

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 531.782:621.3.049:776.43

Определение пластических свойств индия при гибридизации матричных фотоприемных устройств

В. М. Ефимов, Д. Г. Есаев

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

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

Обсуждены пластические свойства индия, играющие важную роль при гибридизации flip-chip-методом матричных фотоприемных устройств, изготавливаемых на основе GaAs/AlGaAs, GaAs/HgCdTe, InAs. Предложена математическая модель растекания индиевого микроконтакта, сжимаемого двумя плоскостями, описывающая процесс "холодной сварки" [1] при сборке гибридной микросхемы. На основе данной модели проанализированы экспериментальные данные, отражающие временные характеристики процесса пластической деформации индиевых микроконтактов матричных фотоприемников. Показано, что пластичность индия изменяется как в процессе сдавливания индиевых микроконтактов, так и при охлаждении структур до температуры жидкого азота, при котором предельное напряжение среза индия увеличивается в пять раз. Предложенная модель, экспериментальные данные и оценки термомеханических напряжений, возникающих в гибридных микросхемах, рассмотрены в рамках проблемы разрушения микроконтактов при многократных циклах охлаждения—нагрева.

PACS: 85.40.Ls

Введение

Метод соединения встречных микроконтактов, первоначально предложенный как альтернатива проволочным соединениям [1], широко применяется при гибридизации фотоприемных устройств на основе GaAs/AlGaAs, GaAs/HgCdTe, InAs [2]. В этом случае микроконтакты изготавливаются из индия, который сохраняет свои пластические свойства при охлаждении до температуры жидкого азота. Соединение микроконтактов фотоприемной матрицы и кремниевого мультиплексора осуществляется методом "перевернутого кристалла" (flip-chip-методом), при котором на начальной стадии встречные микроконтакты сдавливаются один с другим и происходит их "холодная сварка" [3].

Первоначально пластические свойства In в данной задаче не были критичными ввиду относительно больших размеров и высоты микроконтактов. По мере увеличения степени интеграции фотоприемных устройств размер микроконтактов уменьшался от 25—30 до 15—20 мкм, и теперь технологическая часть гибридизации все более определяет как процент выхода годных микро-

схем, так и их долговременные надежность характеристики. С уменьшением высоты индиевых микроконтактов возрастают значения математического описания механизма соединения микроконтактов, а также параметров пластичности, характеризующих надежность гибридных микросхем.

Основной круг вопросов, касающихся проблемы гибридизации, можно разделить на две части: собственно сам процесс гибридизации (сборка) и дальнейшее поведение гибридной микросхемы в процессе ее эксплуатации, в частности, при многократных термоциклированиях.

Пластические характеристики материала микроконтактов в каждом из этих случаев имеют различные значения. При соединении индиевых микроконтактов flip-chip-методом достаточно знать как зависит пластическая деформация индиевых микроконтактов от температуры (в области температур выше комнатной [3]), и необходимые усилия сдавливания встречных микроконтактов при их соединении [4]. Но при этом даже успешное соединение 10^4 — 10^5 микроконтактов фотоприемной матрицы и кремниевой микросхемы на первом этапе вовсе не гарантирует устойчивость микро-

соединений к термомеханическим напряжениям при дальнейшей эксплуатации структур. И хотя механизм разрушения микросоединений практически невозможно просчитать заранее, очевидно, что он очень чувствителен к механическим свойствам индия.

В данной работе сделана попытка математически описать первый этап гибридизации фотоприемных интегральных микросхем, на котором происходит пластическая деформация индиевых микроконтактов, а также приведены экспериментальные данные и оценки термомеханических напряжений, важные для решения проблемы разрушения микроконтактов при многократных циклах охлаждения—нагревания.

Математическая модель "растекания" индиевого микроконтакта при сдавливании

В работе [3] предполагалось, что в процессе сдавливания In (на основной стадии сборки) происходит его течение. Ниже рассмотрена модель растекания вязкой жидкости, сжимаемой двумя плоскостями. Модель позволяет определить величину вязкости In в предположении, что ее величина остается постоянной в процессе "растекания" индиевой капли.

В качестве макроскопического параметра, характеризующего процесс пластической деформации, авторы выбрали коэффициент вязкости. Действительно, деформацию индиевых столбов под действием приложенного усилия можно рассматривать с гидродинамической точки зрения как течение очень вязкой жидкости между двумя плоскостями (рис. 1).

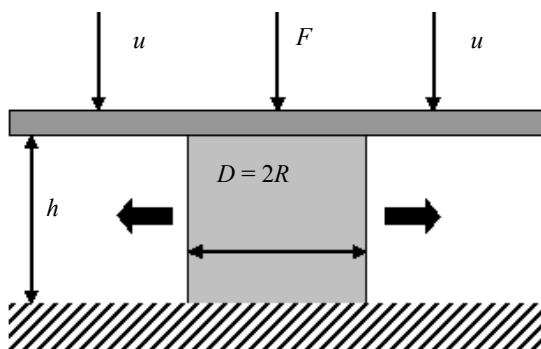


Рис. 1. Модель растекания индиевой "капли" при сдавливании ее с постоянной скоростью u . Постоянное внешнее усилие F ; D — диаметр и h — высота "капли"

Возьмем за основу рассуждения Ландау [5]: между двумя пластинами расположен тонкий слой жидкости с вязкостью η . Нижняя пластина неподвижна, верхняя движется вниз со скоростью u . Требуется определить усилие F , действующее на пластину.

Движение жидкости осесимметрично. Ввиду тонкости слоя движение жидкости в основном радиально, и выполняется условие $V_z \ll V_r$. В этом приближении из уравнения движения вязкой жидкости (уравнение Навье—Стокса) может быть получено выражение для радиальной скорости течения жидкости:

$$V_r = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial r} z(z-h), \quad \frac{\partial P}{\partial z} = 0.$$

Интегрирование первого уравнения по dz дает распределение давления в жидкости по радиальной координате, а именно

$$P = P_0 + \frac{3\eta u}{h^3} (R^2 - r^2),$$

где P_0 — наружное атмосферное давление.

Из этого выражения следует искомое усилие F при мгновенной скорости верхней пластины u :

$$F = \frac{3\pi\eta u R^4}{2h^3}.$$

Это выражение было получено О. Reynolds. Замечая, что $u = \frac{dh}{dt}$ и в силу несжимаемости жидкости сохраняется ее объем в процессе течения, т. е. $V = \pi R^2 h = \text{const}$, может быть получено уравнение динамики изменения высоты "жидкости" со временем при заданном усилии F

$$h(t) = \frac{h_0}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{1/4}},$$

где характерное время

$$\tau = \frac{3\pi\eta R_0^4}{8F h_0^2} = \frac{3\eta}{8P_0} \left(\frac{R_0}{h_0}\right)^2,$$

где R_0 и h_0 — начальный радиус и высота жидкости между пластинами, соответственно;

P_0 — давление, приведенное к начальной площади.

Изменение радиуса со временем определяется из соотношения

$$R(t) = \sqrt{\frac{V}{\pi h(t)}} = R_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{1/8}.$$

Отсюда следует, что изменение величины диаметра микростолба со временем под действием

постоянной нагрузки и в предположении, что вязкость индия постоянна, должно описываться выражением

$$(D/D_0)^8 = 1 + t/\tau.$$

Зависимость $(D/D_0)^8(t)$ (рис. 2) должна описываться прямой линией, наклон которой определяет постоянную времени τ , которая, в свою очередь, определяется величиной вязкости η .

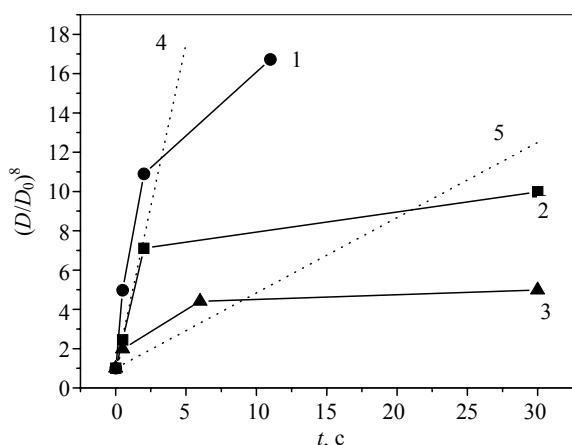


Рис. 2. Изменение диаметра индиевого микроконтакта в зависимости от времени при различных приложенных внешних усилиях сдвливания:

1 — 4,2 кг; 2 — 3 кг; 3 — 2,1 кг; 4, 5 — теоретические зависимости при вязкости индия, соответственно, $1,6 \cdot 10^4$ и $5 \cdot 10^4$ Па·с

Экспериментальные результаты

Для проверки полученного выражения проведены прямые измерения изменения диаметра индиевых микроконтактов в зависимости от времени в диапазоне 0,5—30 с.

В эксперименте использовались микроконтакты с начальным диаметром 27 мкм и высотой 6 мкм, снимались зависимости от времени при трех различных нагрузках (см. рис. 2): 4,2 кг (кривая 1), 3 (кривая 2) и 2,1 кг (кривая 3).

Для получения статистически достоверной информации давление осуществлялось одновременно на 2500 столбах фотоприемной матрицы через сапфировую прокладку. Зависимости, изображенные кривыми 4 и 5 (см. рис. 2), соответствуют теоретической зависимости, приведенной выше. Эти зависимости соответствуют значениям вязкости индия, соответственно, $\eta = 1,6 \cdot 10^4$ и $5 \cdot 10^4$ Па·с. Как видно из рис. 2, говорить о вязком течении можно только для очень маленькой области времен (от 0 до единиц секунд). Во всей остальной области наблюдается течение индия с постоянно меняющимся коэффициентом вязкости, что, очевидно, соответствует так называемой области "ползучести" материала, а не его течению.

Отметим, что сам исходный материал микроконтактов может иметь различные характеристики. Так, в [3] утверждается, что пластичность индия может значительно изменяться в зависимости от технологических параметров его нанесения. При этом предполагается, что микроструктура материала может изменяться и, следовательно, изменяется концентрация дислокаций, определяющих вязкое течение. Косвенным указанием на такую возможность может служить тот факт, что скорость травления тонких (порядка 5 мкм) слоев In может изменяться почти на порядок, и естественно предположить, что значительно изменяются микроструктура материала и связанные с ней генерация и распределение дислокаций, определяющие процесс пластической деформации на всех ее основных стадиях — течение, ползучесть и стадия деформационного упрочнения.

Проблема надежности соединений гибридной микросхемы

Полученные выше выражения, в принципе, позволяют контролировать изменение пластических свойств индия, используемого при гибридизации матричных фотоприемных устройств. Что касается непосредственно процесса сборки, то необходимость знания этих свойств, на наш взгляд, не является слишком критичной. В конце концов, для соединения двух микросхем flip-chip-методом достаточно иметь для данного материала какие-то калибровочные кривые (для выбора нужного усилия сдвливания). Более важной и сложной является проблема надежности соединений полученной микросборки — ее устойчивость к ударам, вибрациям и многократным циклам охлаждения—нагрева в процессе эксплуатации. Последний фактор является одним из главных, но прежде чем остановиться на нем подробнее, сделаем важное замечание: при изменении температуры на $\Delta T = 200$ К и характерном значении коэффициента термического расширения порядка $(2—5) \cdot 10^{-6}$, относительное изменение длины полупроводниковой пластины составляет доли процента. С одной стороны, это значение близко к предельным упругим деформациям металлов, но все же позволяет оставаться в этой области, т. е. принципиальных оснований для того, что соединения гибридной микросхемы обязательно должны разрушаться, нет. Все зависит от ее конфигурации, толщин слоев, прочности микросоединений и т. д. Это означает также, что пластические и прочностные характеристики индия будут играть здесь очень важную роль.

Остановимся подробнее на проблеме разрушения микроконтактов при многократных термоциклированиях. Фотоприемная гибридная микросхема

после соединения двух кристаллов, например InAs и Si, представляет собой как бы "биметаллическую пластину". В этой структуре при ее охлаждении до температуры жидкого азота на крайних, периферийных элементах возникают значительные механические напряжения, связанные с разницей коэффициентов термического расширения материалов подложки фотоприемника, например InAs, и мультиплексора Si.

Оценим эти напряжения по порядку величины. Рассмотрим для начала простейший случай, когда длинная балочка 1 (рис. 3) шириной и толщиной, соответственно, a и d и длиной L прикреплена на концах к полубесконечной жесткой платформе 2 микросоединениями 3, имеющими площадь s_0 и с малыми размерами по сравнению с длиной L . При изменении температуры на величину ΔT на этих микросоединениях возникнет термомеханическое напряжение, равное

$$\sigma = \Delta T \alpha E S / 2s_0,$$

где E — значения модуля Юнга материала балочки;

ΔT — изменение температуры;

α — величина коэффициента термического расширения материала;

$S = ad$ — площадь поперечного сечения балочки.

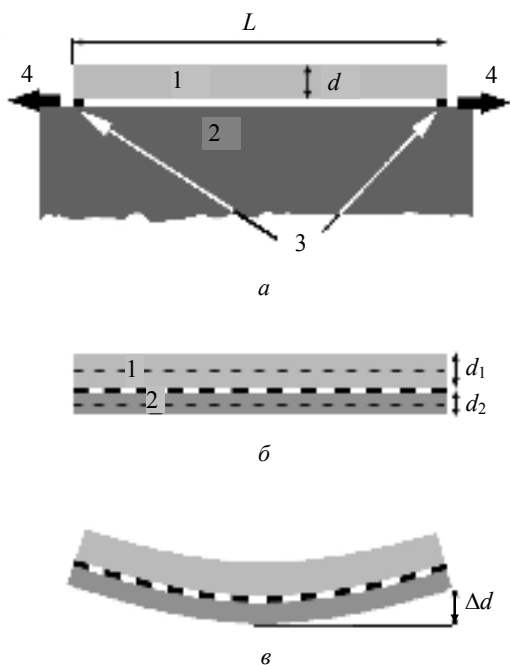


Рис. 3. Поведение микроконтактов при многократных термоциклированиях:

a — полупроводниковая пластина 1, соединенная на концах с полубесконечной жесткой платформой 2 спайками 3; b — две полупроводниковые пластины 1, 2, соединенные по всей площади; c — прогиб биметаллической пластины

Направление усилий, возникающих на микросоединениях, если материал 1 нагревается, пока-

зано на рис. 3, a стрелками 4. Для материалов, используемых в гибридных фотоприемных микросхемах, например для InAs, GaAs и Si, значения параметров E и α равны, соответственно:

$$E = 0,8 \cdot 10^{11}; \quad 0,85 \cdot 10^{11} \quad \text{и} \quad 1,1 \text{—} 1,6 \cdot 10^{11} \text{ Па};$$

$$\alpha = 4,5 \cdot 10^{-6}; \quad 5,4 \cdot 10^{-6}; \quad 2,5 \cdot 10^{-6}.$$

Тогда для характерных величин $E = 10^{11}$ Па, $\Delta T = 200$ К (приблизительная разница между комнатной температурой и температурой жидкого азота) и $\alpha = 3 \cdot 10^{-6}$ величина σ составит $2,5 \cdot 10^3$ МПа.

В оценке для площади микросоединений авторы выбрали значение $s_0 = 3 \cdot 10^{-10}$ м², что соответствует характерному диаметру 20 мкм индиевых микросоединений в реальных фотоприемных микросхемах, а за величины a и d взяты характерные значения, соответственно, 50 мкм (шаг между индиевыми микроконтактами в фотоприемной матрице) и 500 мкм (толщина полупроводниковой подложки), что дает для сечения балочки значение $S = 2,5 \cdot 10^{-8}$ м².

Сравним полученное значение с напряжением среза для индия, приведенное в работе [6] — 6,1 МПа: они различаются почти на три порядка, т. е. индий — настолько мягкий материал, что в первом приближении для термомеханических напряжений, возникающих при указанном изменении температуры, не представляет никакого сопротивления, и, казалось бы, гибридные сборки должны разрушаться буквально после нескольких термоциклов. Эта грубая и ошибочная оценка показывает, в чем суть проблемы механической прочности гибридных микросхем, постоянно работающих в режиме термоциклирования. Уточним полученную оценку. В реальных фотоприемных сборках мы имеем соединение двух тонких пластин (см. рис. 3, b), материалы которых несильно различаются по параметру коэффициента термического расширения. Параметры двух материалов будем отмечать индексами "1", "2". Можно показать, что в этом случае более точное выражение для σ будет выглядеть как:

$$\sigma = \Delta T \Delta \alpha E_2 S_2 / (1 + E_2 \alpha_2 / E_1 \alpha_1) 2s_0,$$

где $\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_2$.

При получении выражения мы пренебрегли величинами $\alpha_1 \Delta T$ и $\alpha_2 \Delta T$ по сравнению с единицей.

В эту формулу естественным образом входит разница в коэффициентах термического расширения материалов, что дает поправку около 1/2 и приблизительно 1/2 дает поправка $1 + E_2 \alpha_2 / E_1 \alpha_1$, если рассматривать в качестве двух материалов InAs и Si.

Таким образом, более точное значение для σ меньше грубой оценки приблизительно в четыре раза и составит около 600 МПа, но это значение все еще значительно больше напряжения среза: периферийные микросоединения по-прежнему должны разрушаться при изменении температуры из-за огромных термомеханических напряжений (при этом электрический контакт в некоторых точках какое-то время может сохраняться). Действительно, на практике можно наблюдать очень быстрое разрушение периферийных микросоединений на фотоприемных гибридных микросхемах, с другой стороны — подобные сборки выдерживают иногда тысячи термоциклов.

Для уточнения прочностных параметров используемого нами материала мы провели измерения напряжения среза для индия. Измерялась величина усилия, при котором происходило срезание индиевой проволоочки диаметром ~1 мм при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Схематично метод измерения иллюстрируется рис. 4. Величина усилия среза измерялась пружинным динамометром.

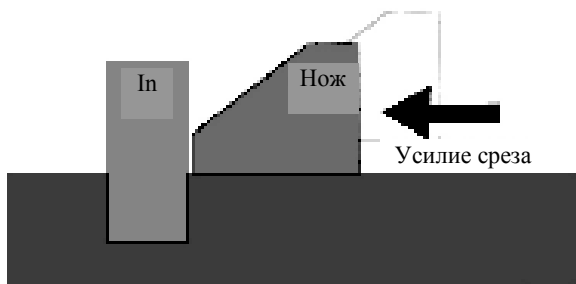


Рис. 4. Схема измерения усилия среза индиевой проволоочки (проволочка вставлена в отверстие держателя, по которому скользит "нож", грани которого отшлифованы алмазным диском)

Значение предельного напряжением индия на срез, полученное на проволочках при комнатной температуре, составило 2 МПа. Те же измерения, проведенные при температуре жидкого азота, показали увеличение предельного напряжения более чем в пять раз, т. е. составило ~10 МПа.

Кроме того, этот же параметр оценивался непосредственно на матричных кристаллах с индиевыми контактами. В последнем случае усилие среза измерялось при срезании специальным микроножом массива из 50-ти индиевых микроконтактов. Полученные двумя способами результаты оказались близкими по величине, но значения, полученные на проволочках, являются более точными и практически совпадают с данными, приведенными в работе [6].

Обсуждение результатов

Как показано выше, несмотря на все учтенные поправки, разница между величиной термомеха-

нического напряжения и прочностными характеристиками индия остается слишком большой, чтобы надежно обеспечить работу гибридных микросборок при многократных циклах охлаждения—нагрева [7]. В реальных фотоприемных микросхемах две полупроводниковые пластины для матриц размерностью от 128×128 до 526×526 соединены множеством индиевых соединений (порядка 10^4 — 10^5) и представляют собой биметаллическую пластину, "спаянную" по межграничной области индиевыми микроконтактами. В такой "биметаллической пластине" существенную роль, снижающую напряжения, играют два фактора — изгиб и упругая деформация.

Простейшую оценку для прогиба структуры можно получить, полагая, что средние линии двух пластин после изменения температуры имеют длину $L_1 = 1 + \alpha_1 \Delta T$ и $L_2 = \alpha_2 \Delta T$, а расстояние между ними составляет $(d_1 + d_2)$ [2]. Тогда из простых геометрических соображений для величины прогиба такой биметаллической пластины (см. рис. 3, в) имеем:

$$\Delta d = \Delta \alpha \Delta T L^2 / 2 (d_1 + d_2),$$

для толщин $d_1 = 500$, $d_2 = 800$ мкм и $L = 6500$ мкм получим оценку сверху для прогиба микросборки $\Delta d = 8$ мкм.

Учет энергии изгиба уменьшает это значение до 5—6 мкм.

Измеренные экспериментально величины прогибов имеют тот же порядок (1—2 мкм) [8], хотя и меньше оценочных. В данном случае важно не само точное значение прогиба, а объяснение того, за счет чего микросборка выдерживает иногда тысячи, а иногда только десятки термоциклов. Точный расчет всех механических напряжений, возникающих в сложной прямоугольной системе двух соединенных пластин, затруднителен, но очевидно, что изгиб микросборки является одним из основных факторов, который позволяет снять термомеханические напряжения в месте соединения.

С другой стороны, вовсе неочевидно, что снятие механических напряжений решает проблему устойчивости микросборки к многократным термоциклам: наоборот, по нашим данным, многократные изгибы представляют основной фактор разрушения.

Полученные значения предельного напряжения In на срез по сравнению с величинами для термомеханических напряжений для Si, GaAs и InAs означают, что при любом качестве гибридной сборки (чистоты поверхности индия, точности совмещения во время flip-chip-процесса и т. д.) разрушение микроконтактов в процессе термоциклирования будет неизбежно. В данной работе мы не рассматриваем способы решения данной проб-

лемы, а в литературе предлагаются различные способы: оттяжка микроконтактов, упрочнение эпоксидным слоем и т. д. Важным является то, что характеристики In, используемого при гибридизации указанных фотоприемных матриц, необходимо контролировать, при этом конкретная реализация возможной методики может быть осуществлена различными способами.

Заключение

Пластические свойства индия, используемого для формирования микроконтактов и последующей сборки гибридных матричных фотоприемных микросхем, могут контролироваться на основе полученной зависимости изменения диаметра индиевого микроконтакта от времени $(D/D_0)^8 = 1 + t/\tau$. Экспериментально определено пятикратное увеличение механического напряжения на срез индиевых проволочек при понижении температуры от комнатной до температуры жидкого азота. Оценки величины термомеханических напряжений в структуре, величины ее прогиба при изменении температуры, изменение пластичности индия с температурой показывают, что все пара-

метры структуры являются одинаково критическими, поэтому их оптимизация возможна только прямым контролем процесса разрушения индиевых микроконтактов при многократных циклах охлаждения—нагрева.

Литература

1. Norris K. C., Lanzberg A. // IBM J. Res. Dev. 1969. V. 13. No. 30. P. 226.
2. Овсяк В. Н., Курьшиев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
3. Войнов В. Г., Клименко А. Г., Недосекина Т. Н., Новоселов А. П. // Автометрия. 1996. № 4. С. 126.
4. Ефимов В. М., Есаев Д. Г. // Там же. 2007. № 4. С. 98.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. // Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 100 с.
6. Caccia M. The challenge of hybridization Interconnection, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. // Research, Sect. A. 2001. V. 465. Issue 1. P. 195, 196.
7. Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. et al.: Proc. // SPIE. 1997. V. 3061. P. 956.
8. Nastovjak A. E. Reconstruction of the Form of a Surface of Hybrid Photoreception Modules: Proceedings of 5th International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM-2004, Erlagol, Altai, July 1—5. 2004. P. 68.

Статья поступила в редакцию 18 июня 2008 г.

The indium plastic properties at focal plane arrays hybridisation

V. M. Efimov, D. G. Esaev

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

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

We discuss indium plastic properties and techniques for their determining, which are necessary for hybridization of integrated circuits by the flip-chip technology.

PACS: 85.40.Ls