

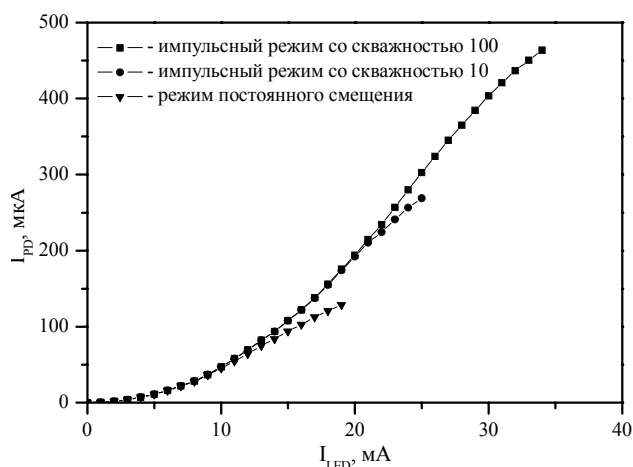


Рисунок 3. – Зависимость выходного тока фотодетектора от входного тока светодиода при различных режимах питания (длина волновода 10 мкм)

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. Электролюминесценция 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. Лазарук¹, А. А. Лешок¹, А. В. Долбик¹, В. А. Лабунюв¹,
В. Б. Высоцкий², С. В. Шведов²**

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
serg@nano.bsuir.edu.by

²Унитарное 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 алюмо-оксидную матрицу. В качестве световодов используются сквозные отверстия кремниевой микроканальной пластины. Изготовлена экспериментальная структура с коэффициентом преобразования по току 0,3 %.

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. Нами разработана и изготовлена система, обеспечивающая междучиповые 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 % 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. 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. Слой анодного оксида алюминия содержит кремниевые наночастицы, излучающие свет в режиме лавинного пробоя контакта Шоттки (LED). Эти же контакты Шоттки при обратном смещении до пробойного состояния (в данном случае до 12 В) чувствительны к внешнему световому сигналу, поэтому могут быть использованы как фотодиоды (PD) [1, 2].

Кроме кремниевых чипов с диодными структурами, способными генерировать и регистрировать оптический сигнал, также изготавливались микроканальные кремниевые пластины толщиной 100–150 мкм со сквозными отверстиями диаметром 5–6 мкм. Расстояние между центрами пор составляет 10 мкм. Такие пластины способны пропускать оптический сигнал через сквозные отверстия с коэффициентом пропускания 15–20 %. Такие микроканальные кремниевые пластины называют интерпозерами, так как с их помощью можно осуществлять коммутацию кремниевых ИС «этажерочного типа», что было продемонстрировано нами ранее при заполнении микроканалов медью [3]. Изготовление интерпозеров осуществлялось при помощи электрохимического анодирования и последующего утончения кремниевых пластин механической полировкой [3].

Экспериментальная структура междучиповых оптических межсоединений представлена на рис. 1. Микросистема состоит из двух кремниевых чипов, на поверхности которых сформированы матрицы диодных структур на основе барьеров Шоттки между алюминиевыми электродами и кремниевой поверхностью. Между лицевыми поверхностями чипов расположена микроканальная кремниевая пластина. Работает экспериментальная структура следующим образом. При использовании обратного электрического смещения на диодах более 12 В имеет место излучение света вдоль алюминиевых электродов. Излучаемый свет проходит через микроканалы промежуточной крем-

ниевой пластины (optical interposer) и на выходе из них регистрируется либо при помощи оптической микроскопии, либо при помощи кремниевого чипа со сформированными диодами, работающими в режиме регистрации оптического сигнала.

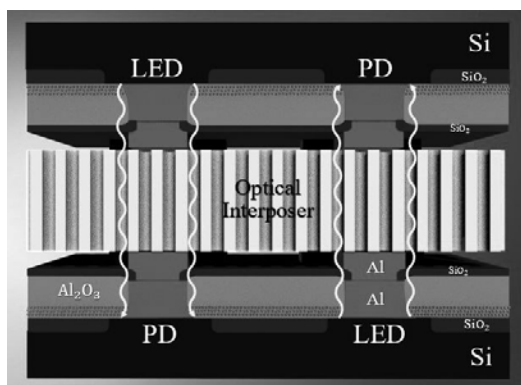


Рисунок 1. – Схематичное изображение экспериментальной структуры межчиповых оптических межсоединений

На рис. 2 представлены РЭМ изображения микроканальной кремниевой пластины, обеспечивающей передачу оптического сигнала в вертикальном направлении относительно поверхности кремниевых чипов. Как видно из рис. 2 сквозные отверстия составляют 20-25 % от всей рабочей поверхности пластины.

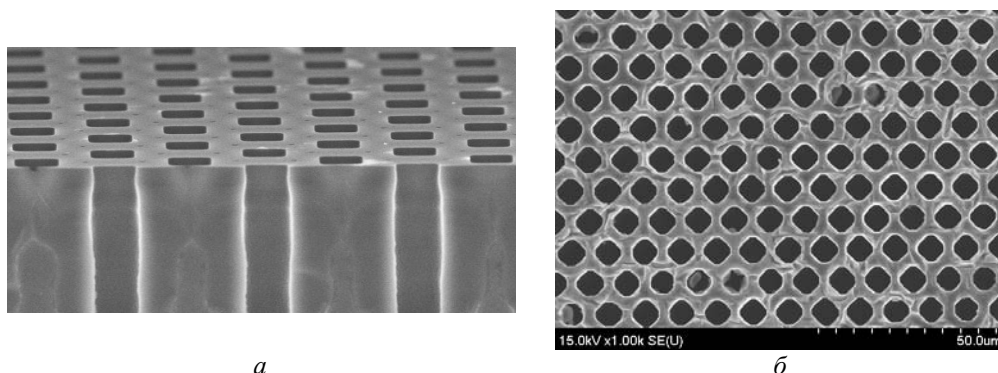


Рисунок 2. – РЭМ изображения микроканальной кремниевой пластины, используемой для оптических межсоединений между кремниевыми чипами: а - вид сверху, б - вид снизу

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики лавинных диодов, работающих в режиме регистрации светового сигнала. Как видно из характеристик оптический сигнал регистрируется в диапазоне обратного смещения от 0 до 12 В.

После превышения обратного смещения 12 В вольт-амперные характеристики со световым экспонированием и без него практически не отличаются, что объясняется появлением собственного светоизлучения в исследуемых структурах. На этом же рисунке представлена вольт-амперная характеристика исследуемых лавинных диодов с экспонированием от внешнего источника света вольфрамовой лампы накаливания, обеспечивающей энергетическую освещенность поверхности 100 мВт/см^2 . Как видно из характеристик, отклик исследуемых диодов на излучение вольфрамо-

вой лампы соизмерим с откликом на излучение лавинного светодиода при напряжении смещения 15 В и токе 30 мА, что свидетельствует о соизмеримости оптического потока обоих источников света.

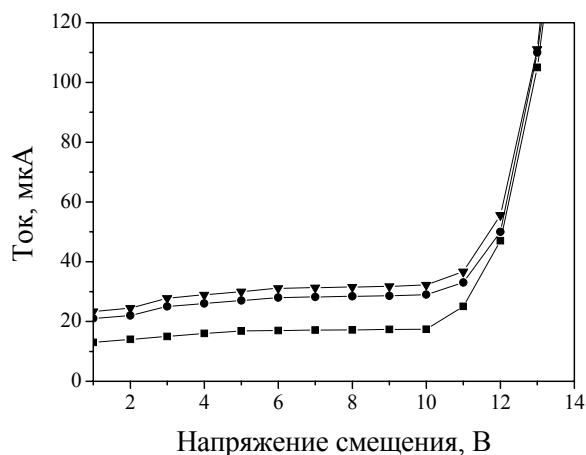


Рисунок 3. – Вольт-амперные характеристики лавинных диодов при различных методах светового экспонирования: квадраты – темновая характеристика, круги – световое экспонирование лавинными светодиодами при токе 30 мА; треугольники - световое экспонирование вольфрамовой лампой

Таким образом, разработаны конструкция и технология изготовления междучиповых оптических межсоединений. Среди основных характеристик разработанной системы необходимо отметить, что коэффициент преобразования по току достигает 0,3 %, что открывает новые возможности для развития кремниевой оптоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects / S.K. Lazarouk, P.V. Jaguiro, A.A. Leshok and V.E. Borisenko // *Physica E.* – 2003. – Vol. 16, № 3-4. – P. 495–498.
3. Формирование сквозных пор в кремниевых подложках для трехмерных металлических межсоединений / С.К. Лазарук, А.В. Долбик, Л.И. Степанова, Т.И. Бодрых, А.С. Турцевич, С.В. Шведов, В.А. Лабунов // *Материалы 22-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012), 10-14 сентября 2012 г. – Севастополь: Вебер, 2012. – С. 665–666.*