

## ЛИТЕРАТУРА

1. V.V. Tuchin Handbook of Optical Biomedical Diagnostics / V.V. Tuchin –Bellingham: SPIE Press, 2002.
2. R.F. Edlich, K.L. Winter, H.W. Lim, M.J. Cox, D.G. Becker, J.H. Horovitz, L.S. Nichter, L.D. Britt, and W.B. Long Photoprotection by sunscreens with topical antioxidants systemic antioxidants to reduce sun exposure //J. Long-Term Effects Med. Implants, 2004, т.14, с.317-340.
3. B. Innes, T. Tsuzuki, H. Dawkins, J. Dunlop, G. Trotter, M.R. Nearn, and P.G. McCormick Nanotechnology and the cosmetic chemist //Cosmetics, Aerosols and Toiletries in Australia, 2002, т.15, с.10-12, с.21-24.
4. I.Meglinski, A.V. Doronin Monte Carlo modeling for the needs of biophotonics and biomedical optics / Advanced Biophotonics: tissue optical sectioning, Edited by V.V. Tuchin, R.K. Wang, Taylor & Francis, 2012.
5. A.P. Popov, J. Lademann, A.V. Priezhev, and R. Myllylä Alteration of skin light-scattering and absorption properties by application of sunscreen nanoparticles: A Monte Carlo study //J. of Quant. Spectr. and Radiat. Transfer, 2011, т.112(11), с.1891-1897
6. I.Krasnikov, A. Seteikin, G. J. Lee, P. Attri, E. H. Choi, Y.W. Kwon Optical and structural properties of nanobiomaterials // J. of Nanoscience and Nanotechnology. –2014. – V.14 (1). –P. 221-49.
7. I.V. Krasnikov, A.P. Popov, A.Yu. Seteikin, R. Myllylä Influence of titanium dioxide nanoparticles on skin surface temperature at sunlight irradiation // Biomed. Opt. Express. –2011. –V.2 (12). – P.3278-3283.
8. S. L. Jacques and L.-H. Wang Monte Carlo modeling of light transport in tissues / Optical Thermal Response of Laser Irradiated Tissue, edited by A. J. Welch and M. J. C. van Gemert, Plenum Press, New York, 1995.

### **ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ВНУТРИЧИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ**

**С. К. Лазарук, А. А. Лешок, В. В. Дудич, В. Е. Борисенко**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
serg@nano.bsuir.edu.by*

Разработаны конструкция и технология изготовления интегрированных оптических и электрических межсоединений на кремнии. В качестве светоизлучающих диодов используются структуры на основе наноразмерного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу. Изготовлена оптопара с коэффициентом преобразования по току 1 %.

В настоящее время 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. Следовательно, возникает необходимость интеграции электронных и оптических межсоединений внутри кремниевого чипа. Нами разработана и изготовлена экспериментальная структура интегрированных электронных и оптических межсоединений на едином кремниевом кристалле, а также исследованы ее характеристики. Полученные результаты представлены в настоящей работе.

Экспериментальные структуры создавали нанесением композиционной пленки алюминия с кремнием и титаном толщиной 1,0 мкм на пластины монокристаллического кремния *n*-типа (с удельным сопротивлением 0,1 Ом·см) методом магнетронного распыления соответствующих составных мишеней. В качестве материалов мишеней использовались алюминий, его сплав с содержанием кремния 40 ат. %, а также алюминиевые мишени со вставками титана. Для градиентного изменения концентрации титана в осаждаемой нанокomпозитной пленке использовали магнетронную систему, позволяющую вести осаждение последовательно с трех распыляемых мишеней: алюминиево-кремниевый сплав, алюминий со вставками титана и чистый алюминий. При такой конфигурации мишеней осаждали пленки с максимальной концентрацией титана в средней их части. Нанесенные пленки подвергали анодной обработке в 2 % водном растворе серной кислоты через предварительно сформированную на их поверхностях фоторезистивные маски. Различные скорости анодирования алюминия и кремния обеспечивали формирование композитной пленки наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу. Непроанодированные области, защищенные фоторезистивной маской, образовывали металлические электроды между проанодированными областями.

Разработанная конструкция состоит из двух контактов Шоттки, 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 [1]. Один из диодов Шоттки при смещении, превышающем пороговую величину лавинного пробоя, работает как светодиод (LED), второй при электрическом смещении менее напряжения лавинного пробоя функционирует как фотодетектор (PD). Анодный оксид алюминия выполняет двойную роль. С одной стороны, он выполняет функции световода (WG) с сердцевиной, легированной оксидом титана, а с другой стороны, он вместе с кремниевыми наночастицами обеспечивает излучение света [2]. То есть свет, излучаемый кремниевыми наночастицами, проходит внутри слоя анодного оксида алюминия как по оптическому волноводу. Схематичное изображение фрагмента поперечного сечения изготовленной экспериментальной структуры интегрированных электронных и оптических межсоединений представлено на рис. 1а, фрагмент сформированной структуры, полученный с помощью растрового электронного микроскопа, представлен на рис. 1б.

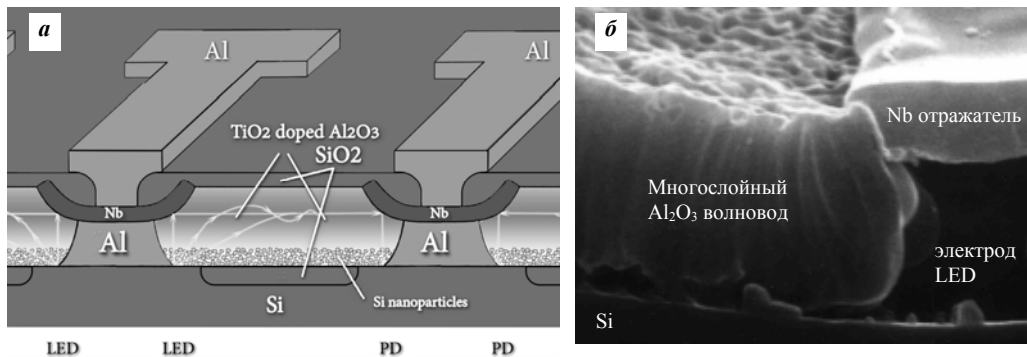
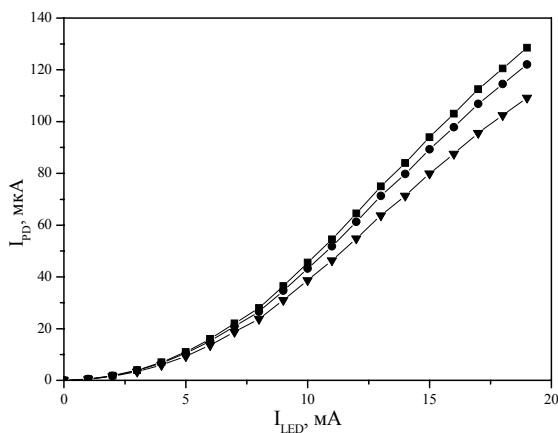


Рисунок 1. – Конструкция экспериментальной структуры интегрированных электронных и оптических межсоединений: а) схематичное изображение; б) микрофотография фрагмента

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 волноводных структур различной длины и пористости (рис. 2). Минимальные оптические потери наблюдаются для волноводных алюмооксидных структур, содержащих сердцевину и обладающих минимальной пористостью.

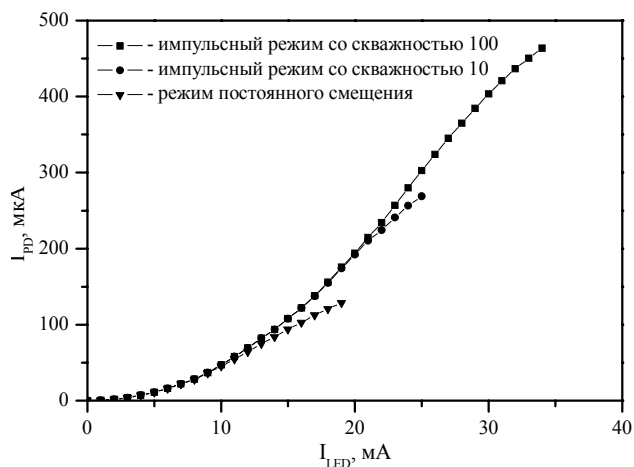


**Рисунок 2. – Зависимости выходного тока через фотодетектор от входного тока светодиода для различных типов алюмооксидного волновода с сердцевинной:**  
**квадраты – пористость 2 %, длина 10 мкм; круги – пористость 2 %, длина 100 мкм;**  
**треугольники – пористость 20 %, длина 100 мкм**

Оценка оптических потерь для лучших образцов показала, что их величина составляет 1 дБ/см. Достигнутый уровень соизмерим с результатами зарубежных исследователей, полученными для алюмооксидных волноводов. Для дальнейшего улучшения этих параметров необходимо уменьшать пористость алюмооксидных пленок и оптимизировать геометрию и оптические параметры сердцевины.

При обратном смещении светодиодов на величину 4 В и выше их излучение регистрировалось интегрированными фотодетекторами. Коэффициент преобразования разработанной оптоэлектронной ячейки, определяемый отношением тока фотодетектора к току светодиода достигает величины 1 %. На рис. 3 представлены зависимости выходного тока через фотодетектор от входного тока светодиода при разных режимах смещения светодиода в сформированных структурах. Эта зависимость близка к квадратичной с переходом в линейную при больших значениях входных токов. При этом переход исследуемой зависимости в линейную наблюдается при разных величинах входного тока для различных режимов работы светодиода: при постоянном токе светодиода линейный участок начинается раньше за счет термического разогрева структуры.

При импульсном режиме работы светодиодов выделяемое тепло частично рассеивается в интервалах между импульсами, не допуская термического разогрева исследуемых структур при относительно небольших входных токах. Поэтому переход в линейную область и необратимый тепловой пробой наблюдаются при более высоких значениях входных токов при максимальной скважности импульсов.



**Рисунок 3. – Зависимость выходного тока фотодетектора от входного тока светодиода при различных режимах питания (длина волновода 10 мкм)**

Таким образом, разработаны конструкция и технология изготовления электронных и оптических межсоединений на кремниевом чипе. Среди основных характеристик разработанной системы необходимо отметить, что коэффициент преобразования по току достигает 1 %, что открывает новые возможности для ее интеграции с классическими межсоединениями на едином чипе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Электрولюминесценция наноструктурированного кремния в матрице анодного оксида алюминия / С.К. Лазарук, Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба, В.А. Лабунюв, А.А. Лешок, В.Е. Борисенко // ФТП. – 2007. – Т. 41, № 9. – С. 1126-1129.
2. On the Route Towards Si-based Optical Interconnects / S.K. Lazarouk, A.A. Leshok, V.E. Borisenko, C. Mazzoleni, L. Pavesi // Microelectron. Eng. – 2000. – Vol. 50, № 1-4. – P. 81–86.

### МЕЖДУЧИПОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНО- И МИКРОСТРУКТУР

**С. К. Лазарук<sup>1</sup>, А. А. Лешок<sup>1</sup>, А. В. Долбик<sup>1</sup>, В. А. Лабунюв<sup>1</sup>,  
В. Б. Высоцкий<sup>2</sup>, С. В. Шведов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
serg@nano.bsuir.edu.by

<sup>2</sup>Унитарное предприятие «Белмикросистемы», Минск, Беларусь

Разработаны конструкция и технология изготовления междучиповых оптических межсоединений на кремнии. В качестве светоизлучающих диодов и фотоприемников используются структуры на основе наноразмерного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу. В качестве световодов используются сквозные отверстия кремниевой микроканальной пластины. Изготовлена экспериментальная структура с коэффициентом преобразования по току 0,3 %.