

УДК 621.315.592

Л. Н. Ромашко, В. Н. Овсяк, В. В. Васильев, В. В. Войнов,
Т. И. Захарьяш, А. Г. Клименко, А. О. Сусяков
(Новосибирск)

**ДЕГРАДАЦИЯ ДИФФУЗИОННЫХ МЛЭ CdHgTe n-p-ПЕРЕХОДОВ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Матрицу фотодиодов, изготовленную на эпитаксиальной пленке кадмий-ртути-теллур (КРТ), обычно соединяют с кремниевым коммутатором методом технологии Flip-Chip через индиевые столбы. Разработана технология холодной сварки столбов, позволяющая производить сборку фотоприемного модуля под давлением при $T = 20^\circ\text{C}$ с высоким процентом соединения и без ухудшения параметров диодов, расположенных под столбами. Диоды были получены на пленках МЛЭ КРТ p -типа методом диффузии ртути из анодного окисла. Для исследования влияния давления на характеристики n - p -переходов отдельные диоды из матрицы подвергались давлению $(1-6)10^7 \text{ Н/м}^2$ на In-столбы. Исследование диодов проводилось измерением вольт-амперных характеристик и зависимостей дифференциальной проводимости от напряжения в диапазоне температур 5–120 К. При давлении меньше $2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ изменения характеристик диодов не наблюдается. Обнаружено, что при давлении больше $4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ увеличивается количество ловушек в ОПЗ диффузионного n - p -перехода. Более того, наблюдается увеличение туннельной и генерационно-рекомбинационной составляющих тока через диод. Предполагается, что данные ловушки связаны с дислокациями либо с собственными дефектами материала.

Введение. Гибридная сборка фотоприемной матрицы, изготовленной на эпитаксиальной пленке КРТ и кремниевого коммутатора, предполагает соединение через индиевые столбы, расположенные как на коммутаторе, так и на фотоприемной матрице. Соединение столбов можно осуществлять без приложения давления при температуре, соответствующей расплавлению индиевых столбов, либо их сдавливанием без нагрева [1, 2]. Оба метода могут приводить к деградации диодов, расположенных под столбами, поскольку КРТ весьма чувствителен к механическим и температурным воздействиям. Поэтому необходимо уменьшать температуру и давление при гибридной сборке модуля. Для этого были разработаны технологии получения высоких индиевых столбов [3] и их сварки под давлением при $T = 20^\circ\text{C}$.

В данной работе проведено исследование влияния холодной сварки индиевых столбов на характеристики диодов, расположенных под столбами. Для этого отдельные диоды на матрице подвергались давлению приложением грузов на столбы. Изменение параметров диодов контролировалось

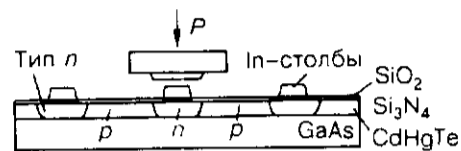


Рис. 1. Структура диода

измерением вольт-амперных характеристик и зависимостей дифференциальной проводимости от напряжения.

Эксперимент и обсуждение результатов. Исследовали диоды, изготовленные на пленках КРТ *p*-типа с $x=0,22$ и концентрацией дырок $p = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs. Область *n*-типа формировали термодиффузией ртути из анодного окисла. В качестве омического контакта использовали In. Для уменьшения поверхностных токов утечек вблизи поверхности был выращен слой КРТ с повышенным содержанием кадмия и нанесены диэлектрические слои SiO_2 и Si_3N_4 . Индиевые столбы ($40 \times 40 \text{ мкм}$) наносились поэтапно: напыление In (1000 Å); напыление Ni (400 Å) + In (6 мкм). Для приложения к диодам давлений использовано оборудование, описанное в [4]. На рис. 1 приведена структура диода.

В области давлений, когда не наблюдалось пластической деформации In, давление определялось делением приложенного веса на площадь столба вблизи поверхности подложки. В случае когда In подвергался пластической деформации, давление определялось делением на площадь раздавленного столба. В данном эксперименте пластическое течение In происходило в течение времени меньше 1 мин. Время давления составляло 5 мин. После этого давление снимали и проводили измерение вольт-амперных характеристик и зависимостей дифференциальной проводимости диодов от напряжения смещения.

I - V - и dI/dV - V -характеристики для исходного диода представлены на рис. 2, *a*. Их подробный анализ проведен в работе [5]. При нулевом смещении в диапазоне температур 150–60 К доминирующим механизмом переноса заряда является диффузионный, при температурах 60–50 К – генерационно-рекомбинационный, при более низких температурах – туннельный. При увеличении напряжения смещения генерационно-рекомбинационная и туннельная составляющие тока увеличиваются.

На рис. 2, *b, c* показаны I - V - и dI/dV - V -характеристики диода после приложения к нему давлений $4 \cdot 10^7$ и $6 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. Приложение давления меньше $2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ к *n*-области фотодиода через In-столбы практически не влияет на его характеристики. Увеличение давления до $\sim 4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ (см. рис. 2, *b*) увеличивает величины туннельных токов через уровень ловушек $E_{1,2} \cong E_v + 0,043 \text{ эВ}$, заметных при низких температурах ($T < 30 \text{ К}$): отчетливо выделился пик на I - V -кривой при $V = 35 \text{ мВ}$ и увеличился пик 2 на dI/dV - V -характеристике. Изменение пиков 1 и 3 на кривых dI/dV - V незначительно. Ток туннелирования через $E_{1,2}$ при $T = 13 \text{ К}$ приблизительно равен $I_t \cong 5 \text{ нА}$. В диапазоне температур 80–40 К наблюдается небольшое увеличение генера-

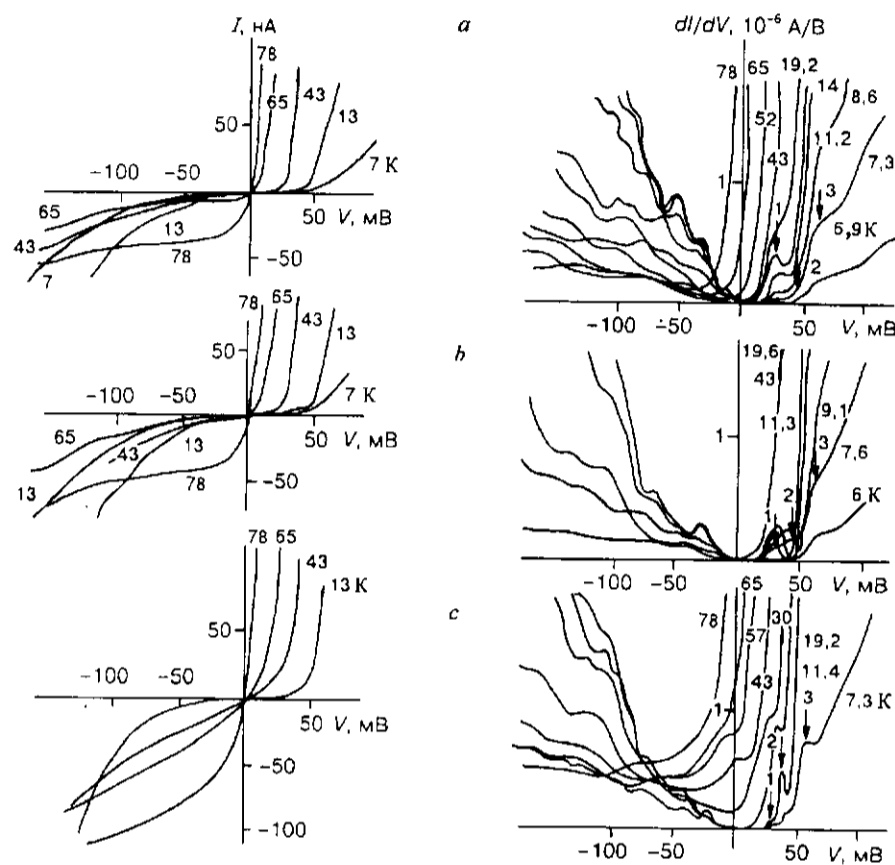


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики и зависимость дифференциальной проводимости от напряжения диодов: *a* – исходные, *b* – после приложения давления $\sim 4 \cdot 10^7$ Н/м², *c* – $\sim 6 \cdot 10^7$ Н/м²

ционно-рекомбинационной составляющей тока, так как ток при обратном смещении несколько увеличился (см. рис. 2, *b*).

После приложения давления $\sim 6 \cdot 10^7$ Н/м² наблюдается еще более сильное увеличение пика 2, причем он фиксируется в диапазоне температур 10–30 К. При более высоких температурах (43, 57 и 65 К) появляются пики, ранее не наблюдавшиеся. По оценке эти пики соответствуют туннелированию через уровень $E_i \sim E_v + 0,03$ эВ. Появление этих пиков может быть следствием увеличения количества ловушек с E_{i1} , энергия залегания которых с изменением температуры уменьшается. Если считать, что наибольшую роль играет туннелирование через уровни ловушек вне ОПЗ, то в температурном диапазоне, когда пики наблюдаются, можно оценить энергию залегания ловушек. По мере увеличения температуры энергия залегания ловушки E_{i2} незначительно увеличивается: при $T = 7,3$ К $E_{i2} = E_v + 0,043$ эВ, при $T = 30$ К $E_{i2} = E_v + 0,045$ эВ, а энергия ловушек с E_{i1} уменьшается: при $T = 7,3$ К $E_{i1} = E_v + 0,032$, при $T = 43$ К $E_{i1} = E_v + 0,03$, при $T = 57$ К $E_{i1} = E_v + 0,027$ эВ. На I - V -характеристиках при $T = 13$ К виден ток туннелирования

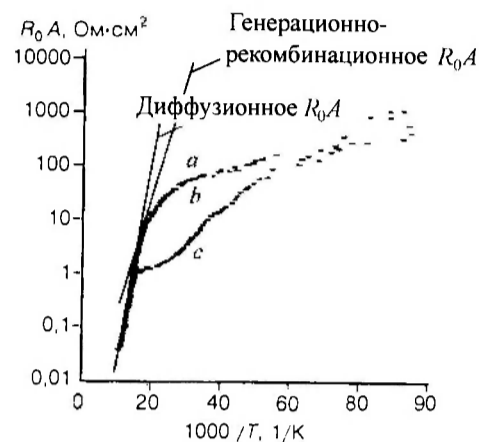


Рис. 3. Температурные зависимости величины $R_0 A$ для исходного диода (кривая a), после приложения к диоду давления $\sim 4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ (кривая b) и $\sim 6 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ (кривая c)

через ловушки $E_{1,2}$, его величина 8 нА. При $T = 77 \text{ К}$ генерационно-рекомбинационный ток увеличился более чем вдвое.

Будем считать, как и в предыдущей работе, что генерационно-рекомбинационный ток обусловлен более глубокими ловушками $-E_{1,2}$. По выражениям, приведенным в [6], были рассчитаны теоретические кривые для генерационно-рекомбинационного тока через уровни ловушек с $E_{1,2} \cong E_v + 0,043 \text{ эВ}$. Теоретические кривые для случая рис. 2, b близки к экспериментальным при малых смещениях при $Nl = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для случая рис. 2, c теоретические кривые существенно отличаются от экспериментальных при любом значении количества ловушек. Они имеют значительно меньший наклон при обратном смещении по сравнению с экспериментальными кривыми. Такое несовпадение возможно, если при $T = 77 \text{ К}$ процессы туннелирования через ловушки больше генерационно-рекомбинационных процессов.

На рис. 3 представлены логарифмические зависимости сопротивления при нулевом смещении R_0 от обратной температуры. При сильных механических воздействиях увеличивается механизм туннелирования через ловушки. Они становятся преобладающими при $T < 60 \text{ К}$, в то время как диффузионная составляющая ($T > 60 \text{ К}$) изменяется незначительно. Провал при $T \sim 50 \text{ К}$ соответствует туннелированию через $E_{1,2} \sim E_v + 0,026$, по всей видимости, через $E_{1,1}$. В работе [6] это ловушки дырочного типа, поэтому изменения диффузионной составляющей $R_0 A$ при $T > 60 \text{ К}$ не происходит.

Природа ловушек пока не ясна. Увеличение количества ловушек при механическом воздействии на n - p -переход может быть связано с увеличением плотности дислокаций либо количества собственных дефектов полупроводника.

Заключение. Исследованы особенности вольт-амперных характеристик и дифференциальной проводимости фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев КРТ в зависимости от механических воздействий. Найдено, что механические воздействия выше некоторой критической величины ($\sim 6 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$) приводят к увеличению концентрации глубоких уровней, вследствие чего увеличиваются генерационно-рекомбинационные процессы

в ОПЗ, что значительно увеличивает темновой ток при прямом и обратном смещениях, и процессы туннелирования через ловушки, находящиеся как внутри, так и вне области пространственного заряда при прямом и обратном смещениях.

При нулевом смещении туннелирование становится доминирующим процессом при $T < 60$ К, при 77 К определяющим механизмом переноса заряда остается диффузионный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ziegler J., Bruder M., Wendler J., Maier H.** Second generation FPA's with MCT sensor arrays in hybrid approach // SPIE. 1992. 1735. P. 151.
2. **Kim Y., Choi J., Choi K. et al.** New reflow process for indium bump // Proc. SPIE. 1997. 3061.
3. **Esaev D. G., Kozlov A. I., Klimenko A. G. et al.** Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates // Ibid. P. 956.
4. **Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р.** Устройство и метод измерения пластической деформации образцов микронных размеров // ПТЭ. 1996. № 6. С. 119.
5. **Кравченко А. Ф., Овсяк В. Н., Ромашко Л. Н.** Механизмы переноса носителей заряда в диффузионных $n-p$ -переходах, изготовленных на основе CdHgTe // Автометрия. 1998. № 4. С. 78.
6. **Polla D. L., Reine M. B. et al.** Measurement of space charge generation-recombination current in HgCdTe photodiodes by deep level transient spectroscopy // Solid State Electron. 1991. 24, N 8. P. 719.

Поступила в редакцию 26 мая 1998 г.