

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ  
ПРИ СБОРКЕ ГИБРИДНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ  
НА ОСНОВЕ КРТ****В. М. Ефимов, Д. Г. Есаев***Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск  
E-mail: efimov@isp.nsc.ru*

Предлагается простой метод определения критического давления, не разрушающего диоды на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$  при гибридной сборке. Метод позволяет получить набор данных, надежно определяющих критический параметр (величину усилия) технологии flip-chip сборки гибридных фотоприемных устройств. Метод опробован на образцах  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x = 0,21$ ). Установлено, что резкое изменение электрофизических свойств материала происходит при увеличении диаметра индиевых микростолбов в процессе сдавливания в 2 раза и более и давлении около  $3 \text{ кг/мм}^2$ . Полученные калибровочные зависимости «приложенная нагрузка/деформация микростолба» показывают, что такое давление соответствует началу области «упрочнения» индия на деформационной кривой.

**Введение.** Метод гибридизации полупроводниковых микросхем с помощью соединения встречных контактов был предложен как альтернатива проволочным соединениям почти полвека назад и широко применяется в современной микроэлектронике [1]. В фотоприемных гибридных микросхемах инфракрасного диапазона при соединении кристаллов фотоприемной матрицы и кремниевого мультиплексора используются индиевые контакты (микростолбы), поскольку они сохраняют свою пластичность при температурах жидкого азота. Соединение осуществляется по так называемой технологии flip-chip [2, 3], при которой один из кристаллов переворачивается, происходит оптическое совмещение соответствующих индиевых контактов на обоих кристаллах, затем верхний кристалл опускается на нижний. Далее проводится сплавление контактов [3], если допускает материал микросхемы. Однако такая технология встречает определенные трудности применительно к фотоприемным устройствам (ФПУ) на основе тройного соединения  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ), которое не допускает нагрева до высоких температур [4]. В связи с этим применяется метод холодной сварки, когда встречные контакты соединяются сдавливанием [5]. Метод позволяет избежать ухудшения электрофизических параметров кристалла, вызываемого нагревом, поскольку сдавливание может быть осуществлено при комнатной температуре, но

имеет недостаток: механическое воздействие может вызвать образование дефектов.

Относительно слабая механическая прочность  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  отмечалась в работе [6], где проведено исследование пластических свойств материала в достаточно широком диапазоне изменения состава ( $0 < x < 0,3$ ) и указано на возможную деградацию электрофизических свойств из-за высокой плотности дислокаций, образующихся в материале при механических нагрузках. В этой связи возникает задача установления прямой связи между механическими нагрузками на материал в процессе сборки гибридных микросхем по технологии flip-chip и деградацией их электрофизических параметров. В [7] приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов для двух величин воздействий при давлении 41 и 60 Н/мм<sup>2</sup> и указано, что деградация  $p$ - $n$ -переходов происходит, по-видимому, в промежуточной области давлений. Подробные исследования такой взаимосвязи осложняются, прежде всего, недостаточной воспроизводимостью технологии, а также неоднозначностью одиночных механических воздействий и последующих электрофизических измерений.

Актуальность представленной работы вызвана необходимостью определения такого рабочего давления для гибридной сборки ФПУ на основе соединений  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , при котором соблюдается компромисс между надежностью сборки и отсутствием деградации фоточувствительных элементов в процессе гибридизации.

Предлагается простой метод пошагового изменения величины механического воздействия на отдельные диоды, выполненные на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , за счет создания перекося при приложении давления на линейку фотодиодов. Одновременно на одной и той же подложке можно получить набор статистически достоверной информации по изменению электрофизических свойств фотодиодов в зависимости от давления на материал. Применение такого метода к  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0,21$ ) на линейке из  $1 \times 64$  фотодиода показало, что изменение электрофизических свойств материала происходит резко при увеличении диаметра микростолба в 2 раза и величине давления около 3 кг/мм<sup>2</sup>, что значительно больше, чем давление, требуемое для надежной холодной сварки. Отметим, что материал подложки с  $x = 0,21$  применяется для изготовления фотоприемников с максимальной чувствительностью в области прозрачности атмосферы 8–12 мкм. Калибровочные зависимости «приложенная нагрузка/деформация микростолба» показывают, что давление, при котором начинается деградация  $p$ - $n$ -переходов, соответствует началу «упрочнения» индия на деформационной кривой.

**Образцы.** Исследовались слои КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs ориентации (103) с промежуточным буферным слоем CdZnTe. Непосредственно после роста пленки имеем  $n$ -тип проводимости. После отжига пленок в инертной атмосфере  $n$ -тип проводимости конвертируется в  $p$ -тип.

Методом низкотемпературной планарной технологии, описанной в работе [8], на выращенных слоях  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$   $p$ -типа была изготовлена линейка из 64 фоточувствительных  $n$ - $p$ -переходов с шагом 100 мкм и размером элементов  $50 \times 50$  мкм. Фотодиоды сформированы ионной имплантацией бора с энергией ионов 120 кэВ и дозой облучения  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Толщина  $n$ -слоя КРТ составила около 1 мкм. Два ряда линеек смещены относительно друг друга на полшага. Пассивация поверхности фотодиодов проводилась двухслой-

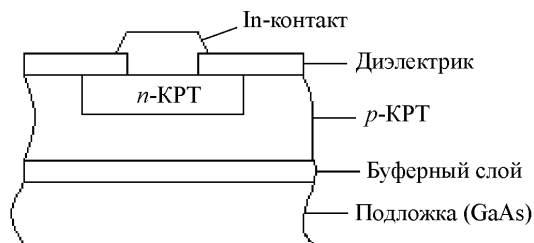


Рис. 1. Одиночный фотодиод линейки в поперечном разрезе

ным низкотемпературным диэлектриком  $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ . Конструкция одиночного фотодиода представлена на рис. 1. Максимум фоточувствительности выращенных слоев достигается на длине волны  $\lambda_{\text{max}} = 11$  мкм при длинноволновой границе чувствительности по полувысоте  $\lambda = 12,3$  мкм, что соответствует содержанию CdTe  $x = 0,21$ .

**Описание метода.** Предлагаемый метод, назовем его «методом перекося», для создания меняющегося от одного микростолба к другому давления на индиевые контакты  $p-n$ -переходов, сформированных в слое  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , схематично показан на рис. 2. На подложку с линейкой 2, содержащей два ряда по 64  $p-n$ -перехода, помещалась полированная сапфировая пластина 1 толщиной 2 мм, к которой в определенной точке прикладывалось некоторое усилие  $F$ . Расстояние между центрами микростолбов 3 на линейке составляло 100 мкм. Точка приложения усилия и его величина выбирались таким образом, чтобы после его приложения можно было иметь как микростолбы, раздавленные почти до соединения с соседними (слева на рисунке), так и элементы, на которые почти не оказывалось давление (справа на рисунке).

На аналогичном образце-спутнике снималась калибровочная зависимость «приложенное усилие/величина уширения микростолба». При этом давящее усилие на центр линейки прилагалось в течение 10 с. Величина уширения микростолбов изменялась в относительных единицах  $D/D_0$ , где  $D$  – диаметр микростолба после приложения давления,  $D_0$  – исходное значение диаметра столбов, составляющее 36 мкм. Величина уширения изменялась на образце-спутнике пошаговым увеличением давления. Из-

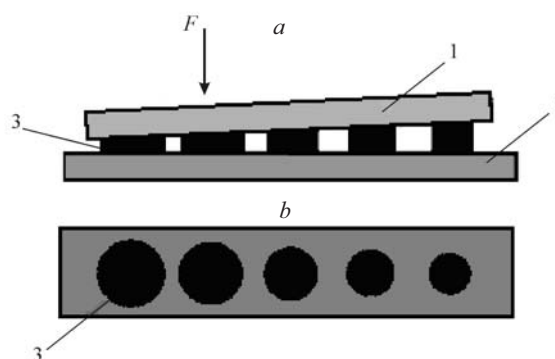


Рис. 2. Условная схема «метода перекося»: вид сбоку (а), вид сверху через сапфир на раздавленные индиевые микростолбы (b)

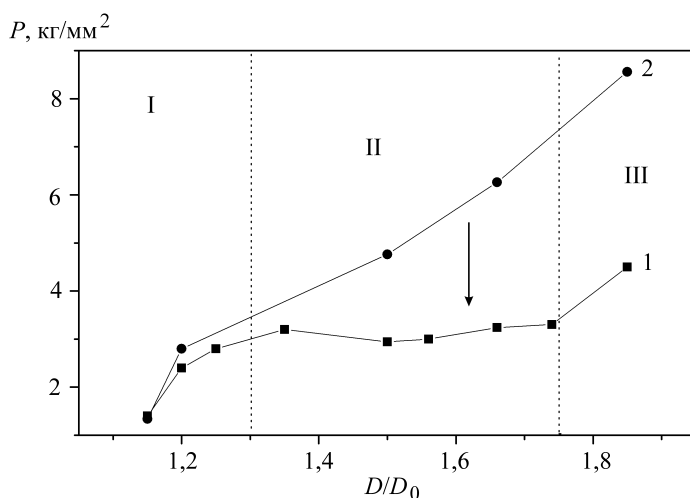


Рис. 3. Калибровочная зависимость деформации индиевых микростолбов от приложенного давления. Кривые 1 и 2 – приложенное давление, рассчитанное из конечного и начального размеров диаметров микростолбов соответственно

мерение размеров микростолбов производилось с помощью микроскопа ИМЦЛ 100 × 50А (точность цифрового отсчета 0,1 мкм). Реальная точность измерений размеров микростолбов составляла около 2 мкм, поскольку после их формирования методом фотолитографии при толщине индия около 6 мкм микростолбы имеют неровные края из-за неравномерного травления. Калибровочная кривая зависимости давления, приведенного к конечной площади микростолба ( $F/S$ ), от величины относительной деформации  $D/D_0$  ( $S = \pi D^2/4$ ) показана на рис. 3. Отметим, что калибровочная кривая 1 является, по сути, классической кривой «диаграммы напряжений» сжатия, применяемой при исследовании деформационных свойств металлов [9] и имеет три хорошо просматриваемых участка: I – участок возрастания деформации микростолба при повышении прикладываемого давления, II – горизонтальный участок, соответствующий «течению» материала, и III – участок «деформационного упрочнения». Последний участок, на котором деформационная кривая резко идет вверх, в нашем случае только обозначился, но в [5] показано, что такое возрастание наблюдается именно при значениях  $D/D_0$  вблизи 1,8. В данной работе область значений  $D/D_0$  подробно не исследовалась, поскольку не представляет интереса с практической точки зрения, так как процесс сборки проводится при гораздо меньших значениях  $D/D_0$  (вблизи 1,3). Для нас наиболее важной является область перехода от второго к третьему участку. Как будет показано далее, она соответствует началу электрофизической деградации  $p$ - $n$ -переходов.

**Исследование деградации  $p$ - $n$ -переходов.** Для контроля степени воздействия нагрузки на  $n$ - $p$ -переходы производилось измерение темновых ВАХ диодов линейки. Измерения, проведенные на трех фотоприемных линейках, которые изготовлены на одной пластине, показали сходные результаты. Приведем их для одной из линеек. Измерения ВАХ осуществлялись с помощью тонкого (15 мкм) зонда из вольфрамовой позолоченной проволоки, исключаяющей механическое повреждение индиевого столба и  $n$ - $p$ -перехода. Образец помещался на медный столик, охлаждаемый жидким азотом. Темпе-

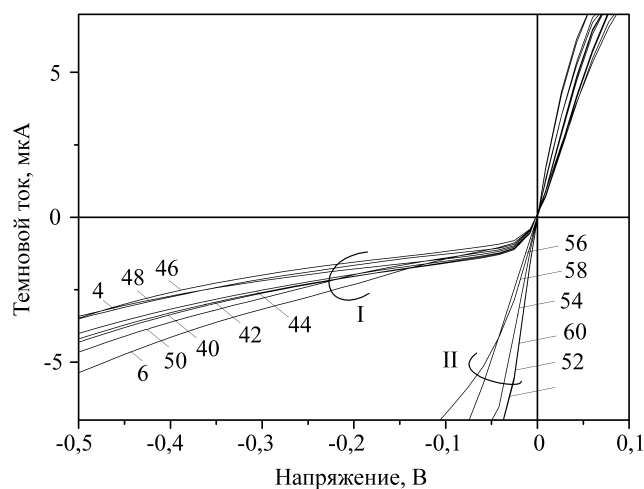


Рис. 4. Темновые ВАХ диодов линейки размером  $1 \times 64$ . Диоды 4 и 6 не подвергались давлению. Остальные диоды (с 40-го по 60-й) подвергались давлению различной величины. ВАХ диодов с 40-го по 50-й (группа I) не изменились, ВАХ диодов с 52-го по 60-й (группа II) деградировали

ратура образца составляла около 78 К. До приложения деформирующего давления по «методу перекося» на всей линейке измерялись исходные ВАХ  $p-n$ -переходов через один элемент. После формирования индиевых контактов, деформированных до различного значения  $D/D_0$ , ВАХ измерялись повторно. Таким образом, на одном и том же образце было получено достаточно большое количество темновых ВАХ и статистически точная картина влияния давления на деградацию  $p-n$ -переходов. Результаты измерений ВАХ показаны на рис. 4. Как видно из рисунка, все семейство ВАХ может быть разделено на две группы.

Группа I – темновые ВАХ совпадают с исходными, измеренными до воздействия сдавливающего усилия. Эти ВАХ получены для диодов от 40-го до 50-го, при этом отсчет ведется от края линейки, вблизи которого деформация микростолбов минимальная.

Группа II – ВАХ начинается с диода 52. Для этой группы наблюдается резкое возрастание обратных темновых токов. Для микроконтакта 52 увеличивается диаметр индиевого микростолба ровно в 2 раза ( $D/D_0 = 2$ ). Как отмечено выше, именно вблизи этих значений уширения начинается резкое возрастание деформационной кривой (см. рис. 3, кривая 1).

На первый взгляд такое совпадение кажется чисто случайным: возрастание обратных темновых токов определяется, очевидно, деградацией диодов на основе КРТ, а резкий рост деформационной кривой – только пластическими свойствами индия. Однако необходимо отметить, что деформационная кривая является стационарной, т. е. последующая выдержка образца под давлением практически не увеличивает значение  $D/D_0$ , что и отмечалось в [5]. Но если пересчитать величину давления исходя из начальной площади микростолба, то получим зависимость 2 на рис. 3, на которой, естественно, нет горизонтального участка. В области II кривая 2 быстро релаксирует к «полочке» кривой 1 за счет течения индия, как показано стрелкой. В области же деформационного упрочнения действие приложенного давления осуществляется на протяжении всех 10 с, приводя к возникновению дислокаций в КРТ

и деградации диодов, как показано в работе [7]. Поэтому вполне вероятно, что близость значения  $D/D_0 = 1,8$ , при котором начинается резкий рост деформационной кривой, и значения  $D/D_0 = 2,0$ , при котором начинается деградация  $p$ - $n$ -переходов, является совсем не случайной.

**Заключение.** В данной работе предложен простой «метод перекося», который позволяет на одной подложке  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  получить набор подвергшихся механическому воздействию (давлению) фотоприемных  $p$ - $n$ -переходов с плавно меняющейся величиной воздействия. Метод дает возможность надежно установить величину критического усилия, при котором начинается деградация электрофизических параметров диодов. Подробно исследованы образцы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0,21$  и показано, что деградация  $p$ - $n$ -переходов происходит резко при переходе от области «текучести» индия к области деформационного упрочнения микростолбов. Данная область соответствует давлениям, при которых диаметр микростолбов увеличивается приблизительно в 2 раза. Это существенно превышает значение  $D/D_0 = 1,3$ , при котором осуществляется процесс сборки холодной сваркой. Предложенный метод может быть применен для исследования механических воздействий на электрофизические характеристики  $p$ - $n$ -переходов на базе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  других составов.

Авторы выражают благодарность В. В. Шашкину и В. В. Васильеву за полезное обсуждение полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Norris K. C., Lanzberg A.** Reliability of control collapse chip interconnections // IBM Journ. Res. Dev. 1969. **13**. P. 226.
2. **Quinones H., Babiarz A.** Flip-Chip, CSP and WLP technologies: A reliability perspective // [http://www.asymtek.com/news/articles/2001\\_08\\_imaps\\_norway.pdf](http://www.asymtek.com/news/articles/2001_08_imaps_norway.pdf)
3. **Caccia M.** The challenge of hybridization // Nucl. Instrum. Meth. 2000. **A465**. P. 195.
4. **Kanno T., Saga M., Kawahara A. et al.** Development of MBE grown CdHgTe  $64 \times 64$  FPA for long wavelength IR detection // Proc. SPIE. 1993. **2020**. P. 41.
5. **Войнов В. Г., Клименко А. Г., Недосекина Т. Н., Новоселов А. Р.** Пластические свойства индиевых микростолбов. Проблема контактирования на КРТ // Автотметрия. 1996. № 4. С. 126.
6. **Cole S., Willoughby A. F. W., Brown M.** The mechanical properties of  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Journ. Cryst. Growth. 1982. **59**. P. 370.
7. **Ромашко Л. Н.** Исследование процессов переноса заряда в  $p$ - $n$ -переходах, изготовленных на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0,22$ ), и их изменений при механическом и температурном воздействиях: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук /СО РАН. ИФП. Новосибирск, 2001. 16 с.
8. **Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. et al.**, Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates // Proc. SPIE. 1997. **3061**. P. 956.
9. **Беляев Н. М.** Сопротивление материалов М.: Наука, 1965.

Поступила в редакцию 6 июня 2006 г.