки,  $\alpha$  — угол падения излучения на пленку.

Дисперсионную зависимость для каждого образца мы построили по данным, соответствующим количеству максимумов и минимумов на спектрах, полученных экспериментально. На рис. 3 приведены расчетные значения (точки) показателя преломления для каждого исследованного образца, а также аппроксимированные линейные зависимости. Хорошо видно, что линейная аппроксимация

удовлетворительно описывает поведение дисперсии коэффициента преломления для ряда образцов (к примеру, 73 и 74), и имеет большое отклонение от линейной интерполяции в области малых длин волн для образца 69, а в особенности для образца 75, у которого при длинах волн  $\sim 200$  нм наблюдается резкий скачок показателя преломления. Такое поведение, вероятно, связано с фактором толщины пленки, наименьшую из которых имеет образец 75 (см. табл. 1).

## ВЫВОДЫ

На основании экспериментальных и расчетных данных, полученных в этой работе, мы можем сделать следующие выводы. Методом ионно-плазменного распыления могут быть получены ультратонкие пленки оксида алюминия в аморфном состоянии с зарождающимися в них кристаллами  $\alpha$ -оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Эксперимент показывает, что полученные образцы хорошо пропускают оптическое излучение в ИК, видимом и ультрафиолетовом диапазоне.

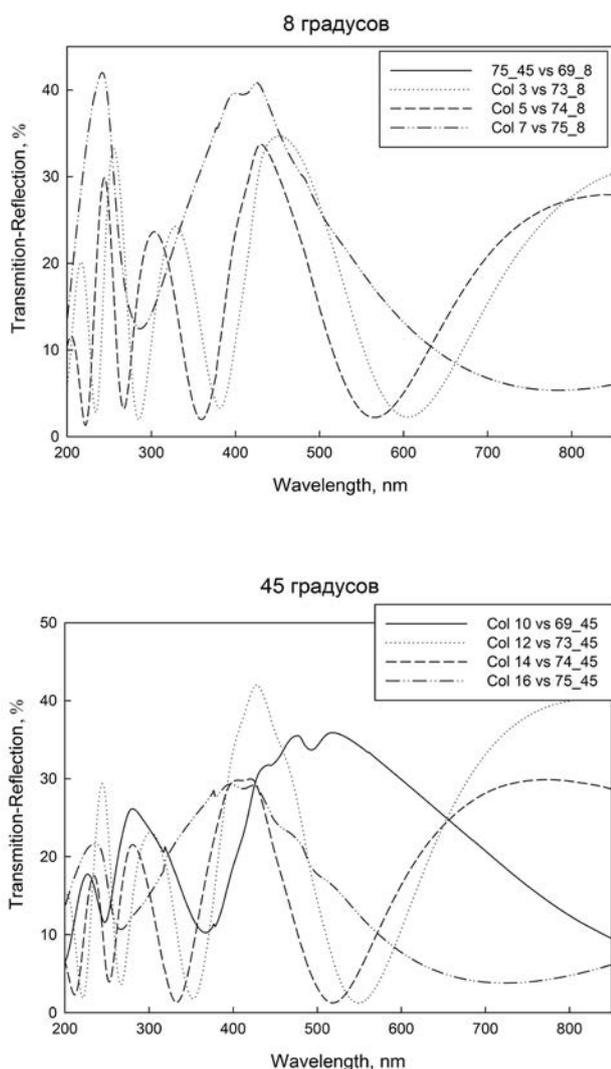


Рис. 2. Оптические спектры пропускания-отражения в УФ-диапазоне исследуемых структур  $Al_2O_3/GaAs(100)$

Определенные дисперсии коэффициента преломления дают основания полагать, что изготовленные таким образом пленки потенциально значимы для создания на их основе просветляющих покрытий зеркал мощных полупроводниковых лазеров на основе  $A_{III}B_{V_5}$ , а также служить в качестве диэлектрического затвора при конструировании высокоперспективных МДП структур (MIS) на основе полупроводников группы  $A_{III}B_{V_5}$ , используемых при формировании проводящих каналов.

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием высшим учебным заведениям РФ.

Авторы благодарят Центр коллективного пользования Воронежского государственного университета за предоставленное аналитическое оборудование.

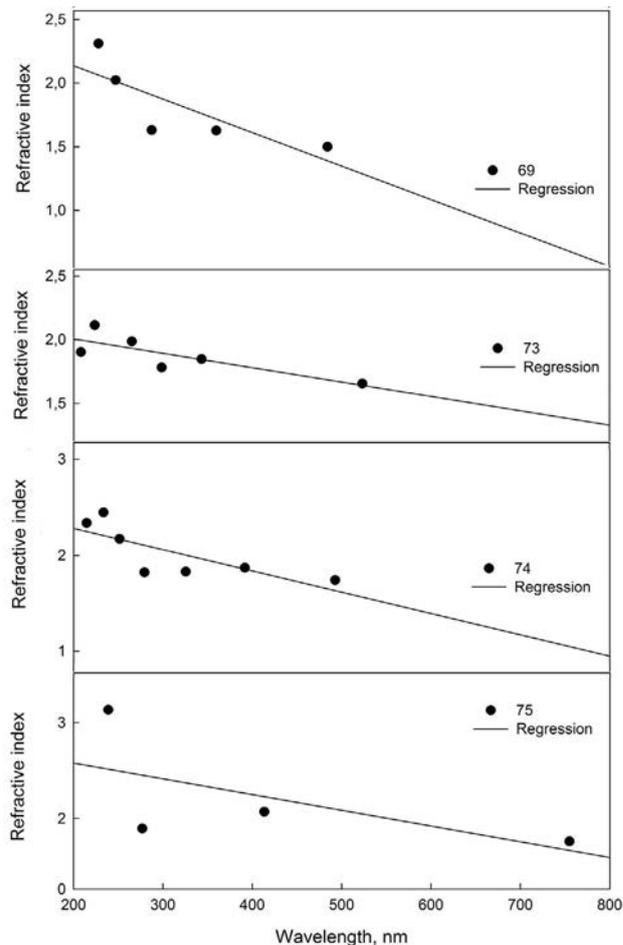


Рис. 3. Расчет дисперсии показателя преломления пленок  $Al_2O_3$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uchida K. // J. Cryst. Growth. 2003. V. 248. P. 124.
2. Mimila-Arroyo J., Brand S. W. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 1164.
3. Seredin P. V., Glotov A. V., Domashevskaya E. P., et al. // Semiconductors. 2010. V. 44. I. 2. P. 184—188.
4. Seredin P. V., Glotov A. V., Domashevskaya E. P., et al. // Semiconductors. 2009. V. 43. I. 12. P. 1610—1616.
5. Seredin P. V., Domashevskaya P., Arsentyev I. N., et al. // Semiconductors. 2013. V. 47. I. 1. P. 1—6.
6. Monier C., et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 2103.
7. Takamoto T., Agui T., Ikeda E. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2001. V. 66. P. 511.
8. Seredin P. V., Glotov A. V., Domashevskaya E. P., et al. // Applied Surface Science. 2013. V. 267. P. 181—184.
9. Domashevskaya E. P., Gordienko N. N., Rummyantseva N. A., et al. // Semiconductors. 2008. V. 42. I. 9. P. 1069—1075.
10. Seredin P. V., Glotov A. V., Ternovaya V. E., et al. // Semiconductors. 2011. V. 45. I. 11. P. 1433—1440.
11. Jun B. K., et al. // Thin Solid Films. 2000. V. 360. P. 229—232.

12. *Siddhartha Dradhan K., et al.* // Surface and Coat. Technol. 2004. V. 76. I. 3. P. 382—384.
13. *Chou T. C., Nieh T. G., McAdams S.D., Pharr G. M.* // Scripta Met. 1991. V. 25. I. 10. P. 2203—2208.
14. *Hoetzsch G., Zywitzki O., Sahn H.* // 40th Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters. 1997. April 12—17. New Orlean. USA.
15. *Cheng C. — W. and Fitzgerald E. A.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 202101.
16. *Борисова А. Л., Адеева Д. И., Сладкова В. Н.* // Автом. сварка. 1997. № 9 (534). С. 26—32.
17. *Крушинская Л. А., Стельмах Я. А.* // Вопросы атомной науки и техники. 2011. № 6. С. 92—98.
18. *Seredin P. V., Glotov A. V., Domashevskaya E. P., et al.* // Semiconductors. 2009. V. 43. I. 12. P. 1610—1616.
19. *Seredin P. V., Domashevskaya É. P., Lukin A. N., et al.* // Semiconductors. 2008. V. 42. I. 9. P. 1055—1061/
20. *Pechar František* // Crystal Research and Technology. 1985. V. 20. I. 2. P. 239—246.

---

*Середин Павел Владимирович* — д. ф.-м. н., с. н. с., кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет; e-mail: paul@phys.vsu.ru

*Голощанов Дмитрий Леонидович* — к. ф.-м. н., ведущий инженер, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет

*Арсентьев Иван Никитич* — д. т. н., в. н. с., профессор, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; e-mail: arsentyev@mail.ioffe.ru

*Бондарев Александр Дмитриевич* — к. ф.-м. н., с. н. с., ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

*Растегаева Марина Геннадьевна* — к. ф.-м. н., н. с., ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

*Тарасов Илья Сергеевич* — д. ф.-м. н., профессор, зав. лабораторией, ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

*Seredin Pavel V.* — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Department of Solid State Physic and Nanostructures, Voronezh State University; e-mail: paul@phys.vsu.ru

*Goloshchapov Dmitry L.* — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Chief Engineer, Senior Researcher, Department of Solid State Physic and Nanostructures, Voronezh State University

*Arsentyev Ivan N.* — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Ioffe Physical and Technical Institute; e-mail: arsentyev@mail.ioffe.ru

*Bondarev Alexander D.* — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Ioffe Physical and Technical Institute, Saint-Petersburg

*Rastegaeva Marina G.* — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Ioffe Physical and Technical Institute, Saint-Petersburg

*Tarasov Iliya S.* — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory, Ioffe Physical and Technical Institute, Saint-Petersburg