

## ВЛИЯНИЕ РЕКОМБИНАЦИИ В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА НА ЛЮКС-ВОЛЬТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОЭДС В GaAs И InP

Б. И. Бедный, Н. В. Байдусь

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603600, Нижний Новгород, Россия  
(Получена 29 декабря 1992 г. Принята к печати 1 февраля 1993 г.)

Методом динамического конденсатора исследованы люкс-вольтовые характеристики (ЛВХ) стационарной поверхностной фотоэдс в *n*-GaAs и *p*-InP. Установлено, что на химически очищенных (свежестравленных) поверхностях параметр неидеальности ЛВХ ( $\eta$ ), характеризующий в единицах  $kT/e$  наклон ЛВХ, построенной в полулогарифмических координатах, близок к единице. Химико-механическая полировка поверхности приводила к увеличению  $\eta$  в  $\approx 2$  раза. Эффект проявлялся при наличии инверсионных изгибов зон на поверхности и обусловлен влиянием на фотоэдс рекомбинационных процессов в приповерхностной области пространственного заряда.

1. Люкс-вольтовые характеристики (ЛВХ) стационарной поверхностной фотоэдс в GaAs и InP в широком интервале уровней фотовозбуждения подчиняются логарифмическому закону вида

$$V_{ph} = \eta (kT/e) \ln (1 + BL), \quad (1)$$

где  $L$  — интенсивность освещения,  $B$  и  $\eta$  — параметры, зависящие от состояния поверхности и механизма фотоэдс [1,2]. При относительно высоком уровне фотовозбуждения ( $BL \gg 1$ ) параметр  $\eta$  характеризует наклон ЛВХ, построенной в полулогарифмических координатах, и в некоторых отношениях является аналогом параметра неидеальности в вольт-амперных характеристиках диодов Шоттки [1]. Исследование этого параметра может дать полезную информацию о механизме фотоэдс и состоянии поверхности полупроводника. Так, в условиях поверхностного прилипания фотоносителей  $\eta < 1$  [2]. При барьерном механизме фотоэдс  $\eta = 1$  [3]. Захват неосновных носителей заряда на ловушки в слое собственного оксида может приводить к увеличению  $\eta$  до  $\approx 1.3 \div 1.4$  [1]. В настоящей работе обнаружено, что при достаточно высокой концентрации центров рекомбинации в приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) наклон ЛВХ в GaAs и InP существенно возрастает ( $\eta \approx 2$ ). Полученный результат согласуется с выводами общей теории поверхностных фотоэффектов [3] и свидетельствует о возможности применения метода поверхностной фотоэдс для выявления рекомбинационно активных приповерхностных слоев.

2. Исследовали поверхности (100) монокристаллических пластин *n*-GaAs и *p*-InP с объемной концентрацией основных носителей заряда  $\approx (5 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Образцы подвергали стандартной химико-механической обработке с последующим удалением нарушенного слоя в полирующем травителе. Для введения в ОПЗ структурных дефектов применяли конечную химико-механическую полировку (ХМП) в щелочной (NaOH) суспензии SiO<sub>2</sub> при комнатной температуре [4]. Исследования, выполненные на образцах GaAs методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней, показали, что после такой обработки в

приповерхностном слое толщиной в несколько десятков долей микрометра возникает система глубоких центров с концентрацией  $\geq 10^{16}$  см $^{-3}$ , в том числе центры с энергией активации 0.69 эВ и сечением захвата электронов  $2 \cdot 10^{-14}$  см $^2$ , являющиеся эффективными центрами рекомбинации [5,6]. Контроль параметров глубоких уровней в InP не проводился. Однако, согласно [7], следует ожидать, что и в этом материале концентрация рекомбинационно активных дефектов вблизи поверхности в результате ХМП существенно возрастет.

Стационарную поверхностную фотоэдс определяли методом динамического конденсатора по изменению потенциала поверхности при освещении. Освещенность поверхности варьировали в пределах 6 порядков с помощью набора нейтральных светофильтров. Максимальное значение мощности неразложенного светового потока на поверхности  $L_m \approx 0.2$  Вт/см $^2$ . Поверхностный изгиб зон ( $U_s$ ) контролировали с помощью предложенных ранее фотоэлектрических методик [8,9].

На свежестравленных поверхностях значения  $U_s$  составляли  $-(0.55 \div 0.6)$  и  $+(0.45 \div 0.5)$  эВ в GaAs и InP соответственно. Различному направлению изгиба зон в  $n$ -GaAs и  $p$ -InP соответствовали противоположные знаки фотоэдс. Абсолютные значения  $V_{ph}$  при максимальной интенсивности освещения были меньше соответствующих значений поверхностного потенциала на  $0.15 \div 0.2$  В. Зависимости  $V_{ph}$  от  $L$  описывались соотношением (1). Значения параметра  $\eta$  были близки к 1 ( $\approx 1.15$  и  $0.95$  в GaAs и InP соответственно).

3. Химико-механическая полировка поверхности GaAs приводила к увеличению  $|U_s|$  на  $\approx 0.2 \div 0.3$  эВ и формированию инверсионного слоя с характерным для структурно-разупорядоченных поверхностей GaAs закреплением уровня Ферми вблизи уровня электронейтральности при  $E \approx E_c - 0.9$  эВ, где  $E_c$  — энергетический уровень, соответствующий дну зоны проводимости [10]. Величина фотоэдс достигала 0.7 эВ, а параметр неидеальности ЛВХ возрастал приблизительно в 2 раза ( $\eta = 1.8 \div 2.2$ ; рис. 1). В некоторых образцах увеличение  $\eta$  проявлялось лишь при относительно низких уровнях фотовозбуждения ( $L \approx 10^{-4}$  Вт/см $^2$ ,  $V_{ph} \approx 0.4$  В). Это приводило к «излому» ЛВХ, на которых появлялись два линейных участка с  $\eta \approx 2$  и  $\approx 1$  (рис. 1, кривая 2). После стравливания нарушенного при ХМП приповерхностного слоя восстанавливались исходные (до ХМП) характеристики с  $\eta \approx 1$ .

Химико-механическая полировка поверхности InP в отличие от GaAs не обеспечивала необходимое для увеличения  $\eta$  зарядовое состояние поверхности. Существенных изменений изгиба зон и наклона ЛВХ после ХМП обнаружено не было. Для изменения  $U_s$  использовали адсорбцию атомов индия из атомного пучка в вакууме [11]. Нанесение на поверхность сверхтонкого (порядка мономолекулярного) слоя металла приводило к увеличению положительного заряда поверхности и переходу ее в состояние инверсии: изгиб зон возрастал до 0.9 эВ, фотоэдс — до 0.75 В. На рис. 2 показана типичная ЛВХ поверхностной фотоэдс в InP, полученная после ХМП и последующей адсорбции атомов индия. Видно, что при увеличении изгиба зон наклон ЛВХ, как и в случае GaAs, существенно возрастает ( $\eta \approx 2.1 \div 2.4$ ). Корреляция между наклоном ЛВХ и изгибом зон выявлялась и в процессе медленной (десятки часов) релаксации потенциала поверхности после адсорбции (рис. 2). Отметим, что состояние инверсии легко достигалось при адсорбции атомов металлов на поверхности  $p$ -InP, не подвергавшейся химико-механической полировке [11]. При этом, однако, увеличения  $\eta$  не обнаружено.

4. Теоретические исследования поверхностной фотоэдс в монополярных полупроводниках с приповерхностными слоями истощения или инверсии выполнены в [3,12–14]. Представленные в этих работах расчеты основаны на разных подходах к анализу явления фотоэдс. Из сопоставления полученных результатов следует, что влияние приповерхностных рекомбинационных про-

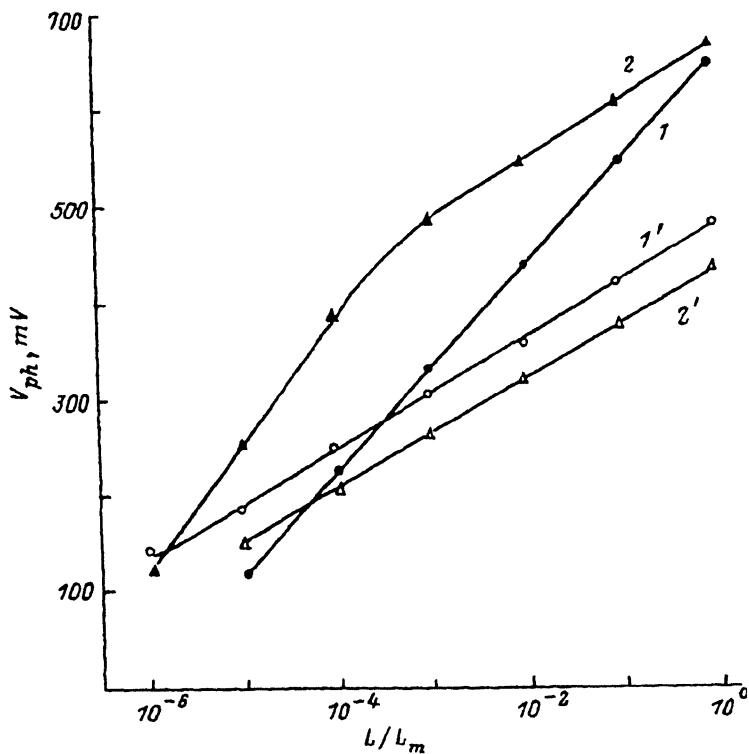


Рис. 1. Люкс-вольтовые характеристики поверхностной фотоэдс в GaAs. Обработка поверхности: 1, 2 — ХМП; 1', 2' — стравливание приповерхностного слоя толщиной 1 мкм после ХМП. Зависимости 1, 1' и 2, 2' соответствуют двум различным образцам.

цессов на величину  $V_{ph}$  можно описать, полагая в (1)  $B = \beta S_{eff}^{-1}$ , где  $\beta$  — коэффициент, конкретное выражение для которого зависит от выбора модели,  $S_{eff}$  — эффективная скорость поверхностной рекомбинации. При достаточно высокой концентрации глубоких центров темп рекомбинации в ОПЗ может существенно превышать темп рекомбинации через систему поверхностных состояний. В этом случае величина  $S_{eff}$  будет определяться эффективной скоростью рекомбинации в ОПЗ ( $S_{sc}$ ) [12]. Расчет рекомбинации в ОПЗ через глубокие уровни, энергетические положения которых близки к середине запрещенной зоны и которые обычно дают максимальный вклад в рекомбинацию, выполнен в [3, 15]. Показано, что особенностью рекомбинации в ОПЗ является уменьшение  $S_{sc}$  по мере роста интенсивности освещения по закону  $S_{sc} \propto L^{-1}$ . Легко видеть, что это должно приводить к линейной зависимости параметра  $B$  в соотношении (1) от интенсивности освещения и при  $BL \gg 1$  давать увеличение наклона ЛВХ в 2 раза.

Максимальный вклад в рекомбинационные процессы в ОПЗ вносит относительно тонкий слой вблизи плоскости, где электронный и дырочный квазиуровни Ферми расположены симметрично относительно середины запрещенной зоны [16]. Толщина этого слоя, а следовательно, и темп рекомбинации в ОПЗ возрастают вместе с шириной обедненного слоя при увеличении поверхностного изгиба зон. В исследованных образцах рекомбинационные процессы в ОПЗ становятся определяющими лишь при инверсионных изгибах зон. Именно поэтому в InP значения  $\eta \sim 2$  наблюдались только после дополнительной адсорбционной обработки, обеспечивающей необходимую величину поверхностного потенциала.

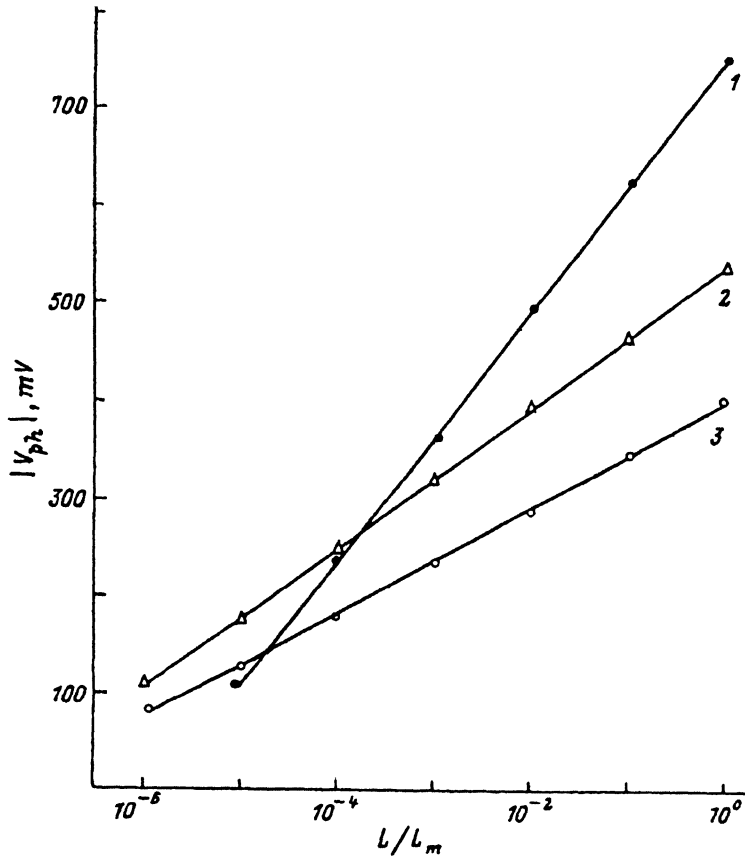


Рис. 2. Люкс-вольтовые характеристики поверхностной фотозд в InP, полученные в процессе долговременной релаксации потенциала поверхности после ХМП и адсорбции атомов индия. Условия измерения: 1 — вакуум ( $\sim 10^{-4}$  Па), через 30 мин после адсорбции; 2 — вакуум, через 10 мин после адсорбции; 3 — после выноса образца на воздух.  $U_s$ , эВ: 1 — 0.9, 2 — 0.66, 3 — 0.52.  $\eta$ : 1 — 2.23, 2 — 1.24, 3 — 0.96.

С ростом  $L$  скорость рекомбинации в ОПЗ уменьшается и при достаточно больших уровнях фотовозбуждения может стать меньше, чем скорость рекомбинации через поверхностные состояния. Такая замена доминирующего канала поверхностной рекомбинации, по-видимому, и является причиной «излома» ЛВХ, наблюдавшегося в некоторых образцах.

Результаты настоящей работы подтверждают отмеченную ранее в работе [1] аналогию между параметром неидеальности в люкс-вольтовых характеристиках фотозд на свободной поверхности полупроводника и параметром неидеальности в вольт-амперных характеристиках диодов Шоттки ( $n$ ). Как известно [16], при высоком темпе рекомбинации в ОПЗ  $n$  также принимает значения, близкие к 2. Эта аналогия указывает на то, что состояние свободной поверхности GaAs и InP в условиях фотовозбуждения физически адекватно состоянию диода Шоттки, смещенного в пропускном направлении.

Авторы выражают благодарность И. А. Карповичу за полезное обсуждение результатов работы и А. П. Касаткину за контроль параметров глубоких уровней, возникающих при химико-механической полировке поверхности GaAs.

- [1] Б. И. Бедный, И. А. Карпович, А. Н. Савинов. Поверхность, № 4, 83 (1988).
- [2] Б. И. Бедный, И. А. Карпович, А. Н. Савинов. Поверхность, № 11, 92 (1989).
- [3] А. В. Саченко, О. В. Снитко. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников, 231. Киев (1984).
- [4] Б. Д. Луфт, В. А. Перевошиков, Л. Н. Возмилова, И. А. Свердлин, К. Г. Марин. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников, 136. М. (1982).
- [5] А. П. Касаткин, В. А. Перевошиков, В. Д. Скупов, Л. А. Суслов. Поверхность, № 2 (1993).
- [6] В. М. Ботнарюк, Ю. В. Жилаев, А. Г. Кечек, Н. И. Кузнецов, А. А. Лебедев, М. И. Шульга. Письма ЖТФ, 14, 181 (1988).
- [7] В. А. Перевошиков, В. Д. Скупов. Особенности абразивной и химической обработки полупроводников, 120. Нижний Новгород (1992).
- [8] Б. И. Бедный, М. И. Василевский, И. А. Карпович. ФТП, 23, 362 (1989).
- [9] Б. И. Бедный, И. А. Карпович, Н. В. Байдусь. Поверхность, № 1, 94 (1991).
- [10] Н. Hasegawa, Н. Ohno. J. Vac. Sci. Techn., В4, 1130 (1986).
- [11] Н. В. Байдусь, Б. И. Бедный, И. А. Карпович, Е. В. Руссу, А. Н. Савинов. Поверхность. 12, 75 (1989).
- [12] А. В. Саченко. ФТП, 12, 1883 (1978).
- [13] О. В. Константинов, Б. В. Царенков. ФТП, 24, 2126 (1990).
- [14] A. R. Moog. J. Appl. Phys., 54, 222 (1983).
- [15] А. В. Саченко, И. В. Крупнова. УФЖ, 25, 857 (1980).
- [16] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1, 456. М. (1984).

Редактор Т. А. Полянская

---