

ОБЪЕМНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ И МИКРОКАНАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

© 2018 г. С.К. ЛАЗАРУК, А.А. ЛЕШОК, А.В. ДОЛБИК,
ЛЕ ДИНЬ ВИ, А.Г. ЧЕРНЫХ, В.А. ЛАБУНОВ

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

Введение

Повышение быстродействия устройств интегральной электроники является одной из актуальных задач современности, продиктованных непрерывно возрастающими темпами научно-технического прогресса. Замена электронных межсоединений на оптические позволит повысить быстродействие интегральных микросхем за счет устранения резистивно-емкостных задержек металлической разводки.

В долгосрочной перспективе развития интегральных микросхем значительные ожидания связаны с созданием кремниевой фотоники, основными элементами которой являются источники излучения и фотоприемники на основе кремния, связанные волноводами различных конструкций. Среди преимуществ кремниевой фотоники – ее совместимость с высокоразвитой КМОП-технологией массового производства интегральных микросхем. Классический подход в проектировании устройств кремниевой фотоники состоит в том, что все эти три элемента расположены в горизонтальной плоскости [1-3]. Однако недавно была предложена новая 3D технология [4] и теперь она интенсивно развивается. Разработка промышленной технологии создания приборов 3D кремниевой фотоники способно воплотить в реальность мечту о стремительном развитии будущих поколений информационных и телекоммуникационных систем.

В данной работе представлена разработанная и изготовленная система, обеспечивающая междучиповые оптические межсоединения на основе кремниевых лавинных светодиодов и кремниевой микроканальной пластины со сквозными 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.

Эксперимент

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. После анодирования фоторезистивные маски были удалены с поверхности сформированных структур.

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) [5,6].

Кроме кремниевых чипов с диодными структурами, способными генерировать и регистрировать оптический сигнал, также изготавливались микроканальная 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 %.

Результаты и их обсуждение

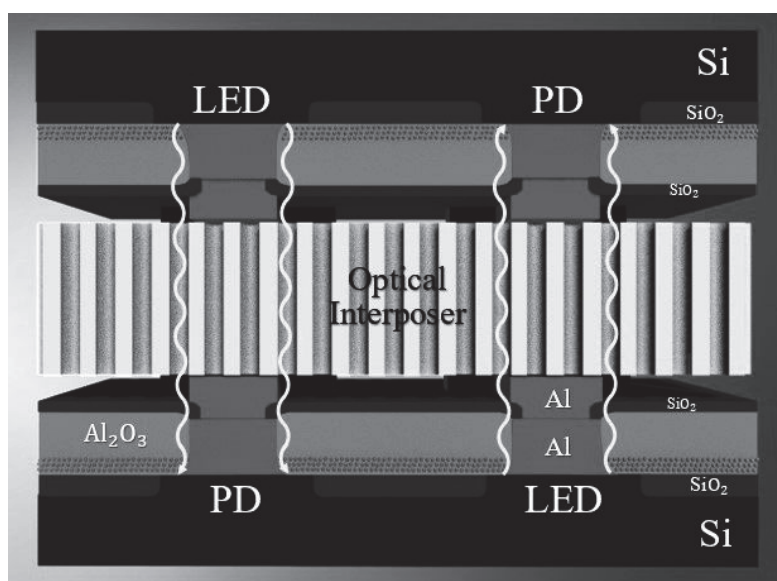


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной структуры междучиповых оптических межсоединений.

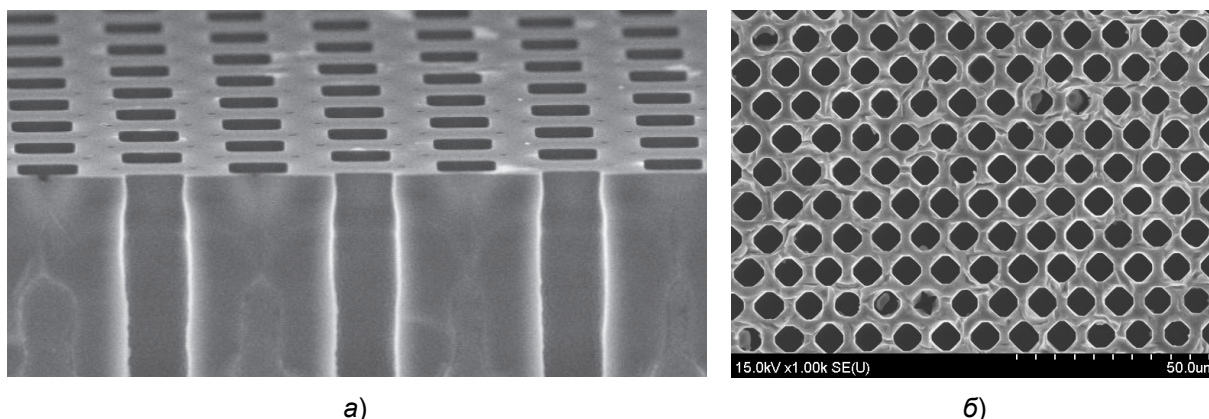


Рис. 2. РЭМ изображения микроканальной кремниевой пластины, используемой для оптических межсоединений между кремниевыми чипами: а) вид сверху; б) вид снизу.

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 экспери-

ментальная 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 кремниевой 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.

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

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.

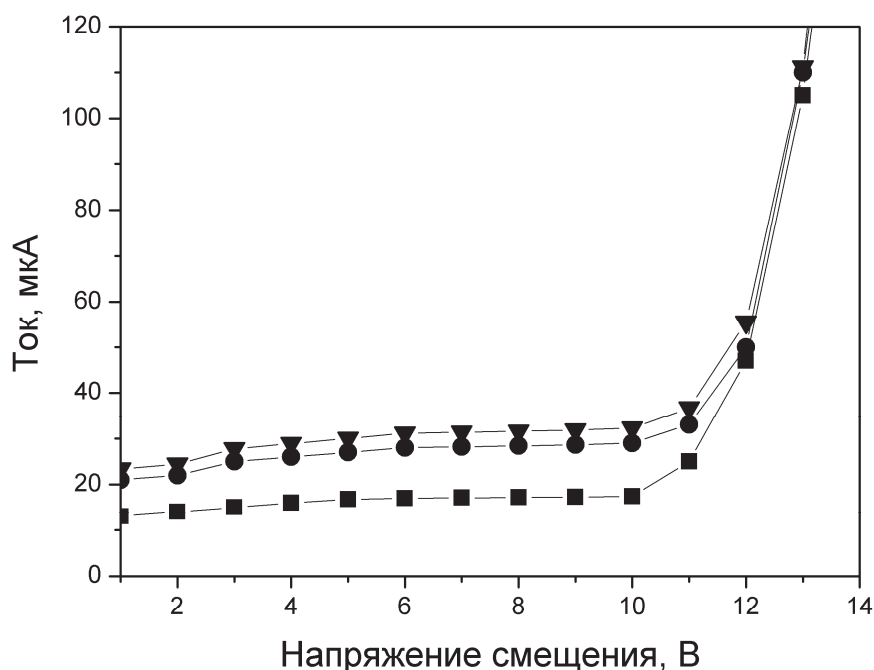


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики лавинных диодов при различных методах светового экспонирования: квадраты – темновая характеристика, круги – световое экспонирование лавинными светодиодами при токе 30 мА; треугольники - световое экспонирование вольфрамовой лампой.

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 вольфрамовой 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.

Заключение

Таким образом, разработаны конструкция и технология изготовления междучиповых оптических межсоединений. Среди основных характеристик разработанной сис-

темы необходимо отметить, что коэффициент преобразования по току достигает 0,1 %, что открывает новые возможности для развития кремниевой оптоэлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Silicon Photonics III / L. Pavesi, D.J. Lockwood eds. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 524 p.
2. *Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Moore S., Smirnov A.* Si-based optoelectronic couple // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. - 2009, v.41, № 6, p. 1094-1096.
3. *Lazarouk S.K., Leshok A.A., Labunov V.A., Borisenko V.E.* Efficiency of avalanche light-emitting diodes based on porous silicon // *Semiconductors*. - 2005, v.39, № 1, p. 136-138.
4. *Лазарук С.К., Лешок А.А., Долбик А.В., Лабунув В.А., Солодуха В.А., Шведов С.В.* Оптические межсоединения между кремниевыми кристаллами на основе лавинных светоизлучающих диодов из наноструктурированного кремния // «Наноструктурные материалы-2016: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2016)» / Материалы V Международной научной конференции, 22-25 ноября 2016 г. Минск. - Минск : Беларуская навука, 2016, с 549-551.
5. *Lazarouk S.K., Leshok A.A., Borisenko V.E., Mazzoleni C., Pavesi L.* On the route towards Si-based optical interconnects // *Microelectronic Engineering*. - 2000, v.50. № 1-4, p. 81-86.
6. *Lazarouk S.K., Jaguiro P.V., Leshok A.A., Borisenko V.E.* Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. - 2003, v.16, № 3-4, p. 495-498.