

06;08

## Трансформация электрических свойств InAs $p-n$ -переходов в результате ультразвуковой обработки

© А.В. Сукач, В.В. Тетеркин

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,  
Киев  
E-mail: teterkin@isp.kiev.ua

Поступило в Редакцию 20 января 2009 г.

Исследовано влияние высокочастотной ( $f = 5$  MHz) ультразвуковой обработки (УЗО) на электрические свойства плавных InAs  $p-n$ -переходов при температуре  $T = 77$  К. Установлено, что наиболее чувствительной к УЗО является туннельная компонента тока, предположительно связанная с каналами повышенной проводимости, локализованными около дислокаций. Менее чувствительной к УЗО оказалась компонента тока, определяемая рекомбинацией носителей в области пространственного заряда (ОПЗ), свободной от дислокаций. Обнаружена тенденция к восстановлению электрических параметров  $p-n$ -переходов при длительном хранении образцов в лабораторных условиях. Обсуждаются возможные модели влияния УЗО на электрические характеристики InAs  $p-n$ -переходов.

PACS: 72.50.+b

InAs и твердые растворы на его основе широко используются для создания элементной базы современной инфракрасной оптоэлектроники. В ряде работ [1–5] было установлено, что ультразвуковая обработка (УЗО) полупроводниковых структур может приводить к улучшению их свойств. Для объяснения влияния УЗО на свойства полупроводниковых материалов и структур используется в основном две модели взаимодействия акустической волны с дефектами. Согласно наиболее распространенной из них — дислокационной [6,7], поглощенная дислокациями энергия акустической волны может стимулировать генерацию электрически активных дефектов, их перегруппировку, что приводит к изменению исходных физических свойств материалов или структур. Вторая модель теоретически и экспериментально менее обоснована и базируется на предположении взаимодействия акустической волны с

упругим полем комплексных дефектов, вследствие чего может происходить трансформация структуры дефектов, их диссоциация, изменение зарядового состояния и сечения захвата носителей заряда [1,2,8,9].

В работах [10,11] установлено, что прямые ВАХ InAs  $p$ - $n$ -переходов при 77 К аппроксимируются двумя экспоненциальными участками. Показано, что при небольших напряжениях прямого смещения ВАХ определяется туннельным током, который проходит через каналы повышенной проводимости, пересекающие плоскость  $p$ - $n$ -перехода. Последние могут быть обусловлены примесными атмосферами Коттрелла, локализованными около дислокаций. При больших напряжениях смещения доминирует процесс рекомбинации носителей в ОПЗ  $p$ - $n$ -перехода, свободного от дислокаций.

Поэтому неоднородные InAs  $p$ - $n$ -переходы представляют интерес с точки зрения изучения взаимодействия акустической волны с дефектами, локализованными в ОПЗ, базируясь на существующих теоретических моделях. Представляется также важным изучение временной стабильности характеристик переходов, подвергнутых УЗО, что и явилось целью настоящей работы.

Диффузионные InAs  $p$ - $n$ -переходы формировались закрытым способом в кварцевых вакуумированных ампулах [10]. В качестве диффузанта использовалось предварительно синтезированное соединение CdAs<sub>2</sub>. Подложки изготавливались из монокристаллического слитка  $n$ -InAs, выращенного в ЗАТ „Чистые металлы“ (г. Светловодск). Концентрация и подвижность электронов в  $n$ -InAs при  $T = 300$  К составляли  $n = (2-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu_n = (2-3) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  соответственно. Плотность дислокаций находилась в пределах  $(1-2) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ , а полуширина кривых качания не превышала  $27''$ . Процесс диффузии акцепторной примеси кадмия проводился при  $T \sim 873$  К в течение 1 h. Глубина  $p$ - $n$ -переходов  $\sim 15 \pm 0.5 \mu\text{m}$  и определялась измерением термоэдс при послонном стравливании  $p$ -InAs на стадии изготовления на стороне (111)А мезаструктур с площадью  $S = 7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ . Омические контакты к  $p$ -InAs наносились методом термического вакуумного напыления тонких слоев цинка и индия, а также индия к  $n$ -InAs с последующей их термообработкой в атмосфере очищенного водорода.

Обработка образцов ультразвуком частотой 5 МГц осуществлялась со стороны подложки при предварительно стравленном омическом контакте. В качестве источника ультразвука использовался ниобат-литиевый преобразователь, на который подавалось напряжение от

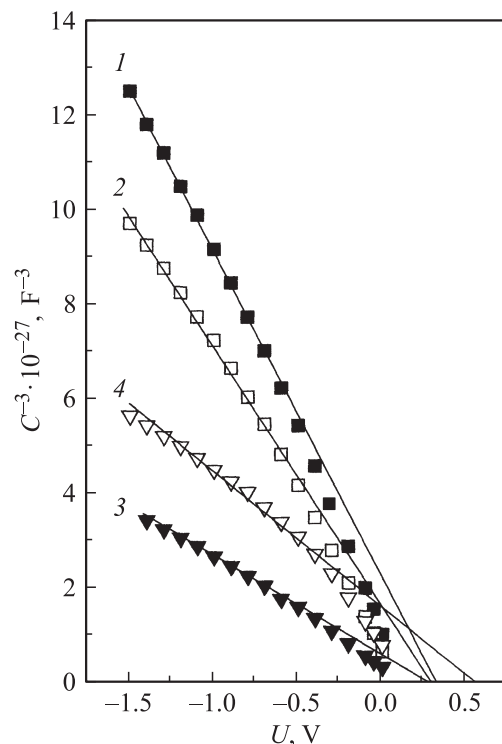
высокочастотного генератора. Акустический контакт реализовался с помощью вакуумного масла. Первая обработка (УЗО-1) проводилась при  $T = 295$  К с интенсивностью  $\sim 0.4$  Вт/см<sup>2</sup> и временем 1 h. Вторая обработка (УЗО-2) осуществлялась при той же интенсивности и температуре в течение 2 h. Интервал между УЗО-1 и УЗО-2 составлял 72 h. Повторные измерения характеристик проводились после 9-месячного хранения образцов. В эксперименте использовались 5 образцов с аналогичными исходными характеристиками, отличающимися не более чем на 30%. Один из образцов был контрольным, и его свойства не изменялись на протяжении эксперимента. Четыре из оставшихся образцов подвергались УЗО одновременно, при этом изменения их электрических свойств демонстрировали одинаковые тенденции.

Учитывая, что диаметр примесных атмосфер Коттрелла может составлять несколько микрометров [12], при измерениях ВФХ неоднородных  $p$ - $n$ -переходов возникает необходимость выяснения вкладов в измеряемую емкость участков в области атмосфер Коттрелла и емкости однородной части перехода. Очевидно, что эквивалентная барьерная емкость неоднородного  $p$ - $n$ -перехода будет равна  $C_{eq} = C_1 + C_2$ , где  $C_1$  — емкость участков перехода, сформированных в области атмосфер Коттрелла,  $C_2$  — емкость однородной части  $p$ - $n$ -перехода. Для оценки значений  $C_1$  предполагалось, что атмосферы Коттрелла имеют круглое сечение с диаметром  $4 \mu\text{m}$ , а плотность дислокаций в области перехода составляла  $1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$ . Расчет  $C_2$  выполнялся по известным формулам [13] для резких и плавных  $p$ - $n$ -переходов. Было установлено, что основной вклад в  $C_{eq}$  вносит барьерная емкость однородной области  $p$ - $n$ -переходов, вплоть до концентраций основных носителей заряда  $n_0 = p_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  в области атмосфер Коттрелла.

Результаты измерений ВФХ при  $T = 77$  К для разных состояний образца приведены на рис. 1. При  $U \leq -0.4$  В экспериментальные данные для исходного (кривая 1) и подвергнутого УЗО (кривые 2, 3) образцов линеаризуются в координатах  $C^{-3}-U$ , что указывает на близкий к линейному характер распределения легирующей примеси в  $p$ - $n$ -переходе. Из наклона линейных участков оценено значение градиента концентрации легирующей примеси  $a$ . По значению барьерной емкости для нулевого смещения оценена толщина ОПЗ  $W_0$ . Соответствующие данные приведены в таблице. Из рис. 1 видно, что емкостное напряжение отсечки  $U_c$  слабо изменяется от УЗО и составляет  $U_c \approx 0.31 \pm 0.03$  В. После хранения образцов, подвергнутых

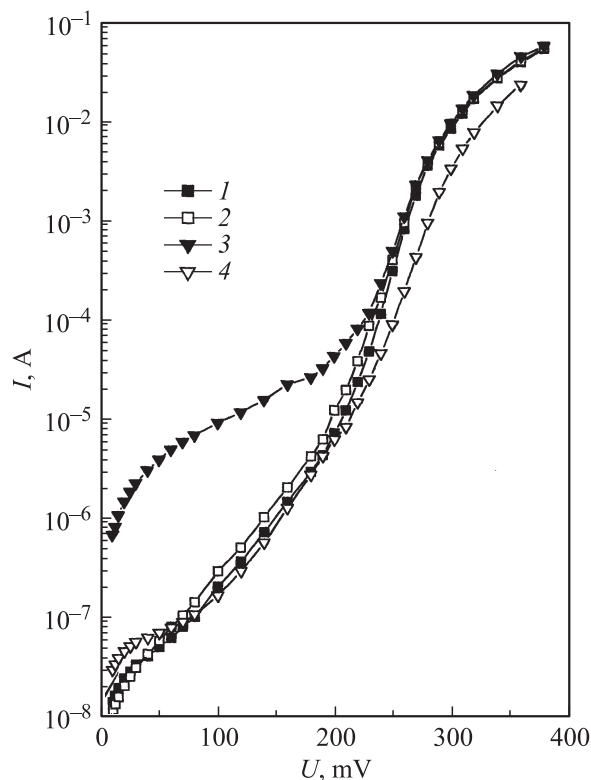
Параметры InAs  $p-n$ -переходов при 77 К

Состояние образца	Параметры							
	$W_0, \mu\text{m}$	$a, \text{cm}^{-4}$	$I_{01}, \text{A}$	$I_{02}, \text{A}$	$E_0, \text{meV}$	$\beta$	$R_s, \Omega$	$\tau_0, \text{s}$
1	2	3	4	5	6	7	8	
Исходный	0.91	$7.5 \cdot 10^{18}$	$8.0 \cdot 10^{-9}$	$5.4 \cdot 10^{-14}$	30	1.7	1.30	$4.0 \cdot 10^{-8}$
УЗО-1	0.80	$8.8 \cdot 10^{18}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$2.6 \cdot 10^{-13}$	38	1.8	1.25	$7.2 \cdot 10^{-9}$
УЗО-2	0.65	$3.1 \cdot 10^{19}$	$2.4 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{-13}$	74	1.8	1.17	$5.8 \cdot 10^{-9}$
После 9 мес. хранения	0.84	$7.8 \cdot 10^{18}$	$3.6 \cdot 10^{-8}$	$4.6 \cdot 10^{-13}$	73	2.0	1.34	$4.4 \cdot 10^{-9}$



**Рис. 1.** Вольт-фарадные характеристики InAs  $p$ - $n$ -переходов при температуре 77 К: 1 — исходный; 2, 3, 4 — после первой, второй УЗО и 9-месячного хранения в лабораторных условиях соответственно.

УЗО, его значение превышало ширину запрещенной зоны InAs, что может быть обусловлено неоднородным распределением заряженных дефектов в ОПЗ [13] в большей мере, чем влияние последовательного сопротивления (см. таблицу) на высокочастотную ВФХ [14]. Используя найденное значение  $a$  и  $W_0$ , можно оценить концентрацию основных носителей заряда  $N = n_0 = p_0 = aW_0/2$  на границе ОПЗ. Для различных состояний образца (исходного, УЗО-1, УЗО-2 и после 9-месячного хранения) получены такие значения концентраций  $3.4 \cdot 10^{14}$ ,  $3.5 \cdot 10^{14}$ ,  $1.0 \cdot 10^{15}$  и  $3.1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  соответственно. Эти данные свидетельствуют



**Рис. 2.** Прямые ВАХ InAs  $p$ - $n$ -переходов при температуре 77 К. Кривые 1–4 соответствуют тому же состоянию образца, что и на рис. 1.

о том, что на границе InAs  $p$ - $n$ -переходов в процессе их изготовления формируется компенсированная область ( $N \ll n$ , где  $n$  — концентрация электронов в подложке). УЗО  $p$ - $n$ -переходов приводит к существенной раскомпенсации указанной области, а при достаточно длительном хранении образца наблюдается ее восстановление. Тенденция к восстановлению исходного распределения основных носителей заряда на границе  $p$ - $n$ -перехода после 9-месячного хранения образца указывает на то, что в результате УЗО происходит трансформация исходных дефектов, а не изменение профиля легирующей примеси кадмия. При

этом процессы трансформации имеют долговременный характер при комнатной температуре.

Прямые ВАХ (рис. 2) для разных состояний образца можно удовлетворительно аппроксимировать двумя экспоненциальными участками

$$I = I_{01} \exp\left(\frac{eU}{E_0}\right) + I_{02} \exp\left[\frac{e(U - IR_s)}{\beta kT}\right], \quad (1)$$

где  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  — предэкспоненциальные множители первого и второго экспоненциальных участков,  $E_0$  — характеристическая энергия,  $\beta$  — коэффициент неидеальности ВАХ,  $R_s$  — последовательное сопротивление. Первая составляющая формулы (1) описывает туннельный ток через участки повышенной проводимости *p-n*-переходов, а вторая — генерационно-рекомбинационный ток однородной области. Отклонение от экспоненциальной зависимости при больших смещениях  $U > 0.27$  В обусловлено влиянием  $R_s$ . Рекомбинационное время жизни носителей заряда в ОПЗ  $\tau_0$  оценивалось по формуле

$$I_{02} = \frac{en_i W_0}{\tau_0} S, \quad (2)$$

где  $n_i = 2.1 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  — собственная концентрация в InAs при  $T = 77$  К. Оценки параметров ВАХ, согласно (1), (2), для разных состояний образца приведены в таблице.

Известно [15], что поля упругих напряжений краевых дислокаций и примесных атомов взаимодействуют, образуя атмосферы Коттрелла. В зависимости от размера внедренные атомы могут локализоваться в области гидростатического растяжения либо сжатия, тем самым обеспечивая пространственную локализацию нейтральных примесей. Кроме того, между заряженным ядром дислокации и ионизированной примесью действуют силы кулоновского взаимодействия. В примесных атмосферах дислокаций наиболее вероятно образование скоплений дефектов вследствие повышенной их растворимости в поле упругих напряжений. Согласно струнной модели дислокации [6], ее сегменты, закрепленные примесями, под действием ультразвука будут совершать колебания, генерируя при этом заряженные дефекты, а также ионизируя нейтральные атомы [7]. Поскольку внутреннее электрическое поле *p-n*-перехода может понизить энергию взаимодействия между ядром дислокации и заряженными дефектами, то действие ультразвука будет

более эффективным в ОПЗ по сравнению с квазинейтральными областями, что и наблюдается экспериментально. Локальное увеличение концентрации носителей заряда в атмосферах Коттрелла приводит к уменьшению толщины ОПЗ и увеличению вероятности туннелирования носителей заряда. Отметим также, что объемные электрофизические параметры базовой  $n$ -области не изменились под влиянием УЗО.

Таким образом, показано, что наибольшее влияние УЗО оказывает на туннельную составляющую тока, связанного с каналами повышенной проводимости, пересекающими плоскость  $p$ - $n$ -перехода. В меньшей степени УЗО влияет на генерационно-рекомбинационный ток однородной части ОПЗ. Причиной указанных различий может быть перестройка дефектов в атмосферах Коттрелла при дислокационном поглощении ультразвука. И, наконец, обработка ультразвуком InAs  $p$ - $n$ -переходов не улучшает их электрические характеристики. Длительное хранение образцов, подвергнутых УЗО, приводит к восстановлению их параметров.

Авторы выражают благодарность Р.К. Савкиной за помощь в проведении эксперимента.

## Список литературы

- [1] Здебский А.П., Лисянский М.И., Лукьянченко Н.Б. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 16. С. 1009–1013.
- [2] Ермолович И.Б., Миленин В.В., Конакова Р.В. и др. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 4. С. 503–508.
- [3] Заверюхина Е.Б., Заверюхина Н.Н., Лезилова Л.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 1. С. 54–66.
- [4] Олих О.Я., Пинчук Т.Н. // Там же. Т. 32. В. 12. С. 22–27.
- [5] Гусейнов Н.А., Олих Я.М., Аскеров Ш.Г. // Там же. Т. 33. В. 1. С. 38–44.
- [6] Гранато А., Люкке К. // Физическая акустика / Под ред. У. Мезена. М.: Мир, 1969. Т. 4. Ч. А. С. 261–321.
- [7] Островский И.В. Акустолуминесценция и дефекты кристаллов. Киев: Вища школа, 1993. С. 174–202.
- [8] Баранский П.И., Беляев А.Е., Комиренко С.М. // ФТП. 1989. Т. 31. В. 9. С. 278–281.
- [9] Олих О.Я., Островский И.В. // ФТП. 2002. Т. 44. В. 7. С. 1198–1202.
- [10] Сукач А.В., Олейник Г.С., Тетеркин В.В. и др. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. Киев: Наукова думка, 2005. В. 40. С. 248–257.



- [11] *Sukach A., Tetyorkin V., Olijnik G. et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5957. P. 212–219.*
- [12] *Брук А.С., Говорков А.В., Колесник Л.И. и др. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 8. С. 1510–1512.*
- [13] *Берман Л.С. Емкостные методы исследования полупроводников. Л.: Наука, 1972. 104 с.*
- [14] *Константинов О.В., Мезрин О.А. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 2. С. 305–311.*
- [15] *Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. С. 415–433.*