

Исследование причин возникновения дефектов при напылении слоя индия

Б.В. Трошин, Е.А. Климанов, М.В. Седнев

Индий является основным материалом для формирования микроконтактов методом вакуумного напыления с использованием испарителей резистивного типа. В напыленных слоях иногда присутствуют дефекты полусферической формы, которые вызывают серьезные проблемы при формировании индивидуальных микроконтактов. В статье предложена модель формирования дефектов такого типа и способы борьбы с ними. Показано, что основными причинами образования дефектов являются микрообъемы воды внутри локальных механических дефектов поверхности подложек, газящие микрозагрязнения на поверхности и микрообъемы растворителя в слое фоторезиста.

PACS: 42.70.Nq

Ключевые слова: напыление индия, дефекты, индивидуальные микроконтакты

Введение

В изделиях микрофотоэлектроники индий является основным материалом для формирования микроконтактов [1–5]. Обычно для создания слоя индия применяются методы вакуумного напыления с использованием испарителей резистивного типа. В ряде случаев слои индия напыляют на слой фоторезиста.

Напыленные слои содержат дефекты, в частности, дефекты полусферической формы. Данные дефекты впоследствии вызывают серьезные проблемы при формировании индивидуальных контактов, так как в местах дефектов, как правило, образуются закоротки (области с сохранившимся после травления индием) величиной от десятка до сотни микрон, или происходит потеря нескольких микроконтактов (столбиков). В связи с этим важно иметь объективное представление о причинах образования дефектов.

В настоящей работе представлены результаты исследования причин возникновения этих дефектов в напыляемых слоях индия, а также изложены основные принципы их устранения.

Методика эксперимента

Слой индия напыляли на подложки, представляющие собой кремниевые пластины, прошедшие стандартную химическую обработку, на часть из

Трошин Богдан Васильевич, аспирант.

Климанов Евгений Алексеевич, главный научный сотрудник.

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка.

ОАО «НПО «Орион».

Россия, 11123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 27 марта 2013 г.

© Трошин Б.В., Климанов Е.А., Седнев М.В., 2013

которых был нанесен слой фоторезиста толщиной 2 мкм. Химическая очистка производилась посредством кипячения подложек в растворе диметилформамида (ДМФ) при температуре 150 °C. В качестве фоторезиста использовался позитивный фоторезист, который после нанесения был просушен при температуре 110 °C на столике («hot-plate»).

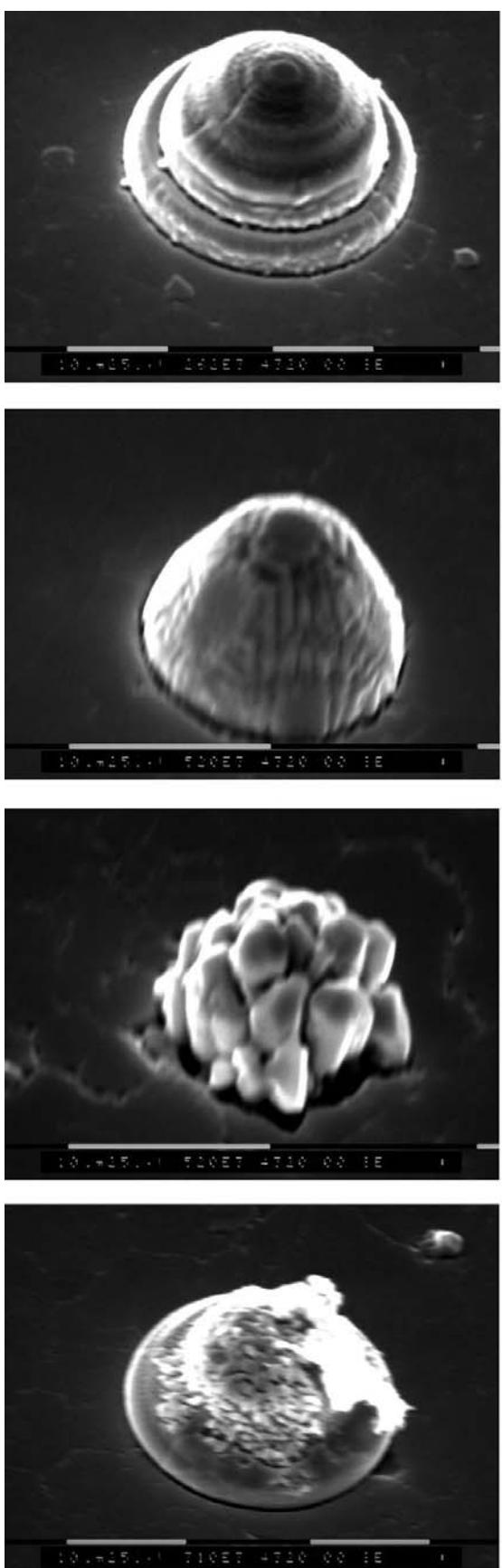
Процесс напыления проводился на вакуумной установке с испарителем резистивного типа. Обрабатываемые подложки закрепляли на загрузочной кассете из стали, располагаемой на охлаждаемом водой (10–20 °C) медном подложкодержателе. Напыление индия проводили испарением навески массой, соответствующей требуемой толщине слоя, из лодочки специальной конструкции. Для изготовления испарителя использовался молибден или tantal. Процесс напыления проводили при остаточном давлении в рабочей камере $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Толщина напыленных слоев составляла 8–9 мкм. Толщины слоев индия измеряли на контактном профилометре.

Результаты

Все напыленные образцы, как с подслоем фоторезиста, так и без него, контролировались с помощью микроскопа.

Поверхность этих образцов близка к зеркальной и имеет шероховатость порядка 30–50 нм. В темном поле микроскопа на поверхности индия наблюдаются рассеивающие свет точечные объекты размером ~ 1 мкм и плотностью расположения ~ $(1–4) \cdot 10^2$ см⁻². Число этих объектов находится в соответствии с наблюдаемыми до напыления свечущимися в темном поле микроскопа точками.

Также было установлено, что слои индия, вне зависимости от наличия подслоя фоторезиста, содержат выпуклые дефекты, как правило, круглой

**Фотографии дефектов:**

а – дефект сферической формы;
б – дефект конусообразной формы;

в – дефект нестандартной формы (содержит большое количество граней);
г – проравшийся выпуклый дефект.

формы. Данные дефекты могут иметь диаметр от единиц до сотен микрометров. При этом вероятность их появления различна. Выпуклые дефекты диаметром ~ 100 мкм встречаются не чаще 1 на см^2 , тогда как плотность размещения мелких ($5 - 20$ мкм) может составлять более 10 на см^2 .

На рис. 1 представлены фотографии этих дефектов, полученных в растровом электронном микроскопе.

Для выяснения структуры этих дефектов был проведен дополнительный эксперимент, а именно, к некоторым дефектам была приложена плоская пластина с грузом в несколько грамм. Было установлено, что данная процедура приводит к «разглаживанию» этих образований (выпуклых дефектов) без увеличения диаметра основания.

Обсуждение

Результат эксперимента по прикладыванию к дефектам плоской пластины с грузом, в результате чего происходило их разглаживание без увеличения общего диаметра, дает основание предположить, что данные дефекты являются полыми. Исходя из этого, можно считать, что фиксируемые нами выпуклые дефекты (как правило, круглой формы) являются микропузьрями.

Причиной их образования могут служить микрозагрязнения и микронеровности на поверхности обрабатываемой подложки, содержащие микрообъемы газа или жидкости, переходящие при нагреве в процессе напыления в пар.

Приведем качественную оценку микрообъемов газов и жидкостей, требующихся для образования микропузьрей наблюдаемой величины. Сначала рассчитаем объем газа или паров воды, необходимых для образования пузыря определенного радиуса R .

Равновесный радиус пузыря определяется равенством давления пара внутри и давления пленки металла (давление Лапласа):

$$\frac{2\delta \cdot \sin \alpha}{R} = n k T, \quad (1)$$

где δ – удельная поверхностная энергия металла; α – угол смачивания; n – количество молекул пара в единице объема; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

При помощи соотношения (1) можно определить количество молекул N в объеме пузыря радиуса R , компенсирующих лапласовское давление. Значение N рассчитывается по очевидной формуле:

$$N = n \left(\frac{4\pi R^3}{3} \right).$$

Выразим n из (1) и подставим эту величину в выражение для N :

$$N = \frac{8\pi\delta \cdot \sin \alpha}{3} \frac{R^2}{kT}. \quad (2)$$

Используя значение удельной поверхностной энергии для индия $\delta = 0,3 \text{ Дж/м}^2$, $T = 300 \text{ К}$, и принимая угол смачивания α за 30° , для $R = 10 \text{ мкм}$ получаем значение $N = 3,03 \cdot 10^{10}$ молекул.

Далее оценим, какой микрообъем газа будет достаточен для образования микропузыря подобного размера. При нормальных условиях плотность молекул газа можно рассчитать по формуле:

$$n_0 = \frac{N_a}{V}, \quad (3)$$

где $N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул·моль⁻¹ (число Авогадро); V – объем одного моля газа при нормальных условиях, т.е. $V = 2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$. Отсюда имеем $n_0 = 2,69 \cdot 10^{25}$ молекул/ м^3 , а объем, занимаемый искомым числом молекул при нормальных условиях ($N = 3,03 \cdot 10^{10}$ молекул), равен $V_{O_2} = 1,125 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3$ или $1,125 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$.

Соответственно оценим, какой микрообъем воды будет достаточен для образования микропузыря подобного размера. Для этого вычислим массу, которую составляет данное количество молекул воды. Она рассчитывается по формуле:

$$m = M \frac{N}{N_a}, \quad (4)$$

где m – масса вещества; M – молярная масса вещества, $M_{H_2O} = 18 \text{ а.е.м.}$; N – число молекул; N_a – число Авогадро. После подстановки численных значений, получаем, что $m = 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ г}$.

Микрообъем, занимаемый данной массой молекул воды, вычислим по формуле:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (5)$$

где ρ – плотность воды ($\rho = 1 \text{ г/см}^3$). С учетом выражения (5) имеем $V_{H_2O} = 1,8 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$, что соответствует $1,8 \text{ мкм}^3$.

Как видно из приведенного оценочного расчета, микрообъем воды, требующийся для образования микропузыря с $R = 10 \text{ мкм}$, может быть почти в 1000 раз меньше по сравнению с микрообъемом газа, требующимся для создания такого же микропузыря.

Полагая, что данный объем воды распределен по поверхности монослоем с толщиной порядка $h = 4 \text{ \AA}$ (диаметр молекулы воды составляет $3,8 \text{ \AA}$), получаем занимаемую им площадь:

$$S = V \left[\frac{\text{мкм}^3}{\text{мкм}} \right] / h \left[\text{мкм} \right] = 0,45 \cdot 10^3 \text{ мкм}^2,$$

что соответствует окружности с радиусом порядка 12 мкм.

Как было описано выше, в экспериментах по напылению слоев индия использовались специально подготовленные подложки, которые помещались в вакуумную камеру, откачиваемую высо-

ковакуумным насосом до остаточного давления $2 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$. С учетом того, что высоковакуумный насос хорошо откачивает газы, но в значительно худшей степени откачивает пары жидкости, можно сделать предположение, что именно микрообъемы жидкости (пары жидкостей) участвуют в образовании микропузырей в слоях индия. Данными жидкостями могут являться вода и микрообъемы растворителя в слоях фоторезиста.

Заметим, что микрообъемы воды (благодаря своим высоким адгезионным свойствам) могут оказаться на поверхности обрабатываемых подложек из-за достаточно длительного контакта подложки с атмосферой при подготовке к процессу вакуумного напыления. Также они могут присутствовать в составе микрозагрязнений на поверхности подложки.

Наличие микрообъемов растворителя в процессе образования пузырей в слое индия возможно вследствие того, что растворители являются основой для фоторезиста, и ни одна из существующих технологий сушки фоторезиста не может гарантировать полного отсутствия паров растворителя после окончания процесса.

Таким образом, исходя из изложенных данных, можно предложить следующую модель образования микропузыря в слое индия. Какой бы идеальной не была поверхность подложки и технология ее очистки, на поверхности обрабатываемой пластины всегда будет иметься некоторое количество микрозагрязнений, способных к обезгаживанию при нагреве, и микронеровностей (рис. 2, а), в которые, в зависимости от их размера и времени подготовки к процессу вакуумного напыления, попадает некоторое количество паров воды. Как правило, из паров воды образуется монослой H_2O (рис. 2, б).

При нанесении слоя фоторезиста происходят множественные разрывы монослоя воды. На различных дефектах поверхности подложки, в особенности на микронеровностях, происходит сорбирование монослоя воды в микрокапли, которые «запечатываются» наносимым с большой скоростью фоторезистом (рис. 2, в). «Запечатываться» также могут и микрозагрязнения, способные к обезгаживанию при нагреве.

Затем при сушке фоторезиста и в процессе напыления индия из-за увеличения температуры поверхности структуры (рис. 2, г) эта микрокапля увеличивается в объеме и деформирует фоторезист, а затем и слой напыляемого индия (рис. 2, д). В итоге, на поверхности слоя индия возникает пузырь. В отдельных случаях он может прорваться (рис. 1, г). Аналогичный результат будет наблюдаться и в случае обезгаживания микрозагрязнения при нагреве.

Таким образом, приведенные оценки свидетельствуют в пользу модели образования дефектов, изображенной на рис. 2, согласно которой в структурных дефектах на поверхности образцов, после нанесения слоя фоторезиста и процесса вакуумирования остается монослой воды или другой жидкости, который во время напыления индия расширяется в результате нагрева подложки и образует

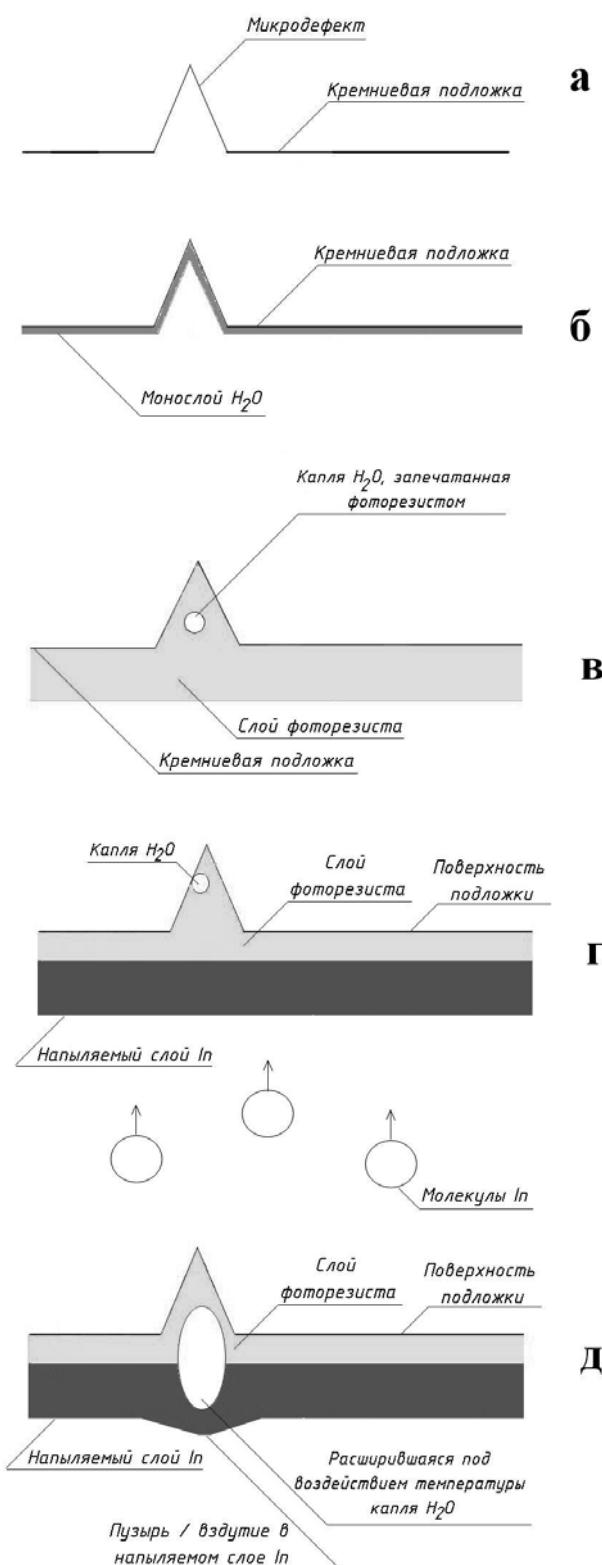


Рис. 2. Иллюстрации к модели образования микропузыря в слое индия.

объемный дефект, форма которого близка к полусфере.

Кроме того, образование микропузыря возможно вследствие расширения некоторого микрообъема жидкости или газа, выделившегося из микрозагрязнений на поверхности обрабатываемой подложки из-за процесса обезгаживания, вызванного нагревом поверхности. Также источником паров могут служить микрообъемы неудаленного растворителя в фоторезисте, так как известно, что в процессе сушки структуры «подложка + слой фоторезиста» не всегда происходит полное удаление растворителя из слоя фоторезиста. Количество оставшегося в фоторезисте растворителя зависит от толщины слоя. Это подтверждается тем, что количество пузырей больше на участках пластины с более толстым слоем фоторезиста.

В заключение, укажем несколько основных возможных методов, способствующих уменьшению риска образования пузырей в напыляемом слое индия.

1. Использование охлаждаемого подложкодержателя для снижения температуры подложки во время процесса напыления слоя индия.

2. Использование хорошо очищенных от микрозагрязнений подложек, что может быть обеспечено многостадийной процедурой очистки поверхности подложек.

3. Процесс обезгаживания (прогрева) обрабатываемых подложек требуется производить непосредственно перед напылением слоя индия, если позволяют маршрут изготовления изделия и применяемое технологическое оборудование.

4. В рабочей зоне должна быть обеспечена среда с наименьшим содержанием загрязняющих микрочастиц, а взаимодействие оператора с обрабатываемой подложкой должно быть минимальным.

5. В случае применения подслоя фоторезиста в процессе напыления необходимо использовать равномерно нанесенные слои фоторезиста небольшой толщины (< 2 мкм) в сочетании с технологией сушки «hot-plate».

Выводы

Проведенный в работе анализ причин и условий образования дефектов полусферической формы (пузырей) при напылении слоев индия позволяет сделать следующие выводы:

1. Основными причинами их образования являются:

- микрообъемы воды внутри локальных механических повреждений поверхности пластин;
- газящие микрозагрязнения на поверхности подложки;
- микрообъемы растворителя в слое фоторезиста.

2. Механизмом образования пузырей является увеличение объема паров воды или растворителя при нагреве подложек во время процесса напыления слоя индия.

3. Основными способами устранения дефектов данного типа являются:

- улучшение качества механической и химической обработки поверхности подложек;
- использование охлаждаемых подложкодержателей при проведении процесса напыления индия;
- использование технологии горячего столика («hot-plate») для сушки фоторезиста при его использовании в качестве подслоя при напылении индия.

Литература

1. Корнеева М.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 47
2. Болтарь К.О., Корнеева М.Д., Мезин Ю.С., Седнев М.В. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 96
3. Акимов В.М., Васильева Л.А., Каган Н.Б. и др. // Прикладная физика. 2008. № 1. С. 71
4. Батырев Н.И., Драчева Е.О., Климанов Е.А. и др. // Прикладная физика. 2008. № 2. С. 108
5. Несторов Д.В. «Получение и соединение индивидуальных микроконтактов в изделиях микроэлектроники». // Автореферат диссертации на соискание учёной степени к.т.н., - М.: 2004.

Examination of reasons of origin of imperfections at a dusting of a stratum of indium.

B.V. Troshin, E.A. Klimanov, and M.V. Sednev

Orion Research-and-Production Association,
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

In products of microphotoelectronics, indium is the basic material for formation bumps bonding. Usually the method of vacuum deposition is applied to production of indium layer with use of evaporators of resistance type. At evaporated layers sometimes there are defects of the hemispherical form which gives serious problems at formation of indium bumps. In paper the model of formation of defects of this type and methods of struggle with them is offered. It is shown that basic causes of formation of defects are microwater volumes in local mechanical surface defects of substrates, micropollution on surfaces and dissolvent microvolumes in a photoresist layer.

PACS: 42.70.Nq

Keywords: evaporation of indium layer, defects, indium bumps.

Bibliography — 5 references.

Received March 27, 2013