

УДК 621.315.5:621.794.4

## Формирование индиевых микроконтактов ионным травлением

К. О. Болтарь, М. Д. Корнеева, Ю. С. Мезин, М. В. Седнев

*Представлены результаты исследования процессов ионно-лучевого и высокочастотного катодного травления напыленных слоев индия для формирования микроконтактов. Изготовлены матрицы микроконтактов высотой более 10 мкм с шагом 28 мкм формата 384×288. Ширина канавки, разделяющей индиевые микроконтакты, не превышает 5 мкм.*

PACS: 85.60.Bt

*Ключевые слова:* микроконтакт, травление, напыленный слой, индий, ионно-лучевой метод.

### Введение

Развитие фокальных фотоприемных матриц направлено на увеличение плотности расположения фотодиодов и элементов мультиплексоров на единицу площади и на соответствующее уменьшение размеров и расстояния между ними. В настоящее время на фотодиодных матрицах из КРТ шаг между элементами около 30 мкм [1], но уже разрабатывается технология с шагом 15—17 мкм [2].

Для соединения матриц фоточувствительных элементов на основе эпитаксиальных слоев КРТ с кремниевой БИС обработки сигнала используют индиевые микроконтакты. Это обусловлено уникальной пластичностью индия, который обеспечивает надежный гальванический и механический контакт. Соединение вышеобозначенных элементов гибридной сборки выполняется методом холодной сварки, осуществляемой механическим сдавливанием, при которой необходимы значительные механические нагрузки.

Известно, что КРТ имеет низкий порог пластичности, и механические нагрузки более 1 кгс/мм<sup>2</sup> [3] могут приводить к изменению электрофизических свойств материала и структур на его основе. Поэтому для соединения матриц на основе КРТ с кремниевой БИС следует использовать материал с еще меньшим порогом пластичности.

Кроме того, коэффициенты линейного расширения КРТ и кремния отличаются, и необходимо учитывать изменение линейных размеров соеди-

няемых чипов при эксплуатации в условиях термостатирования +60 ÷ -196 °С. Расчеты показывают, что для надежного соединения матриц с числом элементов в ряду ~300 и шагом 30 мкм суммарная высота микроконтактов должна быть не менее 20 мкм [4]. Формирование микроконтактов такой высоты из других металлов весьма проблематично, поскольку важным параметром соединения холодной сваркой является температура плавления контактных материалов. Температура плавления индия 156 °С — наименьшая из температур плавления металлов, обеспечивающих надежное механическое соединение в диапазоне эксплуатации гибридной сборки.

В данной работе проанализированы возможные технологии формирования индиевых микроконтактов и экспериментально подтверждены наиболее оптимальные их варианты, а именно, травление ускоренными ионами аргона.

### Технология формирования микроконтактов

Формирование микроконтактов осуществляется следующими способами.

1. Напыление слоя индия толщиной 10—15 мкм и химическое травление через маску фоторезиста [1].

2. Напыление слоя индия через свободную маску [3].

3. Напыление слоя индия 10—15 мкм через маску фоторезиста толщиной большей, чем толщина индия, и отрицательным профилем с последующим "взрывом" [2].

4. Электрохимическое осаждение индия в отверстие фоторезиста [2].

5. Напыление слоя индия толщиной 5 мкм через маску фоторезиста толщиной более 15 мкм с последующим "взрывом" и оплавлением в полусфере [4—6].

Эти способы имеют определенные ограничения в применении к технологии формирования микроконтактов при промышленном выпуске фотопри-

Болтарь Константин Олегович, начальник НТЦ.  
Корнеева Марина Дамировна, первый зам. генерального директора.  
Мезин Юрий Сергеевич, ведущий инженер.  
Седнев Михаил Васильевич, начальник участка.  
ФГУП «НПО "Орион"».  
Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2010 г.

емных матриц с шагом между элементами 15—30 мкм.

В случае прямого травления напыленного слоя индия через маску фоторезиста процесс растворения индия идет изотропно. Поэтому минимальное расстояние между микроконтактами не может быть меньше толщины слоя индия, так как при необходимой высоте микроконтактов 10—12 мкм и минимальной ширине разделяющей контакты канавки 5 мкм фоторезистивная маска будет подтравлена раньше, чем закончится травление слоя. Кроме того, из-за неоднородного травления по площади трудно изготовить микроконтакты с одинаковыми размерами вершины на пластинах более 4—5 см<sup>2</sup>.

При формировании микроконтактов напылением через свободную маску практически невозможно избежать гальванической связи между элементами матрицы из-за коробления маски большой площади и связанного с этим подпылением.

Напыление толстых слоев индия через маску сопровождается зарастанием краев маски и уменьшением проходного отверстия. На рис. 1 представлена экспериментально определенная зависимость линейного размера  $L$  вершины индиевого микроконтакта от толщины  $D$  слоя, напыленного через отверстие с площадью 20×20 мкм в маске фоторезиста толщиной 13 мкм с отрицательным профилем. Поэтому применение этого способа при шаге матрицы 15—17 мкм и высоте микроконтактов 10—12 мкм весьма проблематично.

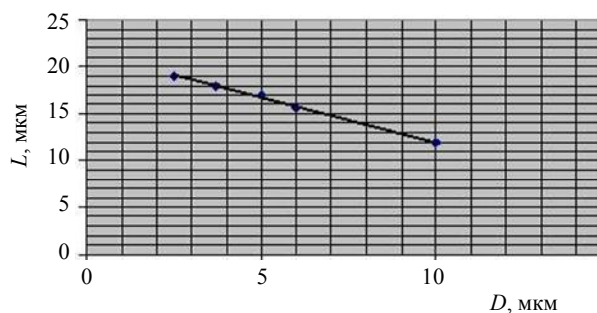


Рис. 1. Зависимость линейного размера  $L$  вершины индиевого микроконтакта от толщины  $D$  слоя

Напыление слоя индия толщиной 5 мкм через толстую (15 мкм) маску фоторезиста с последующим "взрывом" и оплавлением в полусферы не обеспечивает требуемой высоты микроконтактов 10—12 мкм из-за недостающего объема индия в напыленном слое при малом шаге в матрице. Кроме того, переплавление осуществляется при температуре 170 °С. Нагревание фотодиодной матрицы до такой температуры недопустимо из-за возможной деградации  $p$ - $n$ -переходов.

Для формирования микроконтактов методом электрохимического осаждения, широко и успеш-

но используемого при изготовлении печатных плат, необходимо создание сплошного электропроводящего слоя и последующего его травления для гальванического разделения микроконтактов. Определенные трудности в реализации формирования микроконтактов электрохимическим осаждением создают неоднородность толщины растущего слоя и необходимость удаления остатков растворов солей [2].

Наиболее оптимальным методом для формирования микроконтактов на матрице фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и кремниевых БИС с шагом 15—30 мкм является реактивное ионное травление. Ионизированные в газовом ВЧ-разряде химически активные ионы, ускоренные полем автополяризации, бомбардируя открытые участки индия, превращают его в газообразные продукты, откачиваемые вакуумным насосом. К сожалению, соединения индия обладают высокой температурой плавления и кипения. Наименьшая температура плавления 207 °С у соединения  $InJ$  [7], поэтому получить значительное увеличение скорости травления индия методом плазмохимического травления при температуре, не превышающей 100 °С, не удастся.

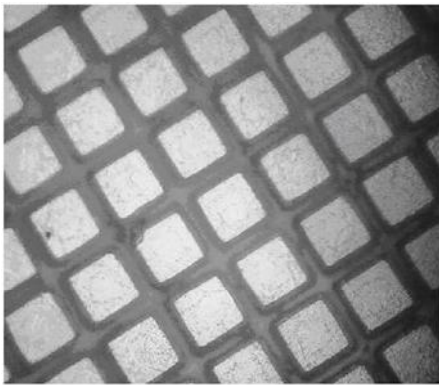
Метод травления ионами аргона позволяет воспроизводить с прецизионной точностью размеры маски, нанесенной на поверхность любого материала. При этом процесс травления идет анизотропно в направлении падения ионов рабочего газа. Скорость ионного травления индия втрое больше скорости травления фоторезиста и при толщине фоторезиста 3—4 мкм глубина травления индия составит 9—12 мкм. Скорость травления молибдена значительно меньше и равна 0,1 мкм/ч, поэтому для травления индия толщиной 10 мкм достаточна маска из  $Mo$  толщиной 0,3 мкм.

На рис. 2, *а* представлено изображение фрагмента матрицы формата 384×288 с шагом 28 мкм с индиевыми микроконтактами высотой 5 мкм, изготовленными ионно-лучевым травлением ионами аргона через маску фоторезиста на установке IEU-100 при давлении в вакуумной камере  $4 \cdot 10^{-4}$  Па и скорости травления 0,12 мкм/ч. Такая малая скорость травления связана с пределом возможностей данной установки и не обеспечивает требований промышленного производства.

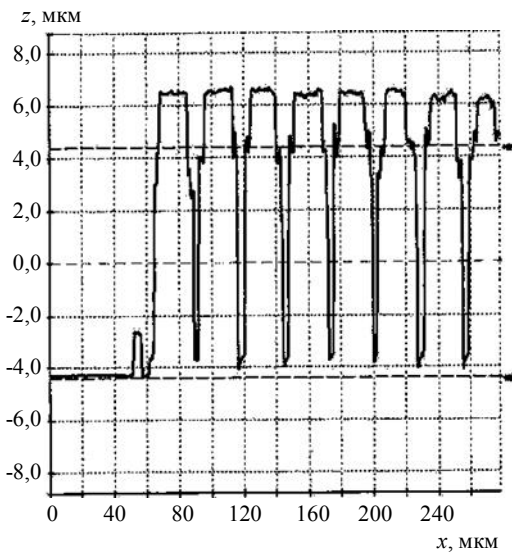
Увеличение скорости травления до 3 мкм/ч было получено на макете установки ионного травления с ионно-лучевым источником "Ион-2" при давлении  $3 \cdot 10^{-2}$  Па. Однако этот источник ионов имеет существенную неоднородность пучка, что не позволяет обеспечить одинаковые скорости травления на пластинах с площадью более 1—2 см<sup>2</sup>.

На рис. 2, *б* представлена профилограмма фрагмента поверхности кремниевой БИС с индие-

выми микроконтактами высотой 10 мкм. Микроконтакты формировались катодным ВЧ-распылением ионами аргона через маску фоторезиста толщиной 3—4 мкм. Равномерность скорости травления в центральной зоне диаметром 70 мм не менее 10 %. Обрабатываемые пластины устанавливались на катод станции травления с помощью теплопроводящей кремнийорганической жидкости. Из рисунка видно, что ширина канавки, разделяющей микроконтакты, составляет 4—5 мкм. Профиль травления представляет собой трапецевидную форму с углом наклона боковых поверхностей около 85 °С. Окончание травления определялось визуально через смотровое окно.



а



б

Рис. 2. Матрица формата 384×288 с шагом 28 мкм с индиевыми микроконтактами:

а — фрагмент матрицы; б — профилограмма фрагмента поверхности кремниевой БИС

На скорость травления индия влияют несколько факторов:

- выбор маскирующего покрытия. Использование углеродной или металлической маски, например молибденовой, позволяет получать при ионном травлении микроконтактов скорости, со-

ответствующие свободному травлению индия, а именно 3 мкм/ч;

- присутствие кислорода в газовой смеси уменьшает скорость травления. Так, при одинаковом процентном содержании кислорода и аргона в составе газовой смеси скорость травления индия уменьшается на порядок и составляет 0,27 мкм/ч;

- увеличение плотности мощности при катодном ВЧ-распылении вызывает рост температуры обрабатываемой поверхности и внутри камерной оснастки, что приводит к росту десорбции газов в вакуумной камере, в том числе кислорода. При нагревании в вакууме индий взаимодействует с кислородом и образует устойчивое соединение  $\text{In}_2\text{O}$  черного цвета [8].

Морфология поверхности индия при ионном травлении изменяется. На рис. 3 представлена профилограмма участка поверхности индия до и после травления. Из рисунка видно, что шероховатость поверхности индия увеличивается после травления ионами аргона. Это может быть связано с зернистой структурой пленочного покрытия и/или образованием на его поверхности новой маскирующей структуры, формируемой на исходной шероховатости вследствие переосаждения индия и зависимости скорости травления от угла падения ионов [9].

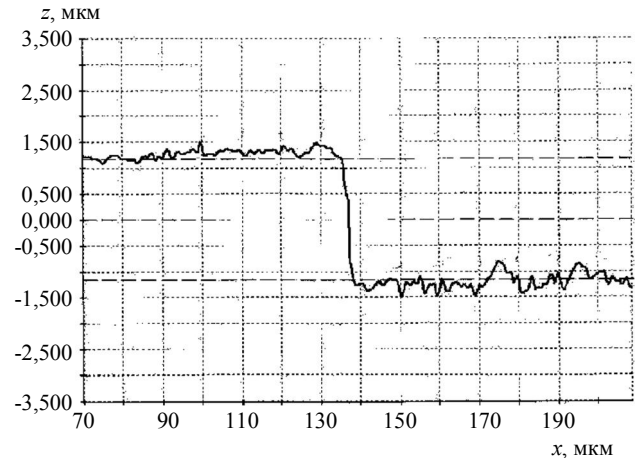


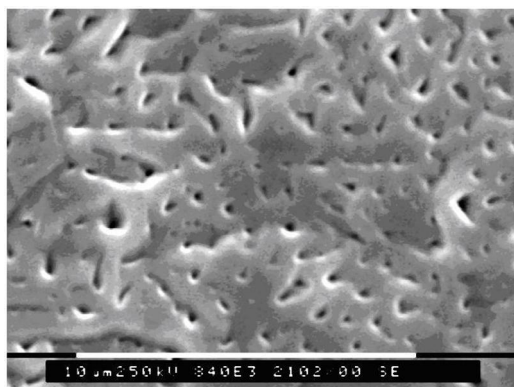
Рис. 3. Профилограмма участка поверхности индия до и после травления

Зеркальная поверхность индия отражает излучение плазмы, тогда как зернистая структура рассеивает это излучение, что способствует увеличению температуры поверхности при равной плотности мощности в газовом разряде. Измерения спектров отражения от индия с шероховатостью 1,5—2 мкм (скорость напыления 0,2 мкм/мин) и 50 нм (скорость напыления 1 мкм/мин) на длине волны, например около 1,5 мкм, показали, соответственно, значения отражения 87 и 5 %.

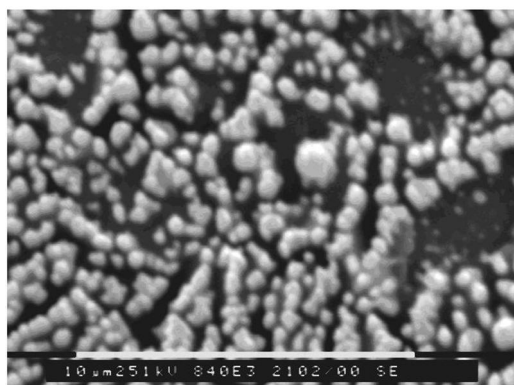
Увеличение плотности мощности ионов, бомбардирующих поверхность индия, позволяет уве-

личивать скорость травления. Однако превышение определенного порога мощности приводит к почернению поверхности индия и прекращению однородного травления. Морфология слоев индия до и после такого травления существенно отличается.

Исследования поверхности индия, проведенные методами электронной растровой микроскопии, показали, что морфология индия (шероховатость 50 нм) при ионно-плазменном (катодном) ВЧ-травлении ионами аргона при давлении  $1 \cdot 10^{-1}$  Па в течение 1 ч изменяется (рис. 4, а и б). Часть напыленного слоя индия была защищена и не подвергалась воздействию ионов аргона (см. рис. 4, а).



а



б

**Рис. 4. Поверхность индия:**

а — после напыления; б — после травления ионами  $\text{Ar}^+$

Методом электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА) установлено, что после ионного травления на поверхности индия наблюдается значительное увеличение концентрации карбонила индия.

Исследования методом Оже-спектроскопии, который анализирует более тонкие слои и более чувствителен к кислороду, чем метод ЭСХА, показали присутствие кислорода до значительно больших толщин, чем поверхностный слой с карбонилем индия. Во всяком случае при травлении ионным пучком непосредственно в установке MICROLAB МК II до 1,5 мин, что соответствует толщине  $\sim 50$  нм, в Оже-спектрах все еще присутствует заметная линия кислорода.

### Выводы

1. Экспериментально показано, что травление ускоренными ионами аргона позволяет формировать индиевые микроконтакты высотой 10—12 мкм и шириной канавки, разделяющей микроконтакты, 4—5 мкм.
2. Шероховатость поверхности индия в процессе травления ионами аргона может существенно изменяться и зависит от морфологии исходного слоя. Скорость травления индия зависит от морфологии напыленных слоев и максимальна на зеркальных поверхностях.

### Литература

1. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Седнев М. В. Способ сборки фотоприемного устройства. Патент 2308788 РФ от 20.01.06.
2. Jutao Jiang, Stanley Tsao et al. Fabrication of indium bumps for hybrid FPA applications// *Infrared Physics and Technology*. 2004. V. 45. P. 143.
3. Клименко А. Г. и др. Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на CdHgTe// *Автоматрия*. 1998. № 4. С. 105.
4. Young-Ho Kim, Jong-Hwa Choi, Kang-Sik Choi, Hee Chul Lee, Choonh-Ki Kim. New Reflow Process for Indium Bump// *Proc. of SPIE*. 1996. V. 306. P. 60.
5. Johann Ziegler, Markus Finck, Rolf Kruger, Thomas Simon, Joachim Wendler. Long Linear HgCdTe arrays with superior temperature-cycling-reliability// *Proceedings of SPIE*. 2001. V. 4028. P. 234.
6. Tissot I. L. etc. Collective flip-chip technology for CdHgTe I.R.F.R.A.// *Proc. SPIE*. 1996. V. 2894. P. 115.
7. Ахметов Н. С. Общая и неорганическая химия. — М.: Высш. шк., 1981.
8. Химия и технология редких и рассеянных элементов: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1976.
9. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986.

## Formation of indium microcontacts by ion etching

*K. O. Boltar, M. D. Korneeva, J. S. Mezin, M. V. Sednev*  
Orion R&P Association, 46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*In this work the results of research of processes ion beam and high-frequency cathode etching of evaporated indium layers for formation of microcontacts are submitted. The matrixes of microcontacts of height more than 10 microns with a step 28 microns of the 384×288 format are made. The width of a flute dividing (sharing) indium microcontacts does not exceed 5  $\mu\text{m}$ .*

PACS: 85.60.Bt

*Keywords:* microcontact, etching, evaporated layer, indium, ion-beam method.

Bibliography — 9 references.

*Received September 10, 2010*