

Возрастание значений магнитных параметров при увеличении напряжения, при котором были получены образцы, свидетельствует об изменении магнитных доменных структур, что обусловлено изменением структуры Ni NT (увеличением размеров кристаллитов).

Таким образом, на основании результатов исследования показано, что методом электрохимического осаждения в ионно-трековых ПЭТФ-мембранах можно получать массивы Ni NT с заданными размерами, формой, кристаллической структурой стенок и магнитными свойствами.

1. Kros A., Nolte R. J. M., Sommerdijk N. A. J. M. // *Adv. Mater.* 2002. 1779. 14.
2. Hua Z., Yang S., Huang H. // *Nanotechnology.* 2006. 5106. 20.
3. Sehayek T., Lahav M., Popovitz-Biro R. // *Chem. Mater.* 2005. 3743. 17.
4. Kozlovskiy A., Zhanbotin A. [et al.] // *Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* 2015. 663. 365.
5. Yoo B., Xiao F., Bozhilov K. N. // *Adv. Mater.* 2007. 296. 2.
6. Motoyama M., Fukunaka Y., Sakka T. // *Electrochim. Acta.* 2007. 205. 1.

## ПЛАНАРНЫЙ АЛЮМООКСИДНЫЙ ВОЛНОВОД ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ НА КРЕМНИИ

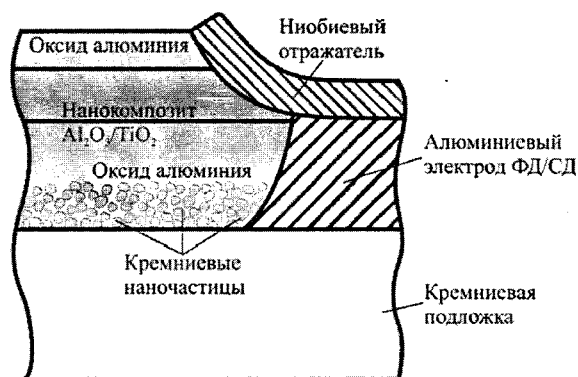
С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Д. А. Сасинович,  
И. В. Тимошевич, В. Е. Борисенко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь, e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by*

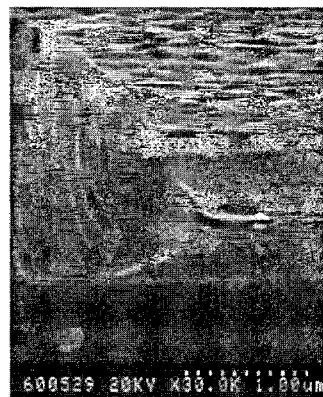
Оптические межсоединения по сравнению с электронными обладают рядом преимуществ, среди которых следует особо отметить быстрдействие и помехоустойчивость. Реализация оптической связи внутри интегральных схем осуществляется при помощи планарных волноводов, соединяющих источники световых сигналов и фотодетекторы. В связи с этим была разработана конструкция планарного алюмооксидного волновода с сердцевинной из нанокompозитного материала  $Al_2O_3/TiO_2$ .

Алюмооксидный волновод изготавливали при помощи последовательного магнетронного распыления трех мишеней: состоящих из алюминия, алюминиево-титанового сплава и снова алюминия. Последовательное прохождение кремниевых подложек под распыляемыми мишенями обеспечивало осаждение многослойной пленки алюминий / алюминий-титан / алюминий с градиентным изменением концентрации атомов титана, максимум концентрации которых находился в центральной части пленки и достигал 25 ат.%. Толщина осажденной пленки составляла 1 мкм.

Поверх многослойной пленки осаждали пленку ниобия толщиной 0,3 мкм. При помощи операций фотолитографии и плазмохимического травления ниобия формировали маску, которую использовали для локального пористого анодирования многослойной пленки. Процесс анодирования проводили



а



б

Рис. 1. Схематическое изображение (а) и РЭМ изображение (б) фрагмента поперечного сечения разработанной конструкции планарного многослойного волновода

в 5 %-ном водном растворе  $H_2SO_4$  при плотности тока  $100 \text{ mA/cm}^2$ . Таким образом, формировали алюминиевые электроды для светодиодов и многослойный алюмооксидный волновод между ними. Схематическое изображение разработанной конструкции волновода представлено на рис. 1, а.

Разработанная конструкция оптоэлектронной ячейки состоит из двух контактов Шоттки между алюминиевыми электродами и кремниевой подложкой, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Нижний слой анодного оксида алюминия содержит кремниевые наночастицы, излучающие свет в режиме лавинного пробоя контакта Шоттки. Один из диодов Шоттки при смещении, превышающем пороговую величину лавинного пробоя, работает как светодиод (СД), второй при электрическом смещении менее напряжения лавинного пробоя функционирует как фотодетектор (ФД). Анодный оксид алюминия выполняет двойную роль. С одной стороны, он выполняет функции световода с сердцевинной, легированной оксидом титана, а с другой – он вместе с кремниевыми наночастицами обеспечивает излучение света, т. е. свет, излучаемый кремниевыми наночастицами, проходит внутри слоя анодного оксида алюминия как по оптическому волноводу.

Микрофотография поперечного сечения сформированной структуры представлена на рис. 1, б. Пористый оксид состоит из гексагонально упакованных трубок, поперечный скол происходит вдоль границ трубок, а не вдоль пор, как это имеет место в пористом оксиде алюминия с обычной структурой в виде «пчелиных сот» [1]. Измеряя толщину исходной многослойной металлической пленки и толщину формируемой оксидной пленки, рассчитывали коэффициент объемного роста. В исследуемых структурах его величина составляла 2–2,5, что существенно отличается от обычного процесса пористого анодирования алюминия, когда этот параметр не превышает величину 1,6 [2]. Именно высокое значение коэффициента объемного роста обеспечивает

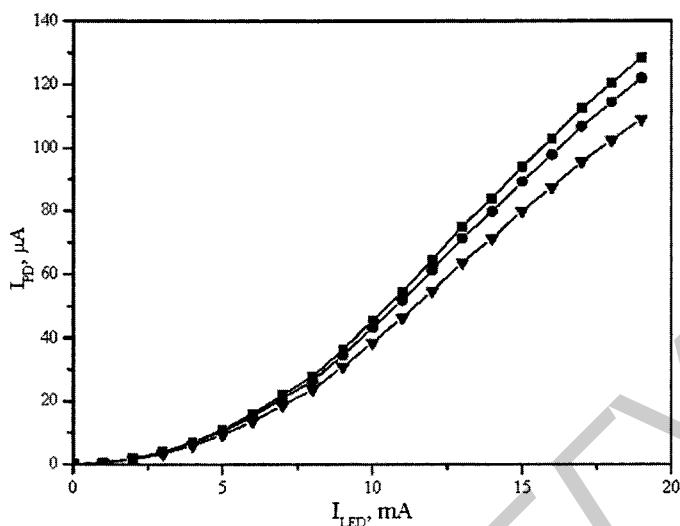


Рис. 2. Зависимости выходного тока через фотодетектор от входного тока светодиода для различных типов алюмооксидного волновода с сердцевинной: квадраты – пористость 2 %, длина 10 мкм; круги – пористость 2 %, длина 100 мкм; треугольники – пористость 20 %, длина 100 мкм

минимальное значение пористости формируемых пленок. Нам удалось получить пленки с пористостью до 1 %.

Оптические потери в волноводных структурах ( $L_{dB}$ ) могут быть определены по формуле:  $L_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(P_o/P_i)$ , где  $P_i$  – мощность оптического сигнала на входе,  $P_o$  – мощность оптического сигнала на выходе. Учитывая то, что оптические потери принято рассчитывать на единицу длины, были проведены измерения выходного сигнала для разных длин волноводных структур (рис. 2). Минимальные оптические потери наблюдаются в случае волноводной структуры, содержащей сердцевину и обладающей минимальной пористостью.

Низкая пористость оксидных пленок, а также наличие внутреннего нанокompозитного слоя, обеспечивающего увеличение показателя преломления до 1,8 [3], позволили снизить оптические потери в формируемых волноводных структурах до 0,8 дБ/см. Достигнутый уровень соизмерим с аналогичными результатами зарубежных исследователей, полученными для алюмооксидных волноводов. Для дальнейшего улучшения этих параметров необходимо уменьшать пористость алюмооксидных пленок и оптимизировать геометрию и оптические параметры сердцевины.

Разработанная конструкция планарного алюмооксидного волновода с сердцевиной из нанокompозитного материала  $Al_2O_3/TiO_2$  позволила снизить оптические потери до 0,8 дБ/см. Продемонстрирована возможность интеграции разработанного волновода со светоизлучающими и фотоприемными устройствами на кремниевом чипе, что является значимым шагом на пути к реализации оптических внутрочиповых межсоединений.

1. Lazarouk S. K. [et al.]. Tubular alumina formed by anodization in the meniscal region // J. Appl. Phys. 2010. 107. 033527.
2. Vrublevsky I. [et al.]. The study of the volume expansion of aluminum during porous oxide formation at galvanostatic regime // Appl. Surf. Sci. 2004. 222. 215.
3. Lazarouk S. K. [et al.]. Nanoporous oxides of refractory metals: fabrication and properties // Phys. Stat. Sol. 2008. C 5. 3690.

## **ОПТИЧЕСКИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ МЕЖДУ КРЕМНИЕВЫМИ КРИСТАЛЛАМИ НА ОСНОВЕ ЛАВИННЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ**

С. К. Лазарук<sup>1</sup>, А. А. Лешок<sup>1</sup>, А. В. Долбик<sup>1</sup>, В. А. Лабунов<sup>1</sup>,  
В. А. Солодуха<sup>2</sup>, С. В. Шведов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь, e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь

Одной из актуальных задач развития интегральной электроники является повышение быстродействия. Замена электронных межсоединений на оптические позволит повысить быстродействие интегральных микросхем за счет устранения резистивно-емкостных задержек металлической разводки. Нами разработана и изготовлена система, обеспечивающая междуциповые оптические межсоединения на основе кремниевых лавинных светодиодов и кремниевой микроканальной пластины со сквозными вертикальными отверстиями. Измерения показали воспроизводимый отклик оптического сигнала лавинных светодиодов, регистрируемый фотодиодами на кремниевом кристалле, не имеющем электрической коммутации с другим кремниевым кристаллом, на котором расположены источники оптического излучения.

Экспериментальные структуры создавали нанесением композиционной пленки алюминия с кремнием толщиной 1,0 мкм на пластины монокристаллического кремния *n*-типа (с удельным сопротивлением 0,3 Ом·см) методом магнетронного распыления. В качестве материалов мишеней использовали сплав алюминия с кремнием, где содержание кремния составляло 30 ат.%. Нанесенные пленки подвергали анодной обработке в 20 %-ном водном растворе ортофосфорной кислоты через предварительно сформированные на их поверхностях фоторезистивные маски. Различные скорости анодирования алюминия и кремния обеспечивали формирование композитной пленки наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу. Неаноодированные области, защищенные фоторезистивной маской, образовывали металлические электроды между проаноодированными областями.

Разработанная конструкция состоит из двух контактов Шоттки, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Слой анодного оксида алюминия содержит кремниевые наночастицы, излу-ча-