

УДК 621.382.049.77.002

Оплавленные индиевые столбы в технологии сборки ИК ФПУ

А. Р. Новоселов, И. Г. Косулина, А. Г. Паулиш, Н. Б. Кузьмин,
В. В. Васильев, Н. А. Валишева

В работе продемонстрировано использование оплавленных столбов для гибридной сборки фотоприемников в составе фотоприемной матрицы и кремниевого мультиплексора. Усилие на разрыв гибридных сборок фотоприемников с оплавленными индиевыми столбами на кремниевых мультиплексорах и неоплавленными столбами на фоточувствительных матрицах размерностью 128×128 составляло (27 ± 1) Н при диаметре индиевых столбов 20 мкм сборки, если сборка производилась при температуре 120 °С.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: фотоприемник, фотоприемная матрица, кремниевый мультиплексор, индиевый столб, оплавленный.

Введение

Современные ИК фотоприемные устройства (ИК ФПУ) состоят из кремниевого мультиплексора и фотоприемной матрицы (ФПМ). Обработку аналоговых сигналов с ФПМ и коммутацию их на выход ИК ФПУ осуществляет кремниевый мультиплексор (КМ). Для диапазона 8—14 мкм обычно применяют узкозонные полупроводниковые материалы, например МЛЭ КРТ, в объеме которого сформированы *p-n*-переходы. Сборка осуществляется методом перевернутого кристалла (*flip-chip* технология), когда каждый фоточувствительный *p-n*-переход ФПМ соединяется со своей входной ячейкой КМ через столбы связи. В качестве материала для столбов связи чаще всего применяется индий благодаря его хорошей адгезии к контактными площадкам КМ и ФПМ и пластичности как при температуре работы ФПУ (77—100 К), так и комнатной температуре (300 К). Индиевые столбы обеспечивают также и механическую прочность гибридной сборки фотоприемников.

Поэтому особые жесткие требования предъявляются к качеству соединения столбов между собой.

Процесс соединения ФПМ и КМ осуществляется следующим образом. Индиевые столбы формируются на ФПМ и КМ методом фотолитографии. Естественный химический процесс окисления индия приводит к формированию на поверхности индиевых столбов пленки, толщина которой увеличивается при хранении на воздухе. Поэтому необходимо при сдавливании индиевых столбов в процессе сборки, когда происходит их совместная деформация, добиться разрушения пленки. При этом должна образовываться сетка трещин в окисной пленке, чистый индий из объема столба выдавливается через трещины, контактирует с чистым индием ответного столба и происходит так называемая холодная сварка. Сформированные методом фотолитографии столбы имеют плоскую контактируемую поверхность большой площади, и для начала процесса деформации таких столбов необходимо гораздо большее давление, чем для столбов сферической или полусферической формы. Ограничение на прикладываемое давление в процессе сборки определяет ФПМ (CdHgTe), выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ КРТ). Прикладываемое давление не должно превышать 3—4 кгс/мм² [1] и, следовательно, для получения качественного соединения между столбами необходимо, чтобы разрыв окисных пленок на столбах начинался сразу при приложении минимального давления в установках *flip-chip*.

Цель данной работы — показать преимущество применения для сборки методом перевернутого кристалла (*flip-chip*-технология) оплавленных индиевых столбов полусферической формы на КМ и неоплавленных столбов на ФПМ.

Новоселов Андрей Рудольфович, научный сотрудник.
Косулина Ирина Григорьевна, ведущий инженер-технолог.
Паулиш Андрей Георгиевич, старший научный сотрудник.
Кузьмин Николай Борисович, ведущий инженер-технолог.
Васильев Владимир Васильевич, зав. лабораторией.
Валишева Наталья Александровна, старший научный сотрудник.

Институт физики полупроводников СО РАН.
Россия, 630090, Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13.
Тел. 333-10-79. E-mail: novoselov@thermo.isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 17 октября 2009 г.

© Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Паулиш А. Г.,
Кузьмин Н. Б., Васильев В. В., Валишева Н. А., 2010

Влияние поверхностной плёнки на качество сварки

Поверхностная окисная пленка In_2O_3 имеет аморфную структуру в отличие от чистого индия, имеющего кристаллическую структуру. В зависимости от ее толщины она может из-за своей жесткости препятствовать деформации индиевых столбов в процессе сборки. Для упрощения мы вводим понятия тонкая и толстая поверхностная пленка. Жесткость тонкой пленки не препятствует деформации индиевых столбов, она легко разрывается, а толстая пленка препятствует деформации. На рис. 1 представлена фотография сварки индиевых столбов с такой пленкой, полученная методом РЭМ. Сборка осуществлялась при температуре 130°C .

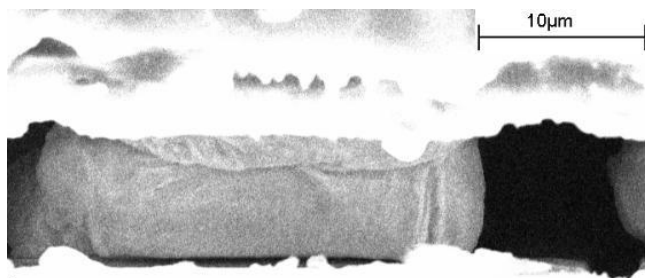


Рис. 1. РЭМ-фотография сборки, когда неоплавленные индиевые столбы имеют поверхностную пленку, не препятствующую деформации, и сварки столбов во время сборки ФПМ с КМ

При сдавливании столбов с толстой окисной пленкой ее жесткость препятствует деформации столба и, следовательно, разрыву пленки в области контакта столбов. Образуются мелкие, часто не совмещенные между собой трещины в поверхностной окисной пленке. Чистый индий выдавливается из объема столбов и уходит в сторону боковых поверхностей. Форма столбов меняется слабо. Сварка происходит только в области языков чистого индия. На рис. 2 представлена фотография такой сборки. "Язык" индия, выдавленного из объема столбов, указан стрелкой. На рис. 3 представлен этот же столб, что и на рис. 2, после разрыва сборки. Из фотографии видно, что на представленном столбе при деформации во время сдавливания не произошло разрушения поверхностной окисной пленки по всей поверхности столба, и видимый "язык" чистого индия был выдавлен из одиночной трещины в окисной поверхностной пленке столба.

Таким образом, из-за различия в жесткости (толщине) поверхностных пленок возникает неопределенность в значениях давления, требуемого для сдавливания в процессе сборки, т. е. при рабочем давлении во время сборки может происходить сварка столбов или только их частичная деформация. Одно из решений данной проблемы — это

оплавление индиевых столбов перед сборкой с удалением поверхностной окисной пленки, препятствующей формированию полусферической формы столбов.

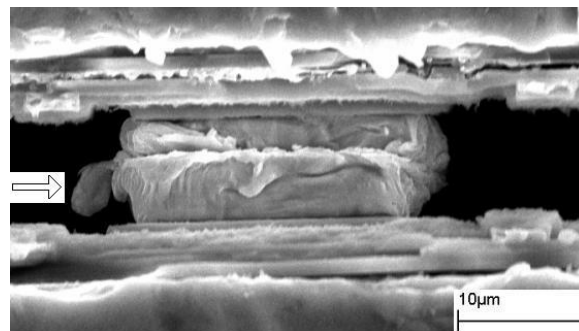


Рис. 2. РЭМ-фотография сборки, когда неоплавленные индиевые столбы имеют жесткую (толстую) поверхностную пленку, препятствующую деформации, и сварки столбов во время сборки ФПМ с КМ. Область выдавливаемого из объема индия показана стрелкой

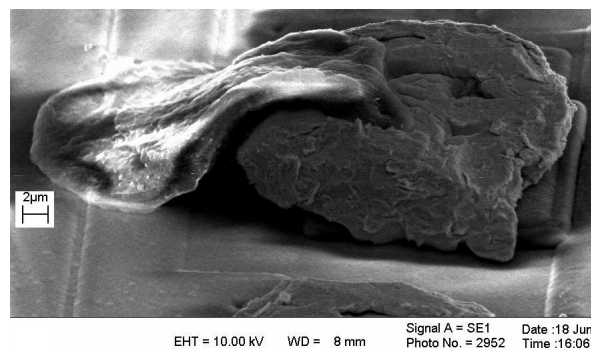


Рис. 3. РЭМ-фотография индиевого столба после разрыва сборки, представленной на рис. 2

Формирование оплавленных индиевых столбов

Оплавление чистого индия обычно осуществляется при температурах $157\text{--}160^\circ\text{C}$ в высоком вакууме. Если на поверхности индиевых столбов существует окисная поверхностная пленка, препятствующая образованию полусферической формы, то оплавления таких столбов можно добиться повышением температуры до $200\text{--}300^\circ\text{C}$ [2].

Авторы работы разработали методы удаления пленки окисла с поверхности индиевых столбов для понижения температуры оплавления: жидкостным химическим травлением или обработкой в водороде.

В первом случае использовали водные растворы серной или азотной кислоты, которые эффективно удаляют оксиды индия с поверхности. При этом происходит только незначительное подтравливание поверхности индиевого столба.

Второй метод разрушения окисной поверхностной пленки основан на восстановлении индия из окисла In_2O_3 водородом при температурах $200\text{--}300^\circ\text{C}$ [3]. Нами была разработана методика очистки столбов водородом при температурах 150--

200 °С непосредственно перед процессом оплавления. Отметим, что увеличение температуры до 300—350 °С при обработке водородом приводит к возникновению полостей в индиевом столбе, приводящих к крупинчатости столба, рассыпающегося в процессе сдавливания. По-видимому это связано с тем, что водород проникает в объем индия по межзеренным границам и вытравливает полости в нем за счет образования при высоких температурах летучего окисла одновалентного индия [3].

Использование оплавленных до полусферической формы индиевых столбов на ФПМ и КМ показало, что при сборке фотоприемного модуля процесс сварки развивается на значительно меньшей площади, чем площадь основания столба. Поэтому применение таких столбов предполагает сплавление столбов (при температуре 156,6 °С) после сборки. Это не может быть использовано для сборок фоточувствительных модулей на основе МЛЭ КРТ. Для них была разработана технология сборки, когда оплавление осуществляется только на КМ. При таком методе индиевые столбы на кремниевой микросхеме (исходная высота 5 мкм) оплавляются до полусферической формы и имеют высоту 9 мкм (на ФПМ индиевые столбы высотой 5 мкм). На рис. 4 представлена РЭМ-фотография оплавленных индиевых столбов на КМ.

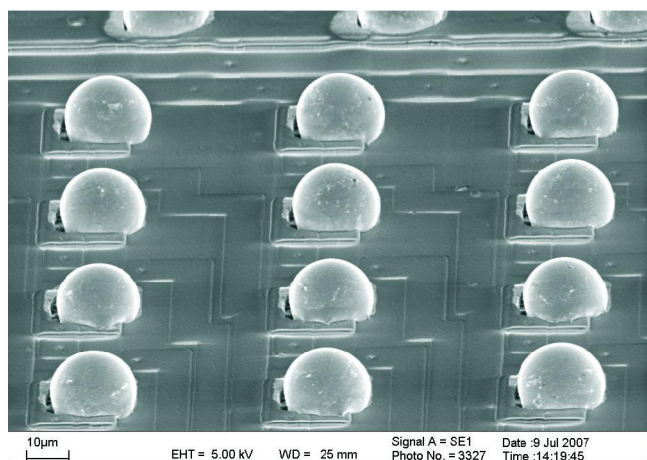


Рис. 4. РЭМ-фотография оплавленных индиевых столбов на КМ

Характерной особенностью такого метода сборки является то, что область сварки равна диаметру оплавленных столбов по основанию и, следовательно, усилие на разрыв таких сборок совпадает с усилием на разрыв сборок с неоплавленными столбами. Экспериментально определенное усилие на разрыв таких фотоприемных устройств размерностью 128×128, осуществляемое при температуре 110 °С устройством, аналогичным представленному в работе [4], составляло (27±1) Н при диаметре индиевого столба 20 мкм. Сборка фоточувствительного модуля осуществлялась при тем-

пературе 120 °С. На рис. 5 представлена РЭМ-фотография индиевых столбов после разрыва имитации сборки, состоящей из 2 КМ, размерностью 128×128. Вверху показаны оплавленные, внизу — неоплавленные индиевые столбы. В то время как усилие на разрыв фоточувствительного модуля, размерностью 128×128 с оплавленными столбами на КМ и ФПМ, собранных при температуре 120 °С, составляло всего 4 Н при той же размерности, максимально зарегистрированное нами усилие на разрыв фоточувствительных модулей после сплавления столбов при температуре 157 °С, составляло 36 Н (размерность 128×128 при диаметре индиевого столба 20 мкм).

Таким образом, фотоприемные модули, собранные с оплавленными столбами на КМ и неоплавленными столбами на ФПМ, требуют усилие на разрыв, близкое к максимально возможному.

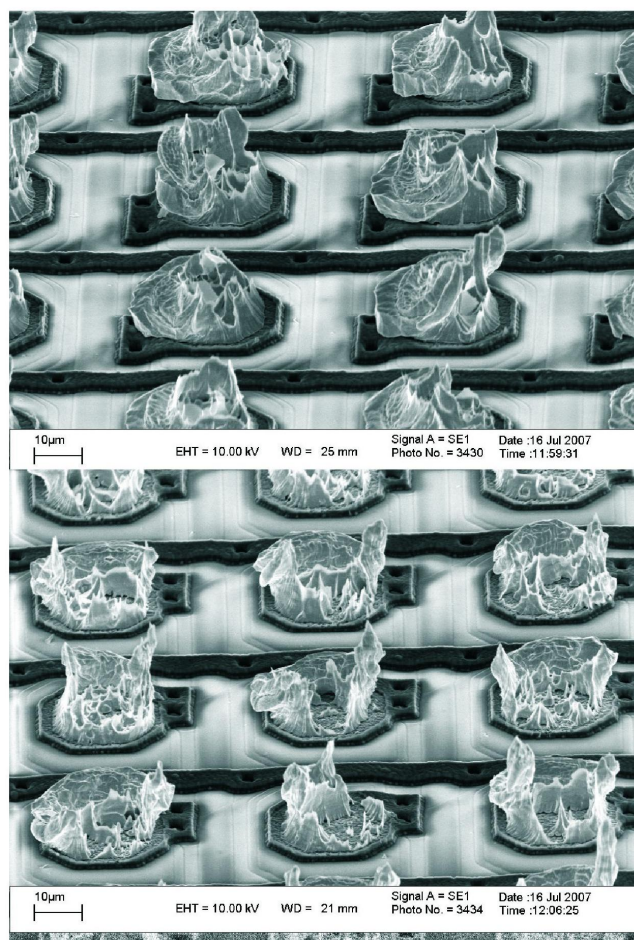


Рис. 5. РЭМ-фотография разрыва сборки оплавленных и неоплавленных индиевых столбов.

Верхняя фотография — оплавленные столбы.
Нижняя фотография — неоплавленные столбы

Оплавление столбов позволяет также решить проблему отклонения технологических процессов при напылении индиевых пленок, приводящее к различной жесткости индиевых столбов. В эксперименте использовались КМ размерностью 320×256 с ша-

гом 30 мкм, размер индиевого столба 14×14 мкм. Напыление индия осуществлялось на трех разных установках вакуумного напыления индия. После напыления индиевой пленки и формирования индиевых столбов на КМ методом фотолитографии к индиевым столбам прикладывалось усилие, равное 323 мкс на столб с выдержкой под грузом 10 мин. Под действием прикладываемого усилия размеры сторон столбов изменились на 19, 28 и 34 % в зависимости от установки напыления.

В процессе оплавления индиевого столба происходит удаление загрязнений из объема, увеличивающего жесткость столбов. Одновременно удаляются неоднородности плотности индия в объеме индиевого столба. Столбы после их оплавления на КМ, описанные выше, показали одинаковое изменение размера стороны — 17 мкм после прикладывания усилия 323 мкс на один столб с выдержкой под грузом 10 мин.

Кроме того, применение данной технологии позволяет после сборки, если она не удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям со стороны ФПМ, разорвать сборку, оплавить повторно индиевые столбы на КМ и снова использовать КМ для следующей сборки. На рис. 6 представлена РЭМ-фотография восстановленных столбов после разрыва сборки и повторного оплавления.

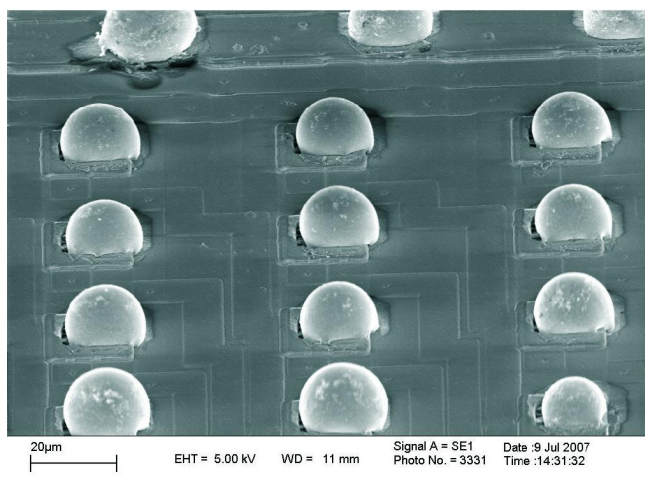


Рис. 6. РЭМ-фотография столбов на КМ после разрыва сборки и восстановления формы столбов оплавлением

Заключение

Проведенное исследование режимов предварительной обработки и последующего оплавления индиевых столбов перед сборкой на автоматических установках, использующих метод перевернутого кристалла, показало следующие важные технологические результаты.

- Процесс оплавления индиевых столбов в вакууме с удаленной окисной поверхностной пленкой методами, описанными в нашей работе, позволяет получать индиевые столбы в форме полусферы при температурах 156,6 °С с воспроизводимыми механическими свойствами независимо от механических свойств исходных столбов. Это позволяет получать повторяемость качественной сварки индиевых столбов без варьирования величины прикладываемого давления.

- Оплавление индиевых столбов на КМ перед сборкой позволяет из-за изменения формы получать высокие столбы, так при размерах столба 20×20×5 мкм оплавленный столб имеет размеры Ø20×9 мкм.

- Применение оплавленных индиевых столбов (имеющих форму полусферы) на КМ позволяет в паре с неоплавленными столбами на ФПМ получать качественную сварку по всей площади столба с усилием на разрыв (27±1) Н (размерность 128×128 при диаметре индиевого столба 20 мкм). Это значительно повышает надежность ФПУ из-за увеличения срока его жизни при термоциклировании от 77 до 300 К во время эксплуатации.

Литература

1. Romashko L. N., Klimenko A. G., Ovsyuk V. N., Vasilyev V. V., Voinov V. V., Plotnicov A. E. // Phys. Stat. Sol. (a) 186. 2001. No. 3. P. 445.
2. Chu K. M., Lee J. S., Cho H. S., Rho B. S., Park H. H., Jeon D. Y. // Jap. J. Appl. Phys. 2004. V. 43. No. 8B. P. 5922.
3. Рему Г. Курс неорганической химии. — М.: ИЛ, 1963.
4. Airoidi A., Alimonti G., Amati M., Andrezza A., Bulgheroni A., Caccia M., Giugni D., Kuciewicz W., Lari T., Meroni C., Ragusa F., Troncon C., Vegni G. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2005. A 540. P. 259.

Use of the indium bumps reflowing for the IR FPA assembly technology

A. R. Novoselov, I. G. Kosulina, N. B. Kuzmin, A. G. Paulish, V. V. Vasilyev, N. A. Valisheva

Institute of Semiconductor Physics, 13 Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: novoselov@thermo.isp.nsc.ru

In this paper, we describe a method of reflowing the indium bumps on silicon circuit. This method produces indium bumps in form of sphere or semi-sphere on silicon circuit, which paired to the unreflowed bumps on photodiodes array. It allows to obtain the binding of high quality. Another significant advantage of reflowed indium bumps is stability of mechanical characteristics not depending on ones of initial bumps that is important for automatic assembly systems.

PACS: 85.60.-q

Keywords: photodetector, photodiodes array, indium bumps, reflowed, method.

Bibliography — 4 references.

Received October 17, 2009