

## Арсенид-галлиевые структуры с подзатворным диэлектриком на основе слоев оксида алюминия

© И.Л. Калентьева, О.В. Вихрова, А.В. Здоровейцев, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин

Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: istery@rambler.ru

(Получена 21 мая 2015 г. Принята к печати 5 июня 2015 г.)

Исследованы различные типы диэлектриков, полученных методом низкотемпературного электронно-лучевого распыления: слои  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и трехслойные композиции  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Определена зависимость электрической прочности слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от толщины. Установлено, что формирование трехслойного диэлектрика  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  позволяет увеличить диапазон рабочих напряжений до 60 В для структур с управляющим электродом. Показана возможность управления плотностью носителей (дырок) в двумерном канале проводимости GaAs-структур посредством изменения напряжения на затворе при использовании конструкции слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в качестве подзатворного диэлектрика.

Одно из основных направлений современного полупроводникового приборостроения связано с уменьшением размеров базовых элементов с целью достижения наивысшей плотности их расположения при минимальной потребляемой мощности и максимальном быстродействии [1]. Ряд поставленных задач требует изготовления качественных диэлектрических слоев при относительно низких температурах, позволяющих избежать деградации поверхности полупроводника. С учетом сказанного перспективной представляется разработка низкотемпературной технологии получения high-k диэлектрических слоев (т.е. слоев, величина диэлектрической проницаемости которых превышает значение для диоксида кремния). Такие high-k диэлектрики прежде всего рассматриваются как основные кандидаты для формирования подзатворного диэлектрика при разработке полевых транзисторов. Согласно литературным данным, для GaAs-структур перспективными представляются диэлектрические слои  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [2–4], основным методом получения которых на данный момент является метод атомного слоевого осаждения [2–6]. Достигнуты определенные успехи по созданию полевого GaAs-транзистора на основе МДП-структур с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [7].

Данная работа посвящена исследованию возможности применения слоев оксида алюминия, выращенных методом низкотемпературного электронно-лучевого распыления, в качестве диэлектрического материала при формировании приборов с управляющим электродом для арсенид-галлиевых структур с двумерным каналом проводимости.

Исследования проводились с использованием двух групп гетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении и температуре 600–620°C. Первая (I) группа структур была изготовлена на проводящих подложках GaAs. Образцы включали буферный слой GaAs толщиной 0.2–0.3 мкм, легированный донорной или акцепторной примесью в случае *n*- и *p*-типа проводимости подложек соответ-

ственно, квантовые ямы (КЯ)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  шириной 10 нм с содержанием индия  $0.1 < x < 0.2$ , разделенные спейсером GaAs толщиной 30 нм, и покровный слой GaAs (30 нм), также легированный примесью в соответствии с типом проводимости подложки.

Для выращивания второй (II) группы структур использовались пластины полуизолирующего GaAs. Образцы содержали нелегированный буферный слой GaAs толщиной 0.4 мкм, КЯ  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  с содержанием индия  $x \sim 0.1$  и (или)  $\delta\langle C \rangle$ -легированный GaAs-слой. Толщина спейсера GaAs между квантовой ямой и  $\delta\langle C \rangle$ -слоем составляла 4 нм, а толщина покровного слоя GaAs около 20–30 нм.

Формирование аморфных диэлектрических ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и металлических (Ni, Au и Au/Ti) слоев осуществлялось методом электронно-лучевого распыления в вакууме при температуре 160°C. С использованием фотолитографии и химического травления для образцов группы I изготавливались мезаструктуры диаметром 500 мкм, базовый омический контакт со стороны подложки формировался искровым вжиганием оловянной фольги. Затем на полученных образцах измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) при температурах 77 и 300 К.

Для образцов на подложках полуизолирующего GaAs изготавливались мезаструктуры типа „холловский мостик“. Токовая дорожка холловского мостика была закрыта диэлектриком, поверх которого располагался управляющий металлический (Ti/Au) электрод. Исследовались зависимости сопротивления Холла ( $R_H$ ) от напряженности магнитного поля в температурном диапазоне от 10 до 300 К при нулевом, положительном и отрицательном потенциале на управляющем электроде. Перечень типов использованных образцов приведен в табл. 1.

Исследование фотолюминесценции (ФЛ) структур типа I-A при 77 К позволяло судить о степени сохранения исходного качества гетероструктур после формирования диэлектрических и металлических слоев. Для возбуж-

Таблица 1. Типы исследованных структур

Тип структуры	Подложка	Особенности структуры	Диэлектрик
I-A	<i>n</i> - или <i>p</i> -GaAs	Три КЯ InGaAs/GaAs	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
I-B	<i>n</i> - или <i>p</i> -GaAs	Три КЯ InGaAs/GaAs	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
II-1-B	<i>i</i> -GaAs	Одиночный $\delta$ (C)-слой	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
II-2-B	<i>i</i> -GaAs	$\delta$ (C)-слой и КЯ InGaAs/GaAs	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

дения фотолюминесцентного излучения использовался He–Ne-лазер с длиной волны излучения 632.5 нм и мощностью 30 мВт.

Осуществлялся подбор диэлектрика, удовлетворяющего следующим требованиям: отсутствие влияния на исходное оптическое качество арсенид-галлиевых гетеронаноструктур и наличие высокого напряжения пробоя для образцов структур обоих типов проводимости. Были исследованы два типа конструкций: (A) — одиночные слои Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> различной толщины (*d*) и (B) — трехслойный диэлектрик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Рассмотрим образцы I-A со слоем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> различной толщины, — 5, 15 и 60 нм, и металлическим (например, Ni) контактом (толщиной 20 нм) на поверхности. Для контроля качества полученных образцов проводились измерения спектров фотолюминесценции. На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции структуры, содержащей три квантовые ямы InGaAs/GaAs с содержанием индия в диапазоне от 0.13 до 0.2. Ближе к поверхности располагалась квантовая яма с меньшим количеством индия. Представленные спектры образцов имеют три пика, соответствующие энергиям основных переходов в квантовых ямах вблизи 1.32, 1.362 и 1.398 эВ. Видно, что при толщинах слоев Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5 и 15 нм

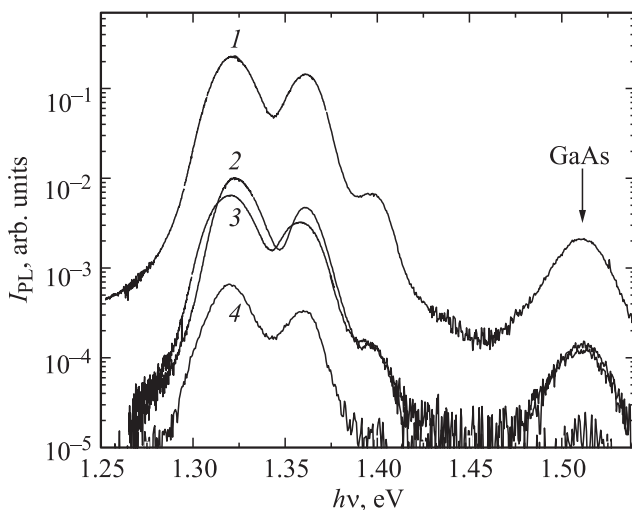


Рис. 1. Спектры ФЛ образцов структуры I-A с тремя квантовыми ямами InGaAs/GaAs при 77 К. Спектр 1 соответствует исходной структуре (до осаждения диэлектрика и металла), толщина оксида алюминия для других спектров составляет, нм: 2 — 5, 3 — 15, 4 — 60.

наблюдается практически одинаковый спад интенсивности фотолюминесценции квантовых ям. Согласно литературным данным, материал Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является прозрачным для данного диапазона длин волн излучения [8]. Наблюдаемое уменьшение сигнала ФЛ главным образом обусловлено потерями вследствие отражения (коэффициент отражения для металла составляет 70–85%) исходного возбуждающего лазерного излучения от металлической полупрозрачной пленки никеля и поглощения излучения квантовых ям металлическим слоем [9].

Дальнейший спад сигнала фотолюминесценции квантовых ям при увеличении толщины диэлектрика до 60 нм может быть обусловлен нарушением стехиометрии Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с возможным образованием включений фазы металлического алюминия при снижении концентрации кислорода в процессе выращивания слоев такой толщины и соответствующими изменениями оптических параметров — показателей преломления и поглощения. Такое предположение согласуется с результатами работы [10] по изучению влияния потока кислорода при формировании слоев оксида алюминия методом электронно-лучевого распыления на микроструктуру и оптические свойства. Несмотря на снижение интенсивности фотолюминесценции квантовых ям, общая структура спектров сохраняется после нанесения диэлектрического и металлического слоев. Этот факт может свидетельствовать о сохранении кристаллического и оптического качества образцов.

Исследование вольт-амперных характеристик структур типа I-A (рис. 2), выращенных на подложках GaAs *n*- и *p*-типа проводимости, позволило определить напряжение пробоя и рассчитать электрическую прочность слоев Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которая определяется как  $E_{br} = U_{br}/d$ , где  $U_{br}$  — напряжение пробоя, а  $d$  — толщина диэлектрика. Обнаружено, что с увеличением толщины диэлектрика с 5 до 60 нм наблюдалось уменьшение  $E_{br}$  с 8 до 2 МВ/см. Эти результаты согласуются с литературными данными, в частности, для слоев Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной до 50 нм, полученных методом атомного слоевого осаждения, электрическая прочность составляет 5–8 МВ/см [4]. Снижение электрической прочности с увеличением толщины наблюдалось ранее для слоев Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенных методом атомного слоевого осаждения [11]. Поэтому к возможным причинам возрастания токов утечки можно отнести изменение фазового состава Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и формирование пор внутри диэлектрика.

**Таблица 2.** Слойная концентрация дырок  $p$  [ $10^{11} \text{ см}^{-2}$ ] в зависимости от приложенного смещения  $V_G$  при различной температуре для образца с одиночным  $\delta$ -слоем углерода

Температура измерений, К	Напряжение смещения $V_G$ , В						
	-40	-20	-10	0	+10	+20	+30
100	8.76	8.24	8.17	7.73	3.56	2.27	2.2
200	—	17.7	—	13.6	7.76	7.67	—
300	—	—	17.4	16.1	14.5	11.3	—

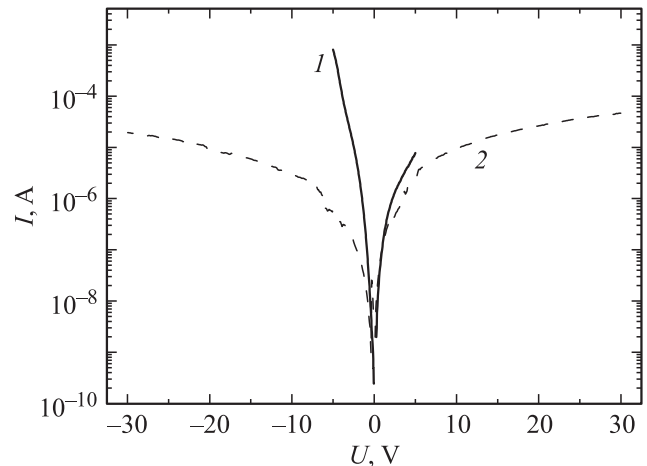
С целью повышения рабочего диапазона напряжений на структурах, выращенных на проводящих подложках GaAs, были сформированы трехслойные диэлектрики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  с комбинированным металлическим контактом Au (30 нм)/Ti (15 нм). Предполагалось, что введение промежуточного слоя  $\text{SiO}_2$  способствует прерыванию каналов паразитной проводимости, присутствующих в слоях оксида алюминия. Использование титана в данном случае позволило улучшить адгезию Au-контакта [12]. На рис. 2 приведены сравнительные вольт-амперные характеристики для случаев одиночного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5 нм) (структура I-A) и трехслойного диэлектрика  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (10 нм/130 нм/10 нм) (структура I-B). Видно, что для образца со слоем оксида алюминия на поверхности ток утечки значительным образом возрастает при напряжении порядка 5 В. Напротив, для структуры с трехслойной композицией диэлектриков ток составляет  $\sim 10$  мкА для величины подаваемого потенциала 30 В. При толщине  $\text{SiO}_2$ , равной 200 нм, максимальное значение напряжения, подаваемого на контакты, увеличивалось до 60 В для образцов обоих типов проводимости.

С учетом полученных результатов для структур группы II, выращенных на пластинах полуизолирующего GaAs, была исследована возможность управления дырочной проводимостью в образцах, содержащих одиночный  $\delta$ -слой C (структура II-1-B), а также два канала проводимости: квантовую яму InGaAs/GaAs и  $\delta$ -слой углерода (структура II-2-B). Исследуемые образцы представляли собой мезоструктуру типа холловского мостика с токовой дорожкой, закрытой диэлектриком и металлическим электродом (затвор). В качестве подзатворного диэлектрика использовали трехслойную композицию  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (10 нм/200 нм/10 нм).

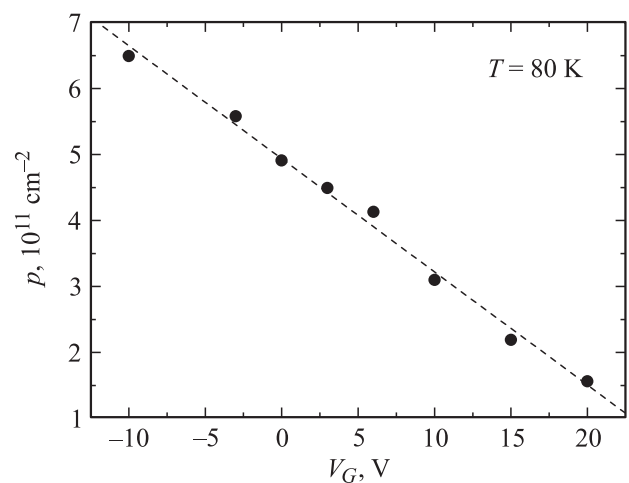
Использование управляющего электрода в зависимости от прикладываемого на затвор напряжения ( $V_G$ ) позволило влиять на концентрацию носителей в области  $\delta$ -слоя, т.е. уменьшать (при  $V_G < 0$ ) или увеличивать (при  $V_G > 0$ ) наклон зависимости сопротивления Холла от магнитного поля ( $R_H(H)$ ). Рассчитанные с использованием  $R_H(H)$  значения слоевой концентрации дырок для структуры с одиночным  $\delta$ -слоем углерода в зависимости от величины и знака подаваемого на затвор напряжения при различных температурах измерения

представлены в табл. 2. Видно, что с увеличением значения положительного смещения до 30 В удается уменьшить концентрацию носителей в двумерном канале проводимости в 3.5 раза. Отрицательное смещение позволяет в значительно меньшей степени влиять на концентрацию дырок.

Аналогичная картина наблюдается для структуры с двумя каналами проводимости ( $\delta$ -слой углерода и квантовая яма). На рис. 3 представлена зависимость величины слоевой концентрации носителей от величины  $V_G$  для температуры измерений 80 К. Как видно из рисунка, изменение слоевой концентрации носителей пропорционально величине прикладываемого на затвор напряжения. Значительное уменьшение (в 5 раз) концентрации носителей наблюдается в случае положительного напряжения на затворе 20 В. Слабое увеличение концентрации носителей при приложении отрицательного смещения в



**Рис. 2.** ВАХ для структур  $n$ -типа проводимости: 1 — соответствует слою  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 5 нм, 2 —  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (10 нм/130 нм/10 нм) при 300 К.



**Рис. 3.** Зависимость слоевой концентрации дырок от приложенного смещения для структуры II-2-B с двумя каналами проводимости: КЯ InGaAs и  $\delta$ -слоем C при 80 К.

обоих случаях может быть обусловлено отсутствием дополнительных каналов/областей — поставщиков дырок, поскольку все имеющиеся дырки уже задействованы в процессе проводимости.

Таким образом, проведенные исследования и представленные результаты позволяют заключить:

— метод низкотемпературного электронно-лучевого распыления может быть использован для формирования диэлектрических слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на поверхности арсенид-галлиевых гетеронаноструктур, о чем свидетельствует сохранение кристаллического и оптического качества структур;

— электрическая прочность слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$  уменьшается с толщиной и составляет 2–8 МВ/см, что согласуется с литературными данными;

— слои оксида алюминия, выращенные методом электронно-лучевого распыления, могут применяться в качестве подзатворного диэлектрического материала для приборов на основе наногетероструктур GaAs;

— использование трехслойного диэлектрика  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  повышает диапазон рабочих напряжений вплоть до 60 В для обоих типов проводимости структур и позволяет управлять величиной концентрации дырок в двумерном канале проводимости посредством изменения напряжения на затворе.

Авторы выражают глубокую благодарность Б.Н. Звонкову за выращенные для исследований серии полупроводниковых структур.

Работа выполнялась в рамках реализации государственного задания (№ 8.1054.2014/К и № 3.285.2014/К) Министерства образования науки России, а также при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-02-07824\_a) и стипендии президента (конкурс СП-2015).

## Список литературы

- [1] *Синтез, свойства и применение диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в кремниевых приборах*, под ред. Л.А. Асеева, В.А. Гриценко. (Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2011).
- [2] D. Shahrjerdi. *III–V Channel MOS Devices with Atomic-Layer-Deposited High-k Gate Dielectrics: Interface and Carrier Transport Studies* (Dissertation, University of Texas, 2008).
- [3] T. Yoshida, T. Hashizume. *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 122 102 (2012).
- [4] D. Chiba, F. Matsukura, H. Ohno. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 162 505 (2006).
- [5] Y.Q. Wu, H.C. Lin, P.D. Ye, G.D. Wilk. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 072 105 (2007).
- [6] С.Г. Сазонов, З.Н. Зулуев, В.Е. Дрозд, И.О. Никифорова. *Письма ЖТФ*, **24** (13), 58 (1998).
- [7] S.H. Chen, W.S. Liao, H.C. Yang, S.J. Wang, Y.G. Liaw, H. Wang, H. Gu, M.C. Wang. *Nanoscale Res. Lett.*, **7**, 431 (2012).
- [8] K.S. Shamala, L.C.S. Murthy, K. Narasimha Rao. *Mater. Sci. Eng. B*, **106**, 269 (2004).
- [9] V.K. Kameineni, M. Raymond, E.J. Bersch, B.B. Doris, A.C. Diebold. *J. of Appl. Phys.*, **107**, 093525 (2010).
- [10] N. Maiti, A. Biswas, R.B. Tokas, D. Bhattacharyya, S.N. Jha, U.P. Desphandl, U.D. Barve, M.S. Bhatia, A.K. Das. *Vacuum*, **85**, 214 (2010).
- [11] H.C. Lin, P.D. Ye, G.D. Wilk. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 182 904 (2005).
- [12] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. *ФТП*, **41** (11), 1281 (2007).

Редактор А.Н. Смирнов

## GaAs structures with gate dielectric on base of the aluminium oxide layers

I.L. Kalentyeva, O.V. Vikhrova, A.V. Zdoroveyshchev, Yu.A. Danilov, A.V. Kudrin

Physico-Technical Research Institute of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** We investigated different types of dielectrics obtained by low-temperature electron-beam sputtering:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layers and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  three-layer composition. The dependence of the electrical resistance on the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer thickness is determined. It was found, that the formation of a three-layer dielectric  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  can increase the range of operating voltages up to 60 V for the gate electrode structures. The possibility of controlling the density of carriers (holes) in the two-dimensional conduction channel GaAs structures by changing the gate voltage using layer structure  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  as a gate insulator is shown.