

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА СЕНСОРІВ

## SENSORS PRODUCTION TECHNOLOGIES

---

---

УДК 621.382.049.77.002

### ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИНДИЕВЫХ СТОЛБОВ ДЛЯ СБОРКИ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ ПЕРЕВЕРНУТОГО КРИСТАЛЛА

*А. Г. Паулиш, А. М. Бикташов, Н. Б. Кузьмин,  
И. Г. Косулина, А. Р. Новоселов*

Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13,  
тел.: +7(383)330-88-07, факс: +7(383) 333-27-71. e-mail: paulish@thermo.isp.nsc.ru

#### Аннотация

#### ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИНДИЕВЫХ СТОЛБОВ ДЛЯ СБОРКИ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ ПЕРЕВЕРНУТОГО КРИСТАЛЛА

*А. Г. Паулиш, А. М. Бикташов, Н. Б. Кузьмин, И. Г. Косулина, А. Р. Новоселов*

В работе исследованы свойства индиевых столбов, используемых для сборки гибридных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ИК-диапазона на основе InAs, CdHgTe и кремниевого коммутатора. Показано, что индиевые столбы, изготовленные вакуумным напылением и последующей фотолитографией, содержат поверхностный слой более жесткий, чем объемный индий. Данный слой обладает низкими адгезионными свойствами и препятствует холодной сварке индиевых столбов при сборке МФПУ. Разработанные в данной работе методы прецизионного удаления поверхностного слоя позволили более чем на порядок увеличить силу адгезии столбов и, тем самым, увеличить надежность фотоприемного устройства.

**Ключевые слова:** индиевый столб, адгезия, метод перевернутого кристалла, матричное фотоприемное устройство, ИК детекторы.

#### Анотація

#### ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБКА ІНДІЄВИХ СТОВПІВ ДЛЯ ЗБІРКИ МАТРИЧНИХ ФОТОПРИЙОМНИХ ПРИБОРІВ МЕТОДОМ ПЕРЕВЕРНЕНОГО КРИСТАЛА

*А. Г. Пауліш, А. М. Бікташов, Н. Б. Кузьмін, І. Г. Косуліна, А. Р. Новосьолов*

У роботі досліджені властивості індієвих стовпів, що використовуються для збірки гібридних матричних фотоприйомних пристроїв ІЧ-діапазону на основі InAs, CdHgTe і кремнієвого комутатора. Показано, що індієві стовпи, виготовлені вакуумним напиленням і наступною фотолітографією, містять більш твердий поверхневий шар, ніж об'ємний індієвий. Даний шар має низькі адгезійні властивості і перешкоджає холодному зварюванню індієвих стовпів при збірці матричних фотоприйомних пристроїв. Розроблені в даній роботі мето-

ди прецизійного видалення поверхневого шару дозволили більш ніж на порядок збільшити силу адгезії стовпів і, тим самим, збільшити надійність фотоприйомного пристрою.

**Ключові слова:** індієвий стовп, адгезія, метод переверненого кристала, матричний фотоприйомний пристрій, ІЧ — детектори.

## Abstract

### INDIUM BUMPS SHAPING AND TREATMENT FOR MATRIX PHOTODETECTOR ASSEMBLY BY FLIP CHIP TECHNOLOGY

*A. G. Paulish, A. M. Biktashov, N. B. Kuzmin, I. G. Kosulina, A. R. Novoselov*

Indium bumps properties for flip chip assembly of CdHgTe and InAs infrared detector arrays and silicon multiplexer have been investigated. It is shown that the indium bumps fabricated by a vacuum indium deposition and a photolithography, contain a surface layer more rigid in comparison with the bulk indium and having a poor adhesive ability. This layer prevents bumps from the good adhesive contact during assembly and leads to bumps disconnection under a temperature cycling because of the difference in the thermal-expansion coefficients of the infrared detector material and the silicon multiplexer. Designed in this work method of precise removal this layer and subsequent reflow increase the adhesion strength between indium bumps more than order and, thereby, increase the hybrid detector reliability.

**Keywords:** flip chip, indium bump, adhesive, IR focal plane array, hybridization, IR detectors.

## 1. Введение

При соединении матрицы или линейки фотоприемных элементов на основе InAs или CdHgTe с кремниевым коммутатором в единое фотоприемное устройство (ФПУ) [1,2] и присоединение GaSb квантовых каскадных лазеров к теплопроводящему основанию, так же как и присоединение лазеров с вертикальным резонатором к сапфировому волноводу или электронной схеме [3] применяется метод перевернутого кристалла. Данный метод заключается в следующем. На поверхности соединяемых кристаллов формируются металлические столбы, после этого один из кристаллов переворачивается, столбы совмещаются и сдавливаются. В качестве материала для столбов чаще всего применяется индий, благодаря его хорошей адгезии, стабильности при низких температурах, высокой электропроводности и теплопроводности, относительной простоте использования. Индиевые столбы обеспечивают как механическое сцепление компонентов ФПУ, так и электрический контакт между их элементами. При создании ФПУ на основе InAs и CdHgTe особые жесткие требования предъявляются к силе сцепления столбов (силе адгезии), так как при рабочей температуре ФПУ 77–100 К из-за разницы коэффициентов температурного рас-

ширения кристаллов возникают механические напряжения, которые приводят к отрыву столбов друг от друга, потере электрического контакта и, в конечном итоге, к разрушению ФПУ. Несмотря на то, что чистый индий обладает хорошей адгезией, при сборке реальных кристаллов с индиевыми столбами, изготовленными методами вакуумного напыления и фотолитографии, требуется достаточно большое усилие (1-2 грамм/столб) [3,4], которое приводит к сильной деформации столбов. В работе [1] утверждается, что соединение столбов (так называемая холодная сварка) осуществлялось только в местах, где под действием деформации выдавливался “чистый” индий из объема столба. Область холодной сварки представляла собой тонкое кольцо по периферии столба, а по поверхности столба холодной сварки не происходило. Эти данные показывают, что поверхность столба содержит слой с низкими адгезионными свойствами, препятствующий надёжному сцеплению столбов. Одним из способов решения этой проблемы является более сильная деформация столбов для лучшего разрыва поверхностного слоя и образованию холодной сварки в местах разрыва. С этой целью увеличивают усилие сдавливания кристаллов [3], увеличивают высоту столбов и придают

им различную форму, облегчающую деформацию [4-6]. Однако, в большинстве случаев, это приводит к существенному усложнению и, тем самым, удорожанию технологии изготовления ФПУ. В данной работе исследованы свойства поверхностного “антиадгезионного” слоя с помощью вторичной ионной масс-спектрографии (ВИМС), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), методики измерения силы адгезии. В результате исследований разработаны методики прецизионного удаления поверхностного слоя, позволяющие существенно увеличить силу адгезии индиевых столбов при сборке кристаллов.

## 2. Методика эксперимента

Для исследований изготавливалась матрица индиевых столбов размерностью  $128 \times 128$  (Рис. 1). Индиевые столбы высотой 6 мкм, диаметром 20 мкм и шагом 50 мкм формировались на подложках InAs или сапфировых подложках размером  $10 \times 15 \text{ мм}^2$  с помощью термического напыления в вакууме и прямой фотолитографии. Термическое напыление проводилось в однокамерной вакуумной установке оборудованной диффузионным насосом производительностью 2500 л/с и азотной криопанелью. Базовый вакуум составлял  $3 \times 10^{-7}$  Торр, и практически не менялся в процессе напыления индия. Измерения методом ВИМС (MIQ-256 spectrometer, CAMECA-RIBER) проводились на сплошной пленке индия, на которой имитировались процессы фотолитографии и отмытки без химического травления индия в промежутках между столбами. Использование прямоугольных прозрачных сапфировых подложек существенно облегчило процедуры сборки подложек и последующего их разрыва. Усилие сдвигания при сборке составляло 56 Н, что соответствует 0,34 г/столб.

Измерения силы адгезии проводились на установке, принцип действия которой показан на Рис. 2. Прямоугольные сапфировые подложки соединялись крест накрест, как показано на рисунке. Верхняя подложка помещалась на опору, а на нижнюю подложку прикладывалось усилие с использованием стального шарика, равномерно распределяющего нагрузку на плечи коромысла. Такой способ позволяет более объективно оценивать силу адгезии, по сравнению со сдвигом одной подложки парал-

лельно другой [3], где происходит значительная латеральная деформация столбов. Сила адгезии столбов определялась как величина силы, необходимой для отрыва одной подложки от другой.

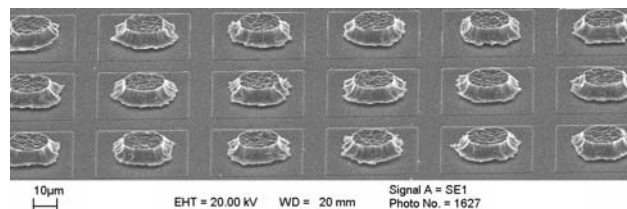


Рис. 1 Фрагмент матрицы индиевых столбов размерностью  $128 \times 128$ , сформированных на подложке InAs.

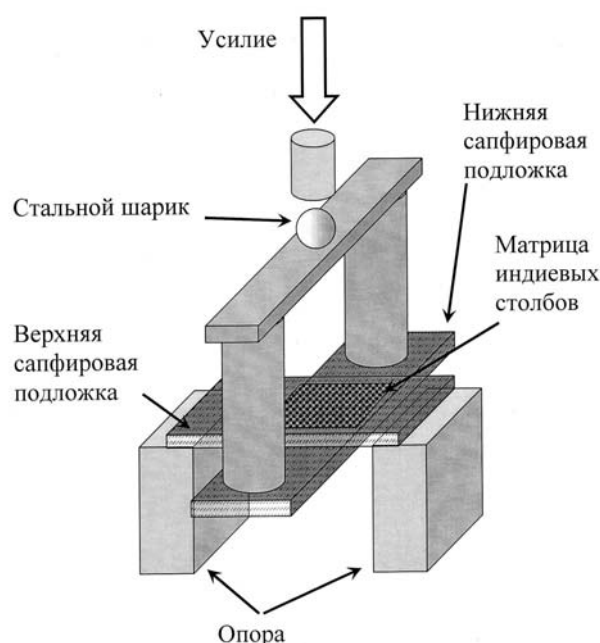


Рис. 2. Схема устройства для определения силы адгезии индиевых столбов.

## 3. Результаты и обсуждение

Одним из распространенных методов увеличения силы адгезии является оплавление столбов в сверхвысоком вакууме. Оплавленный столб имеет куполообразную форму, что увеличивает его высоту и способствует большей деформации верхней части столба в начальный момент сборки. Большая деформация в свою очередь приводит к разрыву жесткой поверхностной пленки и холодной сварке индия, выдавленного из объема столба. Мы по-

пытались использовать данную технологию. Оплавление столбов проводилось в установке вакуумного напыления при давлении  $3 \times 10^{-7}$  Торр. На Рис. 3а показан индиевый столб после оплавления при температуре плавления индия ( $\approx 160^\circ\text{C}$ ). Достижение температуры плавления индия фиксировалось визуально по оплавлению “свидетеля”: куска чистого индия размером  $\approx 2 \times 2 \times 3 \text{ мм}^3$ , прикрепленного на сапфировой подложке рядом со столбами. Из рисунка видно, что столб практически не изменил свою форму. Это означает, что на поверхности столба существует достаточно толстая жесткая пленка, не позволяющая столбу при расплавлении индия принять куполообразную форму. Оплавления таких столбов можно добиться при повышении температуры до  $200\text{--}300^\circ\text{C}$  [3], однако такие температуры недопустимы для фотоприемной матрицы на InAs и, тем более для соединений CdHgTe. Данные ВИМС показывают, что поверхностный слой состоит из смеси оксидов индия и углерода, обладающий температурой плавления существенно выше температуры плавления индия, и препятствующий оплавлению столбов.

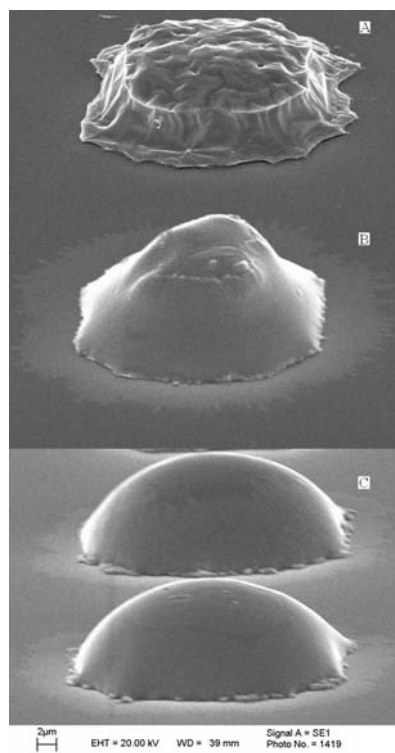


Рис. 3. Индиевые столбы после оплавления в вакууме при температуре плавления индия ( $\approx 160^\circ\text{C}$ ). а) исходный столб; б) травленный 20 секунд перед оплавлением; в) травленный 30 секунд перед оплавлением.

### 3.1. Химическая обработка столбов

Для удаления поверхностной пленки, исходя из ее состава, был подобран травитель на основе растворов серной или азотной кислот. Данный травитель эффективно удаляет оксиды индия и не оказывает отрицательного влияния на параметры фотоприемной матрицы. На Рис. 3б показан индиевый столб после травления в течение 20 секунд и последующего оплавления. Видно, что форма столба близка к куполообразной, однако на поверхности сохранилась оксидная пленка. На Рис. 3в показан индиевый столб после травления в течение 30 секунд и последующего оплавления. Столб окончательно принял куполообразную форму, что свидетельствует о полном удалении жесткого поверхностного слоя. С помощью такой методики контроля удаления оксидного слоя по форме оплавленного столба был оптимизирован состав травителя и режим травления с тем, чтобы с хорошей точностью удалять поверхностный слой, не затрагивая объема столба.

После сборки приготовленных таким образом столбов было проведено измерение силы адгезии на разрыв с помощью устройства, показанного на Рис. 2. В работе [7] исследовалась сила адгезии столбов размером  $0.7 \times 0.7 \text{ мм}^2$  и высотой 6 мкм. Такие столбы используются для крепления лазеров к теплопроводящему основанию. Химическое травление и последующее оплавление таких столбов увеличило силу адгезии более чем на два порядка. Такое увеличение силы адгезии связано, по-видимому, с тем, что, помимо удаления поверхностной пленки, высота столба после оплавления увеличивается до 25 мкм. Это приводит к значительной деформации столбов при сборке и более легкому разрыву остаточной оксидной пленки, покрывающей столб после процедуры травления и оплавления. В данной работе, при использовании стандартных столбов диаметром  $20\text{--}25 \text{ мкм}$ , увеличение силы адгезии оказалось существенно меньшим, несмотря на увеличение высоты столбов после оплавления на  $10\text{--}20\%$ . На Рис. 4 показан такой индиевый столб после разрыва сборки. Из рисунка видно, что поверхность столба расплющилась, но это не привело к существенному разрыву остаточной поверхностной пленки. Места нарушения поверхностной пленки в виде тонких трещин хорошо видны на расплющенной части столба, однако холодной сварки практически не про-

изошло. Сила адгезии такой сборки не превысила 2 Н.

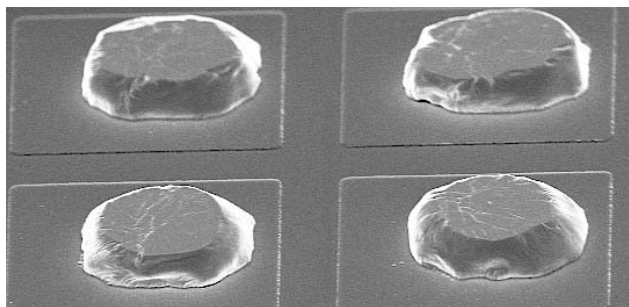


Рис. 4. Индиевый столб после разрыва сборки оплавленных столбов. Сила на разрыв 2 Н.

С целью увеличения силы адгезии столбов мы произвели сборку подложки с оплавленными столбами и подложки, на которой оплавление столбов не производилось. При такой комбинированной сборке оплавленный столб, имеющий “заостренную” куполообразную форму, легко внедряется в плоский столб. На Рис. 5 показаны фотографии индиевых столбов после разрыва такой сборки. Вверху показан оплавленный столб, внизу — не оплавленный. Разрыв собранных подложек производился при повышенной температуре по методике, описанной в [8], с целью выявления областей, где произошла холодная сварка. Из рисунка видно, что холодная сварка индиевых столбов произошла по линиям, возможно связанным с трещинами в поверхностной пленке. Сила адгезии при таком способе сборки возросла до 8 Н. Таким образом, использование комбинированной сборки, где столбы оплавлены только на одной подложке, позволяет увеличить силу адгезии в 2–4 раза. Данный способ сборки хорошо подходит для сборки кремниевого коммутатора и фотоприемной матрицы на основе CdHgTe, так как при температуре плавления индия эти соединения разрушаются.

### 3.2. Механическое удаление поверхностной пленки

Так как нагревание материала CdHgTe до температуры плавления индия недопустимо, то нами была разработана методика механического разрушения поверхностной пленки индиевых столбов. Разрушение осуществлялось с

помощью вибронда, представляющего собой вольфрамовую проволоку диаметром 8 мкм, вибрирующей в потоке инертного газа и царапающей поверхность столба. Процедура проводилась под визуальным контролем изменения интенсивности блеска поверхности индиевых столбов с помощью оптического микроскопа. Детали методики будут опубликованы в следующей статье. Для увеличения силы адгезии сборка проводилась при температуре 135°C. Усилие на разрыв матрицы индиевых столбов 128×128 составило 27 Н. На Рис. 6 показан индиевый столб после разрыва сборки. Видно, что холодная сварка произошла по всей поверхности индиевого столба, что обеспечило увеличение силы адгезии. Для оценки максимально возможной силы адгезии сборка с индиевыми столбами была нагрета до температуры плавления индия, что привело к сплавлению индиевых столбов в единый монолит. Сила на разрыв составила 36 Н. Таким образом, сборка механически очищенных индиевых столбов при повышенной температуре позволяет получить силу адгезии, близкой к максимально возможной величине.

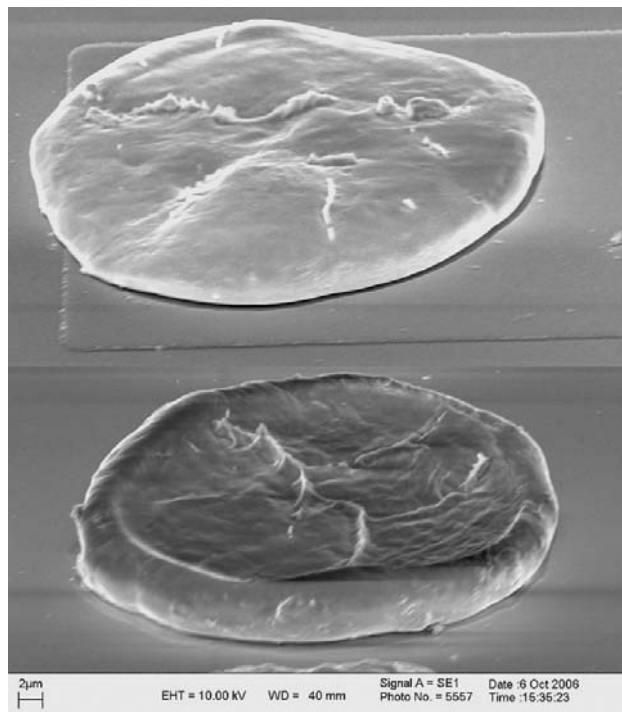


Рис. 5. Индиевые столбы после разрыва комбинированной сборки. Вверху оплавленный столб, внизу не оплавленный. Сила на разрыв 8 Н.

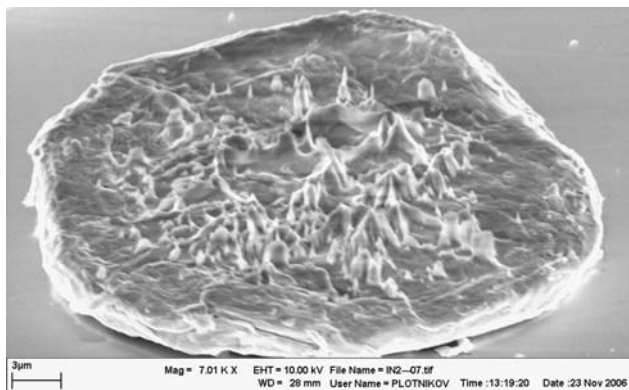


Рис. 6. Индиевый столб после разрыва сборки механически обработанных столбов. Сила на разрыв 27 Н.

#### 4. Заключение

В работе исследованы свойства индиевых столбов, используемых в технологии перевернутого кристалла (flip-chip). Показано, что поверхность индиевых столбов содержит слой с низкими адгезионными свойствами, который препятствует холодной сварке при сборке компонентов ФПУ. Разработанные в данной работе методы прецизионного удаления поверхностной пленки позволили более чем на порядок увеличить силу адгезии столбов и стабильно получать надежное соединение с усилием на разрыв более 26 Н. Авторы благодарят Плотникова А.Е. за изготовление фотографий методом сканирующей электронной микроскопии, Захарьяш Т.И. за изготовление индиевых столбов.

#### 5. Литература

1. Курьшев Г.Л., Ковчавцев А.П., Вайнер Б.Г., Гузев А.А., Сторганов А.С., Субботин М.М., Захаров И.М., Ефимов В.М., Постников К.О., Ли

- И.И., Валишева Н.А., Панова З.В. Медицинский тепловизор на основе матричного ФПУ 128x128, работающий в диапазоне спектра 2,8--3.05 мкм. // *Автометрия*. — 1998. — №4. — С. 5-16.
2. Васильев В.В., Есаев Д.Г., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Талипов Н.Х., Сидоров Ю.Г., Дворецкий С.А. Матричное фотоприемное устройство 128x128 на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs. // *Автометрия*. — 1998. — №4. — С. 27-34.
3. Chu K.M., Lee J.S., Cho H.S., Rho B.S., Park H.H. and Jeon D.Y. Characteristics of indium bump for flip-chip bonding used in polymeric-waveguide-integrated optical interconnection systems. // *Jap. J. Appl. Phys.* — 2004. — V.43, №8B- P. 5922-5927.
4. Clayton J.E. Very high pin count flip chip assembly using conductive polymer adhesives. // *Fine-Pitch Interconnection Technologies II Session of IMAPS 2003*. // 36<sup>th</sup> International Symposium on Microelectronics, Boston, MA. November 16-20, 2003.
5. Wolf J. PbSn60 solder bumping by electroplating. // *Pixel 2000 International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and X-Rays*. Genova — Porto Antico — Sala Libeccio, June 5-8, -2000.
6. Клименко А.Г., Войнов В.Г., Новоселов А.Р., Недосекина Т.Н., Васильев В.В., Захарьяш Т.И., Овсяк В.Н. Особо пластичные индиевые микро-столбы для матричных ФПУ на CdHgTe. // *Автометрия*. — 1998. — №4. — С. 105-112.
7. Biktashov A.M., Kuzmin N.B., Paulish A.G. Indium bumps investigation for the flip-chip assembly. // 7<sup>th</sup> International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials. — Erlagol, Altai. — 2006. P. 35-37.
8. Airoidi A., Alimonti G., Amati M., Andrezza A., Bulgheroni A., Caccia M., Giugni D., Kucewicz W., Lari T., Meroni C., Ragusa F., Troncon C., Vegni G. A chip removal facility for indium bump bonded pixel detectors. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. — 2005. — V.540. — P. 259-265.