

УДК 531.782 : 621.3.049.776.43 : 621.383

А. Г. Клименко, В. Г. Войнов, А. Р. Новоселов, Т. Н. Недосекина,
В. В. Васильев, Т. И. Захарьяш, В. Н. Овсюк

(Новосибирск)

ОСОБО ПЛАСТИЧНЫЕ ИНДИЕВЫЕ МИКРОСТОЛБЫ ДЛЯ МАТРИЧНЫХ ФПУ НА CdHgTe

Разработана новая технология особо пластичных индиевых микро- столбов, предназначенных для гибридизации фотоприемных матричных устройств на основе CdHgTe. Изучены экспериментально деформационные кривые отдельных индиевых микро- столбов, изготовленных обычно используемым методом высоковакуумного напыления и фотолитографии и с помощью нашей технологии. Более высокие микро- столбы более пластичны. При увеличении среднего диаметра микро- столбов индия в 1,5 раза пластическое течение возникает при меньших механических напряжениях (1,4 раза). Пластичность индиевых микро- столбов улучшается приблизительно в 2 раза по мере увеличения температуры от 20 до 84 °С. Пластичность ухудшается с течением времени (десять часов после напыления ~1,5 раза). Мы использовали пирамидоподобные двухслойные индиевые столбы. Технология включает высоковакуумное напыление и фотолитографию для изготовления нижних слоев микро- столбов и высоковакуумное напыление сквозь маску для верхних слоев. Нижние слои имеют средний диаметр индиевых микрокристаллов меньше, чем в верхних слоях. По форме нижние слои сравнительно низкие и широкие, их пластичность хуже, и поэтому давления, достаточные для пластического течения и сварки верхних слоев, слишком малы для нижних. Нижние слои микро- столбов распределяют нагрузку между своими основаниями и снижают давление. Давление, оказываемое на *p-n*-переходы фотоприемных матриц во время процесса сварки, меньше 300 г/мм² при 84 °С и меньше 550 г/мм² при 20 °С, что в 2,33 и 3,13 раза ниже критических давлений для CdHgTe. Высота сваренных столбов 24–26 мкм.

Введение. Для увеличения надежности индиевых микро- столбов в процессе термоциклирования необходимо увеличивать их высоту, что одновременно приводит к снижению давления, возникающего при сварке. Это достигается обычно использованием какого-либо метода переплавления индия [1, 2]. Однослойные индиевые столбы при сварке нередко нуждаются в значительных давлениях (3,8 кг/мм² [3], 4,0 кг/мм² [2]), которые могут оказаться слишком большими из-за опасности деградаций *p-n*-переходов.

Известно [4], что давление 1,0 кг/мм² может быть слишком велико для узкозонного CdHgTe, так как оно соответствует его нижнему пределу прочности. В настоящее время неизвестны критические напряжения деградации CdHgTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В

наших исследованиях мы наблюдали иногда начало деградации p - n -переходов при давлении менее $1,5 \text{ кг/мм}^2$. Ясно, что необходимо снижать давление, возникающее при сварке индиевых микростолбов, путем увеличения пластичности. Мы не используем переплавление индия, чтобы избежать термической деградации.

Впервые применены двухслойные пирамидоподобные индиевые микростолбы для гибридизации матричных ФПУ [5]. В настоящей работе изучаются зависимости пластических свойств таких микростолбов от температуры, времени и зернистости.

1. Метод измерений, образцы. Ранее нами был описан метод и прибор для измерений кривых пластического течения индиевых микростолбов [6, 7]. В настоящей работе использован новый вариант прибора, позволяющий проводить измерения на оптическом микроскопе «Инфрам» (ЛОМО), в том числе при повышенных температурах.

Метод состоит в следующем: плоский прозрачный индентор 4 опускают на вершину индиевого столба. Диаметр индентора 60 мкм , его высота 70 мкм (рис. 1). Оптически гладкая плоская поверхность индентора параллельна плоскости вершины индиевого столба, а прикладываемая к индентору нагрузка перпендикулярна плану кристалла. С помощью микроскопа измеряют (сквозь индентор) площадь поверхности вершины по мере возрастания нагрузки. Специально следят за тем, чтобы первичное соприкосновение происходило без толчков при минимальной нагрузке. Нагрузка, деленная на площадь соприкосновения, есть напряжение (давление). Деформацию определяем как r/r_0 , где r_0 – радиус вершины индиевого столба до деформации, r – после деформации. Выдержка при каждой нагрузке составляла 4 мин, тогда как обычно время релаксации менее 1 мин. Нагрузка возрастала шаг за шагом.

Разрешение микроскопа составляло около $0,3 \text{ мкм}$, инструментальная ошибка измерений при $r_0 = 6 \text{ мкм}$ была не более 6 % и снижалась по мере того, как In -столб расплющивался. Ошибка измерения нагрузки была менее 1 %, нагрузку задавали с помощью малогабаритных плоских пружинных

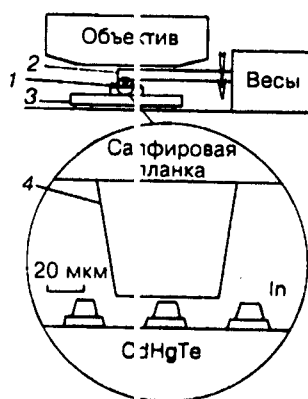
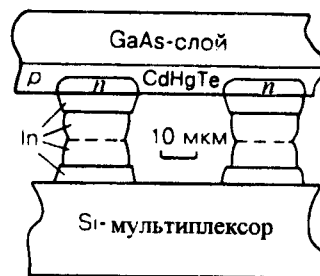


Рис. 1. Прибор для измерения зависимостей механическое напряжение – деформация отдельных индиевых микростолбов:

1 – кристалл с индиевыми микростолбами; 2 – сапфировая планка с индентором и нагревателем (нагрузку устанавливают с помощью плоских пружинных весов); 3 – подставка-нагреватель; 4 – прозрачный сапфировый индентор

Рис. 2. Двухслойные индиевые микростолбы (см. рис. 1) после сварки. Пластическая деформация и свадка происходят в верхних слоях



весов. На сапфировой планке с индиевым 2 размещен тонкий плоский нагреватель, не препятствующий измерениям. Кристалл с индиевыми микростолбами 1 располагался на пьедестале-нагревателе 3. Описанный прибор позволяет производить измерения кривых механическое напряжение – деформация при шаге ячеек матрицы 50 мкм, а при шаге 35 мкм необходимо использовать индентор диаметром 40 мкм. Соседние индиевые столбы во время измерений остаются неповрежденными.

Вполне возможно измерять пластическое течение рабочих индиевых столбов на периферии матрицы (в этом случае необходимо затем восстанавливать поврежденные столбы перед сборкой) либо кривые пластичности на специально для этого введенных в томологию столбах.

Индиевые столбы изготавливались высоковакуумным напылением и фотолитографией (нижние слои) и высоковакуумным напылением сквозь маску отверстий (верхние слои). В качестве источника при напылении использовали индий 99,999 % чистоты. Фотографии таких столбов, сделанные на сканирующем электронном микроскопе, опубликованы нами ранее (см. рис. 8 [5]). Сечение двухслойных пирамидоподобных столбов показано на рис. 1 перед сваркой и на рис. 2 после сварки. Высота столбов 15,5 мкм. Нижние слои имели высоту 5,5 мкм и площадь на планаре 25×25 мкм. Верхние слои были высотой 10 мкм, диаметр при вершине – 12 мкм, а при контакте с нижним слоем – 17 мкм. Суммарная высота столбов после сварки составляет 24–26 мкм.

2. Результаты и обсуждение. Для исследования использовались столбы, выращенные на одном кремниевом кристалле-носителе в процессе изготовления кремниевого мультиплексора, и, следовательно, свойства пластичности столбов должны быть однотипны (в пределах технологического разброса параметров). Кривые напряжение – деформация, измеренные на двухслойных индиевых столбах 1–4 и однослойных столбах 6–10 при комнатной температуре 20 °С, приведены на рис. 3. Каждая кривая относится к конкретному столбу. Однослойные индиевые столбы – это нижние этажи двухслойных столбов. И те и другие находятся на одном и том же кристалле. Есть все основания полагать, что кривые 6–10 показывают, как вели бы себя нижние слои двухслойных столбов, если бы нагрузка прикладывалась к ним.

На рис. 4 показаны аналогичные зависимости при $T = 40$ °С, а на рис. 5 – при $T = 84$ °С. В процессе измерений мы обращали внимание на возможную деформацию нижних слоев в процессе деформирования верхних. Это возможно до тех пор, пока $r/r_0 < 1,7$, после чего контур нижнего слоя становится труднонаблюдаемым из-за расплюсченного верхнего. Отметим, что деформация нижнего слоя иногда не наблюдалась.

Все кривые имеют некоторые особенности, характерные для образцов поликристаллических металлов обычных размеров (миллиметры и более). Индиевый столб практически не деформируется, пока давление относительно-

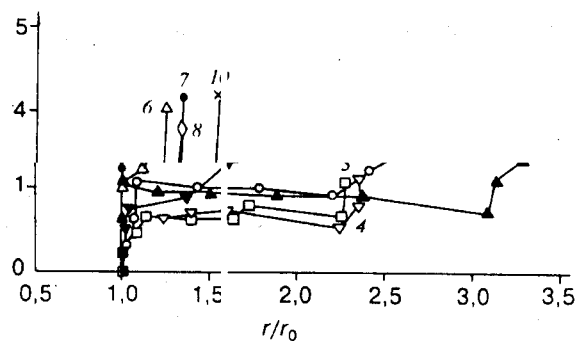


Рис. 3. Зависимости механическое напряжение – деформация для двухслойных индиевых микростолбов 1–5 и для однослойных 6–10. Однослойные столбы были изготовлены по той же технологии на том же кристалле, но без верхних слоев. Температура 20 °С

но небольшое; далее напряжение проходит через максимум, после чего следует более или менее плоский участок пластического течения, а затем участок деформационного упрочнения. Не на всех кривых наблюдается пик прочности, на некоторых кривых отсутствует «горизонтальный» участок пластического течения, они характеризуются участками нарастающего (сильнее или слабее) напряжения по мере увеличения деформации (см. кривые 7 и 9 на рис. 5). Плато пластического течения некоторых столбов имеют сложную форму: двухступенчатую или даже трехступенчатую (см. 4 на рис. 3; 1 на рис. 4; 2 на рис. 5). Из рис. 3–5 видно, что двухслойные столбы более пластичны, чем однослойные, их полочки пластического течения ниже

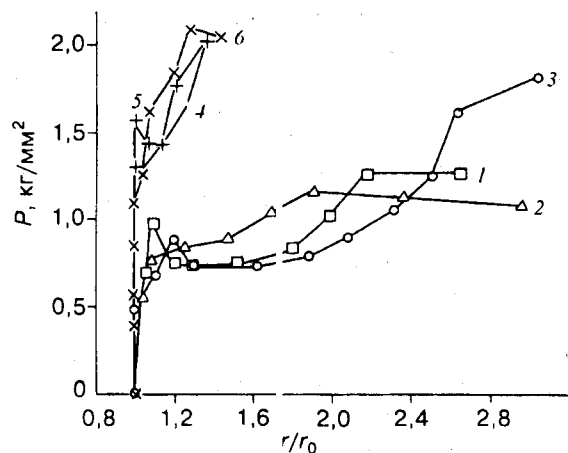


Рис. 4. Зависимости механическое напряжение – деформация. Двухслойные индиевые микростолбы 1–3 и однослойные микростолбы 4–6. Температура 40 °С

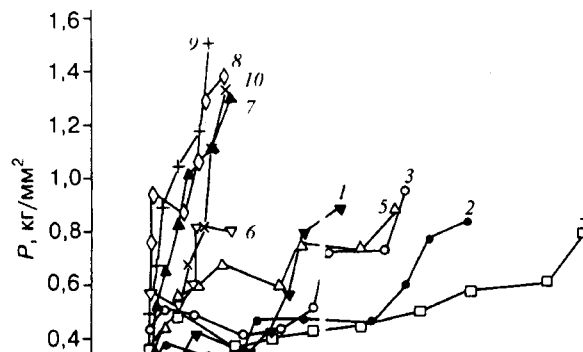


Рис. 5. Кривые напряжение–деформация для двуслойных индиевых микростолбов 1–5 и для однослойных 6–10. Температура 84 °C

и шире. Вообще, при прочих равных условиях более высокие индиевые столбы и столбы, имеющие большее отношение высоты к диаметру, пластичнее (ср. с нашими работами [6, 7]).

Из практики известно, что деформация $r/r_0 = 1,3$ достаточна для качественной холодной сварки. Именно такие точки на кривых и небольшие области вблизи них представляют наибольший интерес. Пластичность индиевых столбов слегка увеличивается при $T = 40\text{ °C}$ (см. рис. 4). Это наблюдается для однослойных столбов при $r/r_0 = 1,2$ (приблизительно на 10%). Для однослойных столбов не удается отследить каких-либо улучшений при $r/r_0 = 1,3$ из-за значительного деформационного упрочнения отдельных столбов при таких деформациях. Двуслойные индиевые столбы показывают некоторое улучшение пластичности (около 7% при $r/r_0 = 1,3$). Значительное улучшение пластичности наблюдается при $T = 84\text{ °C}$ как для однослойных столбов (2,5 раза), так и для двуслойных (1,8 раза).

Давление, оказываемое на p - n -переходы фотоприемных матриц CdHgTe во время холодной сварки на индиевых микростолбах, различное для каждой индивидуальной пары индиевых столбов, соединяющих p - n -переход фотоприемной матрицы с ячейкой считывания Si-мультиплексора, и соответствует тем давлениям на графиках, которые имели место при r/r_0 , при котором остановлен процесс холодной сварки.

Отметим, что площади поперечных сечений вблизи деформированных и сваренных вершин двуслойных индиевых столбов (см. рис. 2, на котором деформация соответствует $r/r_0 = 1,3$) все еще в 2 раза меньше, чем площади оснований нижних слоев. Соответственно давления, оказываемые на p - n -переходы, в 2 раза меньше, чем вблизи свариваемых вершин. Вообще говоря, давления, определенные из рис. 3–5, следует уменьшить на отношение A_0/A , где A_0 – площадь основания нижнего слоя, A – площадь сечения соединительного In-столба вблизи сваренных вершин (см. рис. 2), чтобы оценить давления на p - n -переходы в CdHgTe.

Если кристалл фотоприемной матрицы и кристалл-мультиплексор совмещены и установлены плоскопараллельно с высокой точностью, то все

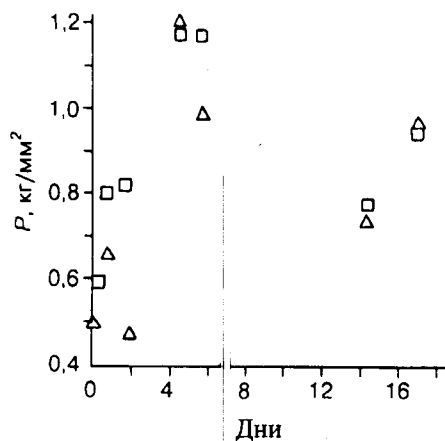


Рис. 6. Избранные точки зависимостей напряжения – деформация двухслойных индиевых столбов от времени после окончания высоковакуумного напыления: $r/r_0 = 1,3$ (треугольники); $r/r_0 = 1,4$ (квадраты) при комнатной температуре и средних значениях. Указанные величины деформации обычно дост

индиевые столбы достигают одной и той же заранее обусловленной деформации (по мере контролируемого сближения кристаллов) практически одновременно, поскольку исходные индиевые микростолбы на кристаллах одинаковы по высоте. Дальнейшее сближение кристаллов необходимо остановить. Величина деформации должна быть достаточна для качественной сварки. Из кривых, представленных на рис. 3–5, можно определить, какое давление каждый из исследованных индиевых столбов оказал бы на p - n -переход CdHgTe-матрицы, если бы он был использован для сварки фотоприемного модуля, например, при $r/r_0 = 1,3$ (либо при $r/r_0 > 1,3$).

На рис. 6 в зависимости от времени в первые часы и дни после высоковакуумного напыления представлены средние значения механического напряжения (давления) для $r/r_0 = 1,3$ и $r/r_0 = 1,4$. Каждая точка на графике представляет собой результат усреднения из нескольких зависимостей напряжение – деформация, измеренных на двухслойных столбах. Кривые напряжение – деформация в первые часы (десятки часов) характеризуются относительно низкими давлениями при довольно значительных деформациях $r/r_0 = 1,3$, а при деформациях $r/r_0 = 1,4$ выходят на плато, характеризующиеся несколько большими давлениями. Вид этих зависимостей достаточно близок к кривым напряжение – деформация монокристаллических образцов металлов. Это может быть объяснено тем, что поверхностные пленки на границах зерен поликристаллического индия не успевают образоваться во время высоковакуумного напыления. Они формируются в течение некоторого времени после, в связи с чем прочность индиевых столбов возрастает. Возрастание прочности индиевых столбов происходит нелинейно во времени. В дальнейшем необходимо проделать более подробные измерения кривых напряжение – деформация их поведения во времени, в частности, прохождения через пик. Отметим, что в первые часы индиевые столбы более пластичны (1,5–2 раза), чем через более продолжительное время.

На рис. 7 показаны типичные кривые напряжение – деформация для двухслойных индиевых столбов. Столбы отличаются лишь количеством

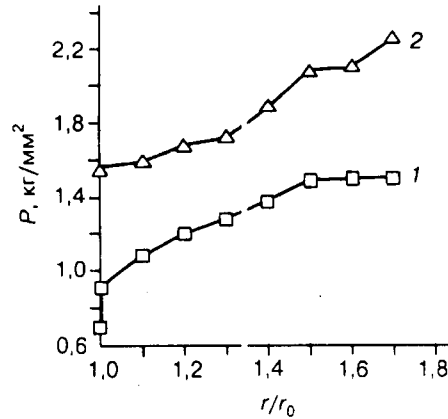


Рис. 7. Зависимость пластичности двухслоенных индиевых микростолбов от количества микрокристаллов индия на их вершинах: 1 – 7 микрокристаллов, 2 – 15 микрокристаллов. Температура комнатная

индиевых кристаллов – зерен на вершинах, выявленных металлографическим методом. Измерения проведены через 5 мес. после напыления, верхние слои столбов имели $r_0 = 9$ мкм и высоту 8 мкм. Эти особенности объясняют более высокие механические напряжения столбов на рис. 7 по сравнению со столбами, характеристики которых показаны на рис. 3–5. Более крупнозернистые индиевые столбы более пластичны. В диапазоне деформаций $r/r_0 = 1,2–1,5$ различие давлений составляет 35–40 % (см. рис. 7).

С точки зрения предотвращения деградаций в CdHgTe индиевые микростолбы должны пластически деформироваться и свариваться при механических напряжениях ниже нижнего предела прочности слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), для того, чтобы избежать возможной деградации электрических свойств из-за возникновения дополнительных электрически активных дислокаций. В настоящее время мы не располагаем информацией о пределах прочности в МЛЭ CdHgTe и поэтому использовали данные для монокристаллического CdHgTe [4]. Нижний предел прочности для узкозонных образцов ($x = 0,2$) составляет около $2,46$ кг/мм² при 20 °С. Это значение следует умножить на $0,7$, чтобы получить предельно допустимое давление. Таким образом, если давление в CdHgTe меньше чем $1,7$ кг/мм² (при 20 °С), можно быть уверенным в том, что пластическое течение в нем не возникнет, новые дислокации не образуются, связанные с давлением деградации электрических свойств объемного монокристаллического CdHgTe будут отсутствовать. Аналогично определяем из зависимостей, приведенных в [4], что лимитирующее давление при 84 °С составляет $0,7$ кг/мм². Отметим, что структурные дефекты в МЛЭ CdHgTe и твердые микрон неоднородности в индии могут снизить предельно допустимое давление.

Фактор безопасности определяем как отношение предельно допустимого давления к наиболее высокому давлению, которое оказывает некоторый индиевый столб на p - n -переход CdHgTe во время гибридизации по мере достижения деформации, достаточной для качественной сварки. При вычислении фактора безопасности необходимо учесть упоминавшееся ранее отношение A_0/A .

Заключение. Двухслойные пирамидоподобные индиевые столбы, изготовленные по новой технологии, могут быть сварены при давлениях на $p-n$ -переходы в CdHgTe не более $0,55 \text{ кг/мм}^2$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $0,3 \text{ кг/мм}^2$ при $T = 84 \text{ }^\circ\text{C}$. Фактор безопасности 3,13 и 2,33 соответственно. При этом деформация составляет $r/r_0 = 1,3$, что достаточно для качественной сварки.

Фактор безопасности может быть увеличен при уменьшении времени между высоковакуумным напылением верхних слоев микростолбов и моментом соединения фотоприемной матрицы и мультиплексора до нескольких часов. Длительная выдержка в течение нескольких дней после напыления индия и прогрев кристаллов могут снижать фактор безопасности. Фактор безопасности может возрастать также при уменьшении диаметра верхних этажей пирамидоподобных столбов, однако прочность соединения кристаллов при этом снижается. В дальнейшем следует изучить это обстоятельство дополнительно и определить условия оптимизации формы индия. Следует также более подробно исследовать начальные стадии упрочнения индиевых микростолбов на воздухе после высоковакуумного напыления.

Описан усовершенствованный метод и устройство для изучения кривых пластического течения отдельных индиевых микростолбов.

Измерены кривые напряжение - деформация однослойных и двухслойных пирамидоподобных индиевых микростолбов, в том числе при повышенных температурах и во времени. Метод может быть полезен для измерения пластических свойств индиевых микростолбов независимо от технологии изготовления последних. Реализована возможность измерений при шаге матрицы 50 мкм и показана возможность измерений для шага 35 мкм .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ziegler J., Bruder M., Wendler J., Maier H. Second generation – FPA's with MCT sensors arrays in hybrid approach // Proc. SPIE. 1992. 1735. P. 151.
2. Kim Y.-N., Choi J.-H., Choi K.-S. et al. New reflow process for indium bump // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 60.
3. Kamo T., Saga M., Kawahara A. et al. Development of MBE grown HgCdTe 64×64 FPA for long wavelength IR detection // Proc. SPIE. 1993. 2020. P. 41.
4. Cole S., Willoughby A. F. W., Brown M. The mechanical properties of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // J. Cryst. Growth. 1982. 59. P. 370.
5. Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. et al. Focal plane arrays on HgCdTe epitaxial layers MBE – grown on GaAs substrates // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 956.
6. Klimenko A. G., Voinov V. G., Novoselov A. R. A device and method for plastic strain measurements of microsamples // Instrum. and Experimental Techniques. 1996. 39. P. 105.
7. Войнов В. Г., Клименко А. Г., Недосекина Т. Н., Новоселов А. Р. Пластические свойства индиевых микростолбов. Проблема контактирования на КРТ // Автометрия. 1996. № 4. С. 126.

Поступила в редакцию 28 мая 1998 г.