

УДК 531.782 : 621.3.049.776.43 : 621.383

В. Г. Войнов, А. Г. Клименко, Т. Н. Недосекина, А. Р. Новоселов

*(Новосибирск)***ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИНДИЕВЫХ МИКРОСТОЛБОВ.
ПРОБЛЕМА КОНТАКТИРОВАНИЯ НА КРТ**

Впервые измерена зависимость деформации от механического давления реальных индиевых микростолбов, используемых в технологии микроконтактирования ФПУ на КРТ. Измерено механическое давление, оказываемое конкретными микростолбами на поверхность кристаллов в процессе холодной сварки. Деформационные кривые содержат участок, на котором релаксация размеров отсутствует, далее наблюдается пик прочности, затем следует более или менее широкая «полочка пластичности» и участок упрочнения. При одинаковой величине микростолбов l_p (1—5 мкм) по мере увеличения высоты микростолбов «полочка пластичности» снижается и одновременно область деформационного упрочнения сдвигается в сторону все больших деформаций. В подавляющем большинстве случаев микростолбы удовлетворяют не только допустимому давлению $3,8 \text{ кг/мм}^2$ [2], но и $1,7 \text{ кг/мм}^2$ — наиболее жесткому ограничению [4] (при оптимальной деформации в процессе микросварки на уровне $r/r_0 = 1,3$). Обнаружены изредка встречающиеся «особо прочные» микростолбы, природа которых, статистика и способы устранения должны быть предметом дальнейшего тщательного изучения.

Малая механическая прочность кристаллов CdHgTe является общеизвестным фактом. Поэтому возникла настоятельная необходимость в разработке способа и устройства для измерения зависимости деформации от механического напряжения непосредственно на отдельных индиевых микростолбах, применяемых для микроконтактирования в линейчатых и матричных фотоприемных устройствах на КРТ. Подобные измерения в литературе не описаны, более подробно устройство и метод изложены в [1].

Индиевые микростолбы (в литературе также используют названия: «подушки», «прокладки», «выступы») имеют обычно размеры от $20 \times 20 \times 5$ до $50 \times 50 \times 15$ мкм. При объединении фотоприемной матрицы (с засветкой с тыльной стороны) с кремниевой матрицей считывания два кристалла плоскопараллельно сближают таким образом, чтобы каждый индиевый столб фотоприемной ячейки встретился с соответствующим индиевым столбом кремниевой матрицы считывания, при этом микростолбы взаимно расплющиваются. Площадь контактной поверхности микростолбов существенно увеличивается, вследствие чего слои поверхностных окислов и загрязнений разрываются и чистый In из внутреннего пространства микростолба сваривается с In ответного микростолба. Сварка происходит при комнатной либо неопасной для микросхемы на КРТ повышенной температуре (например, при 80°C [2]). Наиболее неповреждающим с точки зрения механических нагрузок является микроконтактирование при $T = 157^\circ\text{C}$ (температура плавления In) [3]. Однако технологии, при которой одновременно были бы реализованы и предельные фотоэлектрические параметры, и возможность нагрева до 157°C без ухудшения параметров, до настоящего времени еще не создано.

Устройство для измерений кривых пластического течения индиевых микростолбов представляет собой малогабаритные плоские микровесы, выполненные из сапфира и немагнитных металлов (рис. 1). Оно пригодно для

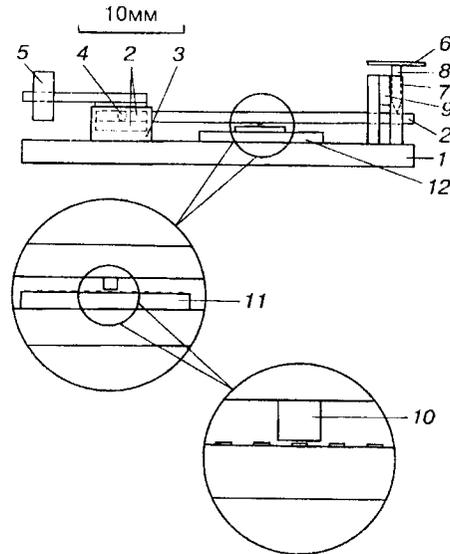


Рис. 1. Устройство для измерения зависимости деформации от механического напряжения в индиевых микростолбах:

1 — диск-носитель; 2 — планки, склеенные Т-образно; 3 — опора-подшипник; 4 — иглы подшипников; 5 — противовес; 6 — чашка микровесов; 7 — втулка; 8 — игла «даватель»; 9 — держатель направляющей втулки; 10 — индентор; 11 — кристалл с исследуемыми микростолбами; 12 — пьедестал. Детали 1–3, 9, 10, 12 изготовлены из оптически гладкого плоскопараллельного сапфира, детали 4–8 — из немагнитных металлов и сплавов

использования непосредственно под измерительным микроскопом и работоспособно в диапазоне температур 77—433 К.

При измерениях микросхему с индиевыми микростолбами 11 на пьедестале 12 размещают на диске 1 так, чтобы изучаемый микростолб находился под индентором 10 по центру. Индентор выполнен из оптического сапфира, имеет размеры $100 \times 100 \times 80$ мкм без завалов на краях и приклеен прозрачным клеем к сапфировой планке 2. Планар исследуемой микросхемы устанавливают, выбирая подходящий по толщине пьедестал, в такое положение, когда рабочая поверхность индентора приближается к плану практически плоскопараллельно.

В измерительный микроскоп наблюдают исходный радиус микростолба r_0 , и затем по мере нагружения чашки микровесов навесками измеряют r — радиус расплющенного микростолба при данной нагрузке. В случаях, когда микростолбы имеют форму вершины, близкую к квадрату и промежуточную от квадрата к кругу, измеряют площадь поверхности соприкосновения индиевого микростолба с сапфировым индентором и вычисляют r_0 и r .

Установлено, что реальное время релаксации микростолба при заданном давлении составляет около 10 с, а многочасовые выдержки микростолбов под нагрузкой практически не увеличивают их площадь. Поэтому при каждой навеске дают выдержку 300 с. Погрешность измерений — 10 % для образцов диаметром 25 мкм и 6 % для 40 мкм [1].

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости деформации от давления в индиевых микростолбах, приготовленных тремя различными способами. Измерения выполнены при температуре $18 (\pm 2)^\circ\text{C}$. Зависимости, обозначенные цифрами 1, 2, 7, получены на микростолбах, изготовленных методом прямого высоковакуумного напыления через маску. Кривые 3, 4 характерны для образцов из матрицы 32×32 с шагом 100 мкм, приготовленной путем напыления на той же установке с последующей фотолитографией. Зависимости 5, 6 получены на микростолбах, вырезанных из свежепрокатанного индия 99,999 % чистоты. Поскольку каждый из представленных выше вариантов измерен многократно, нами выбраны по две кривых, в какой-то мере

характеризующих разброс «полочек пластичности» для каждого случая. При этом средняя величина положения «полочки пластичности», полученная из любой пары представленных на рис. 2 зависимостей, соответствует усредненному положению «полочки пластичности» из соответствующей совокупности измерений, не представленных на рис. 2 из-за недостатка места. Размеры зерен I_p во всех микростолбах приблизительно одинаковые и составляют 1—5 мкм.

Обращают на себя внимание следующие особенности: необходимые для пластической деформации давления нарастают по мере уменьшения высоты h микростолбов, а величина деформации (r/r_0), при которой начинается их деформационное упрочнение, уменьшается.

Из [4] следует, что при наиболее жесткой постановке механических испытаний монокристаллического КРТ (с максимумом чувствительности на длине волны излучения 10 мкм), когда образец в виде длинного параллелепипеда лежит на опорах, размещенных на концах, а механическая нагрузка приложена к середине, предельное давление упругих деформаций составляет около $1,7 \text{ кг/мм}^2$ (нижняя штриховая горизонтальная линия на рис. 2).

В то же время в [2] проведена сборка фотоприемных матриц КРТ с кремниевыми матрицами считывания на индиевых микростолбах при давлении $3,8 \text{ кг/мм}^2$ без пагубных последствий (верхняя штриховая горизонтальная линия на рис. 2). Противоречия между результатами работ [2, 4] на самом деле нет, так как в них описаны принципиально разные постановки опытов. В работе [2] использовалось плоскопараллельное сжатие двух, очевидно, чистых от твердых частиц кристаллов, лежащих на оптически плоских поверхностях, поэтому прогибы, аналогичные [4], исключались самой постановкой опытов.

Таким образом, принимая результаты работ [2, 4] как достоверные, будем полагать наиболее «жестким» пределом неповреждающего механического воз-

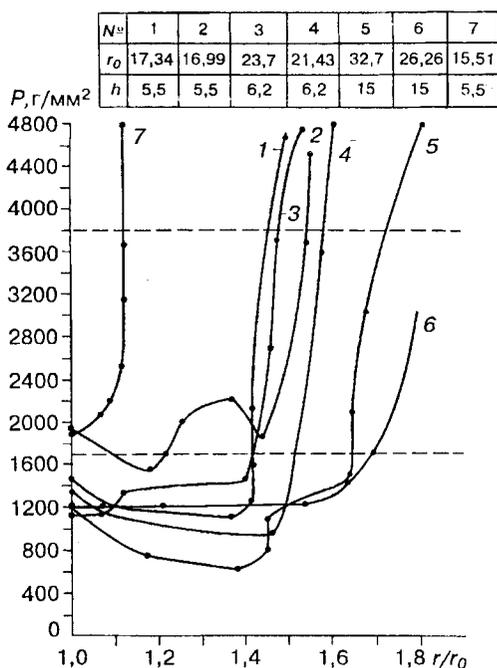


Рис. 2. Экспериментальная зависимость «напряжение — деформация» индиевых микростолбов: 1, 2, 7 — прямое напыление I_p в высоком вакууме через маску; 3, 4 — матрица индиевых микростолбов, полученных высоковакуумным напылением и фотолитографией; 5, 6 — индиевые микростолбы, вырезанные из I_p , 99,999 %; 1—6 — «нормальные» микростолбы; 7 — «аномально прочный» микростолб; r_0 — радиус исходного, r — радиус осажденного микростолба; h — высота. (Все размеры приведены в микрометрах)

действия для КРТ $\sim 1,7$ кг/мм², а давление 3,8 кг/мм² — допустимым режимом холодной сварки кристаллов-матриц МЛЭ.

Из рис. 2 следует, что почти все деформационные кривые удовлетворяют не только второму, но даже первому жесткому пределу. Исключения составляют так называемые «аномально прочные» микростолбы 7, изредка встречающиеся среди подавляющего большинства «нормальных» (1—6). Причины происхождения, частота появления и способы устранения подобных микростолбов нуждаются в дальнейшем тщательном изучении. В настоящее время можно сказать, что наличие «аномально прочных» микростолбов может вызывать деградацию фотоэлектрических параметров во время микроконтактирования.

Обычно полагают, что $r/r_0 = 1,3$ вполне достаточно для качественной холодной микросварки, поскольку большое расплющивание реализует ситуацию, при которой могут возникать деградации фотоэлектрических свойств из-за проявления деформационного упрочнения микростолбов (одновременно пагубно проявляют себя и все твердые загрязнения микронных размеров). Если придерживаться предела $r/r_0 = 1,3$, то наличие в паре объединяемых микростолбов одного «аномально прочного», а другого «нормального» еще не должно приводить к механическому повреждению КРТ при использовании более высоких микростолбов.

В работе впервые измерены зависимости деформации от механического давления реальных индиевых микростолбов, широко используемых в технологии микроконтактирования линейчатых и матричных ФПУ на КРТ. Это позволяет достоверно оценивать механическое давление, оказываемое конкретными микростолбами на поверхность кристаллов КРТ в процессе холодной микросварки.

Деформационные кривые микростолбов имеют типичный вид, характерный для многих поликристаллических металлов. При увеличении давления вначале наблюдается участок, на котором релаксация размеров отсутствует (упругая часть), чаще всего затем присутствует пик прочности (но не всегда), за которым следует более или менее широкая достаточно ярко выраженная «полочка пластичности» и далее участок деформационного упрочнения.

По мере увеличения высоты микростолбов «полочка пластичности» сжимается, а область деформационного упрочнения одновременно сдвигается в сторону все больших деформаций.

В подавляющем большинстве случаев микростолбы удовлетворяют не только допустимому давлению 3,8 кг/мм² [2], но и наиболее жесткому ограничению 1,7 кг/мм² [4] (при оптимальной деформации в процессе микросварки на уровне $r/r_0 = 1,3$).

Обнаружены изредка встречающиеся «особо прочные» микростолбы, природа которых, статистика и способы устранения должны быть предметом дальнейшего тщательного изучения.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Васильеву и Т. И. Захарьяш за предоставленные образцы и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р. Устройство и метод измерения пластической деформации образцов микронных размеров // ПТЭ. 1996. № 4. С. 1.
2. Kanno 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.
3. 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.
4. Cole S., Willoughby A. F. W., Brown M. The mechanical properties of CdHgTe // J. Cryst. Growth. 1982. 59, N 1/2. P. 370.

Поступила в редакцию 19 марта 1996 г.