

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены исследования критической динамики в ряде твердых растворов антисегнетоэлектрик/сегнетоэлектрик и релаксор/антисегнетоэлектрик. Полученные экспериментальные результаты обработаны в рамках модели межмодового взаимодействия. Показано, что такое взаимодействие приводит к возникновению структурной неустойчивости при несоразмерных волновых векторах. На основании указанного подхода разработана модель, описывающая распределение диффузного рассеяния в обратном пространстве. Проанализировано диффузное рассеяние PMN-PSN и подтверждено существование смешанной неустойчивой моды в окрестности M-точки.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00328, <https://rscf.ru/project/22-12-00328/>

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Филимонов А. В. и др. Нанонеоднородные структуры в твердых растворах антисегнетоэлектриков и релаксоров // Доклад на этой конференции.
2. Леонтьев Н., Смотров В. Г., Фесенко Е. Г. Фазовая диаграмма  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ , при  $x < 0,1$  // Известия Академии наук СССР. Неорганические материалы, 1982, т. 18, вып. 3, с. 449.
3. Раевский И. П., и др. Выращивание и исследование монокристаллов твердых растворов сегнетоэлектриков-релаксоров  $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-x(\text{PbSc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3)$  с различной степенью композиционного упорядочения // Кристаллография, 2003, том 48. № 3, б, с. 506.
4. Tagantsev A. K., Vaideeswaran K., Vakhrushev S. B., Filimonov A. V., Burkovsky R. G., Shaganov A., Andronikova D., Rudskoy A. I., Baron A. Q. R., Uchiyama H., Chernyshov D., Bosak A., Ujma Z., Roleder K., Majchrowski A., J.-H. Ko, Setter N. The origin of antiferroelectricity in  $\text{PbZrO}_3$  // Nature Communications 2013 4, Article number: 2229.
5. Burkovsky R. G., Bronwald Yu., Andronikova D., Wehinger B., Krisch M., Jacobs J., Gambetti D., Roleder K., Majchrowski A., Filimonov A. V., Rudskoy A. I., Vakhrushev S. B., Tagantsev A. K. Critical scattering and incommensurate phase transition in antiferroelectric  $\text{PbZrO}_3$  under pressure // Scientific Reports. 2017. 7, 41512.
6. Filimonov A. et al., Mode Coupling at around M-Point in PZT // Materials, 2022, vol 15 #79.
7. Andronikova D. A., Bronwald Iu. A., Leontiev I. N., Leontiev N. G., Chernyshov D. Yu., Filimonov A. V., Vakhrushev S. B. Incommensurate instability and diffuse scattering at Brillouin zone boundary in Zr-rich lead zirconate titanate // Ferroelectrics. 2019, Vol. 538, P. 65–73.

## ФОРМИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФОТОПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ С КРЕМНИЕВЫМ МУЛЬТИПЛЕКСОРОМ

А. Э. Видрицкий<sup>1</sup>, В. Л. Ланин<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Корженевского 16, Минск, Беларусь, e-mail: AVidritskiy@integral.by

<sup>2)</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, e-mail: Vlanin@bsuir.by

Рассмотрен процесс формирования контактных соединений фотоприемной матрицы (ФПМ) и кремниевого мультиплексора (КМ) методом перевернутого кристалла (Flip-chip), когда каждый фоточувствительный  $p-n$ -переход ФПМ соединяется со своей входной ячейкой КМ через столбики связи – бампы. В качестве материала столбиков применен индий благодаря его хорошей адгезии к контактным площадкам

КМ и ФПМ, пластичности и механической прочности контактных соединений. Установлены оптимальные режимы процесса присоединения кристаллов оплавлением индиевых бампов на монтажной станции Fineplacer Sigma.

**Ключевые слова:** фотоприемная матрица; кремниевый мультиплексор; индиевые бампы; оплавление.

## FORMATION OF CONTACT CONNECTIONS OF A PHOTORECEPTOR MATRIX WITH A SILICON MULTIPLEXER

A. E. Vidritsky<sup>1</sup>, V. L. Lanin<sup>2</sup>

---

<sup>1)</sup> «INTEGRAL» JSC- Managing Company of INTEGRAL Holding,  
Korzhenevskogo 16, Minsk, Belarus

<sup>2)</sup> Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Brovki Str 6, Minsk, Belarus  
Corresponding author: A. E. Vidritsky (AVidritskiv@integral.by)

The process of forming contact connections of a photodetector matrix (PPM) and a silicon multiplexer (CM) by the flip-chip method is considered, when each photosensitive  $p-n$ -junction of the PPM is connected to its input cell of the CM through communication columns - bumps. Indium was used as the material of the columns due to its good adhesion to the contact pads of the KM and FPM, plasticity and mechanical strength of the contact joints. The optimal parameters for the process of joining crystals by reflowing indium bumps at the Fineplacer Sigma mounting station were established.

**Key words:** photodetector matrix; silicon multiplexer; indium bumps; melting.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные ИК фотоприемные устройства (ИК ФПУ) состоят из кремниевого мультиплексора (КМ) и фотоприемной матрицы (ФПМ). Сборка осуществляется методом перевернутого кристалла (Flip-chip), когда каждый фоточувствительный  $p-n$ -переход ФПМ соединяется со своей входной ячейкой КМ через столбики связи – бампы [1]. В качестве материала столбиков чаще всего применяют различные припои, а также индий благодаря его хорошей адгезии к контактными площадкам КМ и ФПМ и пластичности как при рабочей температуре ФПУ (77–100)К так и комнатной температуре. Индиевые столбы обеспечивают также и механическую прочность гибридной сборки фотоприемников.

Естественный химический процесс окисления индия приводит к формированию на поверхности бампов окисной пленки. Поэтому необходимо при сдавливании бампов в процессе сборки, когда происходит их совместная деформация, добиться разрушения пленки. Сформированные методом фотолитографии бампы имеют плоскую контактируемую поверхность большой площади, и для начала процесса деформации таких столбиков необходимо гораздо большее давление, чем для бампов сферической и полусферической формы [2]. При деформации бампов эта пленка должна разрушаться и обеспечивать соприкосновение чистого индия. Но в случае с толстыми пленками их жесткость препятствует деформации бампа и соединению чистого индия. Одним из решений данной проблемы является оплавление бампов с удалением поверхностной окисной пленки. При оплавлении бампы приобретают сферическую

форму, что способствует более сильной деформации в процессе монтажа и разрушению окисной пленки.

Цель работы – разработать методику оплавления индиевых бампов при сборке фотоприемной матрицы с кремниевым мультиплексором.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Напыление бампов проводилось на установке электронно-лучевого напыления STE EB71M: высота бампа КМ составляет 5 мкм, ФПМ – 1 мкм. Фотография бампов КМ показана на рис. 1.

Отработка процесса присоединения кристаллов проводилась на монтажной станции Fineplacer Sigma, позволяющей осуществлять посадку кристаллов с высокой точностью. Максимальное усилие прижатия кристалла на станции в имеющейся конфигурации – 40 Н. Исходя из литературных источников такого усилия достаточно для присоединения методом flip-chip кристаллов с количеством контактов около 100 000. В используемых тестовых матрицах количество контактов составляет 107 226. Кроме совмещения и сжатия, монтажная станция Fineplacer Sigma позволяет в процессе посадки осуществлять нагрев кристаллов сверху и снизу до 400 °С.

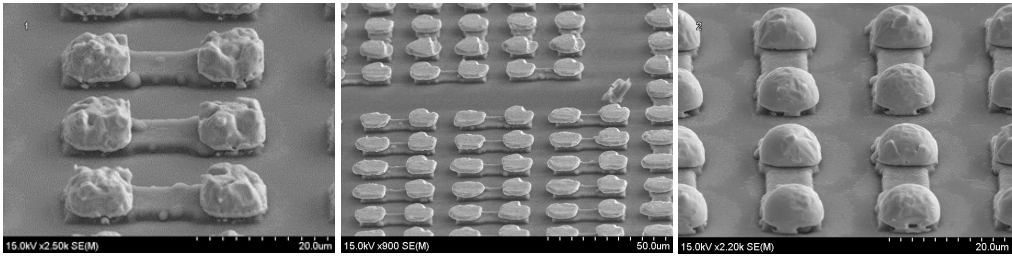
Первая попытка соединения кристаллов проводилась при следующих режимах: усилие сжатия – 40 Н (время нарастания усилия 4 с), время сжатия 3 минуты, нагрев во время сжатия – 200 °С. Температура нагрева выбиралась с учетом того, что температура плавления индия равна 156,6 °С. После сборки в этих режимах трех образцов проводился контроль, результаты которого показали отсутствие электрического контакта. Вероятной причиной этого может быть разновысотность бампов, что при недостаточности усилия сжатия приведет к наличию зазоров между бампами и, следовательно, к отсутствию замыкания цепи. Также причиной может быть оксидная пленка на поверхности бампов.

Анализ разъединенных кристаллов показал, что в процессе соединения произошла деформация всех бампов верхнего кристалла (рис. 2). Следовательно, зазоров между бампами нет, разновысотность незначительная.

Образцы были подвергнуты испытанию на разрыв. Силы разрыва по нормали к поверхности кристалла составила 10 Н. При осмотре внешнего вида разорванных кристаллов установлено, что соединение произошло не по всей площади кристаллов. На отдельных участках кристалла произошло качественное соединение, на некоторых произошла только деформация бампов, без их сплавления.

Затем в малогабаритной вакуумной печи оплавления RSS-160-S в парах муравьиной кислоты проведено оплавление бампов КМ до приобретения ими полусферической формы (рис. 3), процесс проводился по следующей методике:

- продувка камеры азотом в течение 20 с;
- нагрев образца КМ до температуры 130 °С в парах муравьиной кислоты (4 л/мин);
- выдержка при температуре 130 °С в парах муравьиной кислоты в течение 5 минут;
- продув камеры азотом в течение 1 минуты;
- нагрев до температуры 162 °С и выдержка в течение 20 минут в вакууме ( $\sim 10^{-1}$  мбар);
- охлаждение до комнатной температуры с продувкой камеры азотом.



**Рисунок 1. Внешний вид бампов КМ**

**Рисунок 2. Внешний вид бампов после монтажа**

**Рисунок 3. Бампы полусферической формы**

Бампы ФПМ имеют плоскую форму и их оплавление не требуется. Однако, для уменьшения толщины оксидной пленки кристаллы ФПМ освежены в парах муравьиной кислоты при температуре 130 °С в течение 5 минут.

После оплавления и освежения кристаллов проведен ряд экспериментов для определения оптимальных режимов и методики оплавления бампов. Наиболее оптимальными параметрами являются следующие: усилие сжатия – 40 Н при скорости повышения нагрузки до 3 Н/с) подъем температуры кристаллов до 200 °С со скоростью 20°/с, время выдержки – 5 минут.

### **ВЫВОДЫ**

В процессе отработки процесса соединения кристаллов методом Flip-chip проведены эксперименты с вариацией методик и режимов, а также методов обработки поверхностей, в том числе с оплавлением индиевых столбиков до полусферических форм для увеличения площади соединения при необходимом усилии сжатия. По результатам проведенных экспериментов получены следующие результаты:

- частичная деформация бампов, отсутствие сплавления и электрического контакта в результате образования оксидной пленки на индиевых бампах;
- полное оплавление бампов, образование электрического контакта при обработке поверхности бампов в парах муравьиной кислоты

Наиболее вероятными факторами, препятствующим надежному контактированию, являются:

- высокое сопротивление между слоями Al/Ti/Ni/In;
- разноразность индиевых столбиков по площади кристалла;
- образование на поверхности индиевых столбиковых контактов оксидной пленки.

Оптимальными параметрами процесса формирования контактных соединений являются:

- усилие прижатия – 40 Н при скорости повышения нагрузки около 3 Н/с,
- подъем температуры до 20 °С сверху и снизу со скоростью 20 К/с,
- время выдержки – 5 минут.

При этом необходима обработка поверхности бампов муравьиной кислотой, контроль толщины оксидной пленки методом «мягкого зонда». Необходимо также изготовить пластины с образцами матриц с увеличенной высотой бампов, чтобы исключить отсутствие физического и электрического контакта между соответствующими бампами из-за их разноразности и возможной не параллельности соединяемых кристаллов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ли, Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и flip chip технологии / Н.Ч. Ли. – М.: Издательский дом «Техногино», 2006. – 392 с.
2. Оплавленные индиевые столбы в технологии сборки ИК ФПУ / А. Р. Новоселов [и др.] // Прикладная физика. – 2010. – № 5. – С. 77–80.

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ОПТИКО- МАГНИТОРЕКОМБИНАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

**Р. И. Воробей, О. К. Гусев, А. И. Свистун, К. Л. Тявловский, Л. И. Шадурская**

---

*Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 63,  
220013 Минск, Беларусь,  
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Рассмотрена структура комбинированного оптико-магнитного преобразователя, который дополняет особенности магниторекомбинационных преобразователей свойствами фотоприёмников на основе полупроводников с глубокой многозарядной примесью. Использование таких структур позволяет получить новые функциональные свойства магниторекомбинационных одноэлементных преобразователей и измерительных преобразователей оптической диагностики на их основе.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический преобразователь; магниторекомбинационный преобразователь; многозарядная примесь; оптическая диагностика.

## THE MAGNETORECOMBINATIONAL COMBINED OPTICS CONVERTER

**R. I. Vorobey, O. K. Gusev, A. I. Svistun, K. L. Tyavlovsky, L. I. Shadurskaya**

---

*Belarusian National Technical University, Nezavisimosti av. 63, 220013 Minsk, Belarus  
Corresponding author: K. L. Tyavlovsky (ktyavlovsky@bntu.by)*

The structure of the combined optiko-magnetic converter which supplements features of magnetorecombinational converters with properties of photodetectors on the basis of semiconductors with deep multicharging impurity is considered. Use of such structures allows to receive new functional properties of magnetorecombinational single-element converters and measuring converters of optical diagnostics on their basis.

**Key words:** photoelectric converter; magneticorecombinational converter; multiply charge impurity; optical diagnostics.

## ВВЕДЕНИЕ

Наибольший интерес, с точки зрения применения в измерительных преобразователях систем оптической диагностики, представляют фотоприемники, способные осуществлять одновременное измерение нескольких параметров как оптического излучения, так и воздействий с другой физической природой [1–3]. Оптический и магнитный способы измерений широко используются как основа при построении