

- [4] Алесковский В. Б. *Стехиометрия и синтез твердых соединений*. Л., 1976. 140 с.
 [5] Винчаков В. Н., Кайданов В. И., Лыков С. Н., Рыков С. А. // *Письма ЖЭТФ*. 1986, Т. 43. В. 8. С. 384—386.

Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина

Получено 30.05.1989
 Принято к печати 29.06.1989

ФТП, том 23, вып. 11, 1989

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ МЕТОДОМ РСГУ

Дружинина Л. В., Молодцова Е. В., Кожухова Е. А.,
 Поляков А. Я., Попков А. Н., Тишкин М. В., Шленский А. Л.

Антимонид индия — важный материал современной полупроводниковой электроники. Он используется в основном для создания высокочувствительных детекторов ИК излучения, и поэтому вопрос о спектре глубоких центров, присутствующих в этом материале, имеет первостепенное значение. Работы по изучению схемы рекомбинационных уровней в InSb ведутся уже давно (см., например, одно из наиболее ранних сообщений [1-4]; обзор можно найти в [5]). Большинство этих работ основано на изучении температурных зависимостей времен жизни дырок и электронов, определяемых тем или иным способом. Было показано, что в рекомбинации носителей тока в InSb основную роль играет глубокий донор с уровнем вблизи середины запрещенной зоны. Кроме того, предполагалось существование рекомбинационных центров в верхней [$E_c - (0.03 - 0.06)$ эВ] и нижней [$E_v + (0.055 - 0.071)$ эВ] половинах запрещенной зоны, однако в вопросах об энергетическом положении, концентрации, сечениях захвата электронов и дырок такими центрами существует сильная разнобой (сводку результатов из большого числа оригинальных работ можно найти в [5]). Несомненно, что более прямые измерения методом РСГУ [6] могли бы оказаться очень полезными в данной ситуации. К сожалению, авторам известна только одна работа такого рода [7]. На основании измерения спектров РСГУ ионно-имплантированных $n^+ - p$ -переходов в [7] было установлено существование дырочной ловушки с энергетическим положением $E_v + 0.1$ эВ и концентрацией порядка 10^{13} см⁻³. Поскольку в более ранних сообщениях дефект с уровнем вблизи середины запрещенной зоны считался ловушкой электронов, авторы [7] предположили, что имеют дело с центром, возникающим при ионной имплантации.

В нашей работе измерения методом РСГУ проведены на $n^+ - p$ -структурах, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, а также на «тянутых» $n^+ - p$ -переходах, полученных методом Чохральского за счет изменения типа легирующей примеси в процессе выращивания. В эпитаксиальных переходах эпитакси-

Параметры ловушек, обнаруженных в $n^+ - p$ -структурах на основе InSb

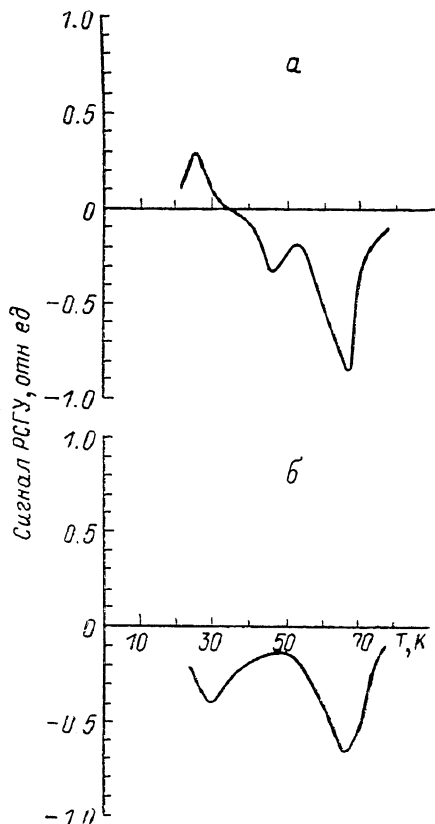
№ ловушки	Энергетическое положение, эВ	Сечение захвата, см ⁻²	Тип ловушки	Типичная концентрация, см ⁻³
H1	$E_v + (0.1 - 0.11)$	$\left\{ \begin{array}{l} 6 \cdot 10^{-14} \\ 5 \cdot 10^{-13} \end{array} \right\}$	Дырочный	$(1 \div 3) \cdot 10^{13}$
H2*	$E_v + (0.55 - 0.06)$	$\left\{ \begin{array}{l} 1 \cdot 10^{-15} \\ 3 \cdot 10^{-15} \end{array} \right\}$	То же	$(4 \div 6) \cdot 10^{12}$
H3**	$E_v + (0.03 - 0.035)$	$\left\{ \begin{array}{l} 1.4 \cdot 10^{-16} \\ 5 \cdot 10^{-16} \end{array} \right\}$	» »	$(5 \div 7) \cdot 10^{12}$
E1*	$E_c - (0.045 - 0.05)$	$(0.8 \div 3) \cdot 10^{-13}$	Электронный	$(3 \div 5) \cdot 10^{12}$

Примечание. * Наблюдается в «тянутых» переходах. ** Наблюдается в эпитаксиальных переходах.

альный n^+ -слой имел толщину около 100 мкм и был легирован теллуром до концентрации $\sim 10^{18}$ см $^{-3}$. Подложки p -типа были легированы цинком и имели концентрацию дырок при 77 К в диапазоне 10^{14} — 10^{15} см $^{-3}$. В тянутых переходах p -слой легирован цинком (концентрация дырок при 77 К 10^{14} — 10^{15} см $^{-3}$), а n^+ -слой — теллуром до концентрации около 10^{18} см $^{-3}$. Перед измерениями на эпитаксиальных структурах выравливались меза-диоды диаметром 3—4 мм. Их поверхность покрывалась слоем анодного окисла для уменьшения токов утечки. В случае тянутых переходов из области, содержащей переход, вырезался параллелепипед длиной ~ 10 мм, с основанием 2×2 мм, стороны шлифовались, травились и покрывались слоем анодного окисла. Омические контакты в случае обоих типов структур создавались пайкой индия.

Спектры РСГУ измерялись на управляемой ЭВМ автоматизированной установке. Основными ее частями являлись мост НР 4280А, работающий на частоте 1 МГц, внешний генератор НР 8112А (для измерений «быстрых» релаксаций емкости) и прокачаный гелиевый криостат CF-1104, позволявший регулировать температуру образца в диапазоне 4.2—400 К. В температурном интервале 10—100 К через 0.3—0.5 К измерялись и оцифровывались кривые релаксации емкости после подачи обогащающего импульса +0.5 (длительностью около 1 мс) и обедняющего импульса -0.5—1 В. Полный исследуемый временной интервал составлял обычно 20—30 мс, интервал между точками при оцифровке, как правило, был 0.2 мс. Кривые релаксации записывались на магнитный диск и обрабатывались с помощью обычной в РСГУ процедуры с различными временными «окнами» t_1 и t_2 [6]. Параллельно со спектрами РСГУ с помощью того же моста измерялись вольтафарадные характеристики, из которых вычислялись концентрации дырок в p -области.

На рисунке представлены спектры РСГУ, полученные для тянутых (а) и



Спектры РСГУ для «тянутых» (а) и эпитаксиальных (б) n^+ - p -структур на основе арсенида индия.

Спектры построены с $t_1=1$, $t_2=10$ мс.

эпитаксиальных (б) n^+ - p -переходов. Как видно, в первых присутствует одна электронная (Е1) и две дырочные (Н1 и Н2) ловушки. В эпитаксиальных структурах электронные ловушки Е1 отсутствуют, а вместо дырочной ловушки Н2 обнаружена дырочная ловушка НЗ. Параметры ловушек приведены в таблице.

Расчет концентрации ловушек Н2, НЗ и Е1 проводился обычным образом. Уровень ловушки Н1 очень близок к середине запрещенной зоны, и поэтому при вычислении ее концентрации делалась поправка на неполное перезаполнение уровня [8].

По поводу таблицы хотелось бы заметить следующее: энергетическое положение ловушек Н1, Н2 и Е1 неплохо совпадает с результатами измерений по температурным зависимостям времени жизни [5]. Концентрации центров несколько ниже, чем при определении другими методами, но в общем находятся в том же диапазоне величин. Сечение захвата для центров Н1 и Е1 примерно на порядок выше, чем самые высокие значения сечений, найденные в ранних работах (см. [5]). Возможно, это связано с тем, что в методе РСГУ измерения проводятся в больших электрических полях обратно смещенного n^+ - p -перехода.

Разброс сечений захвата дырок центрами $E_c + (0.055 - 0.071)$ эВ в разных работах настолько велик [3], что осмысленное сопоставление с сечением захвата дырок ловушками $H2$ не представляется возможным.

О ловушках, похожих на $H3$, сообщалось в связи с исследованиями генерационно-рекомбинационного шума в p -InSb (ссылки можно найти в [5]), однако материала для детального сравнения параметров недостаточно.

Характеристики ловушки $H1$, найденные в нашей работе, очень хорошо совпадают с результатами, полученными в [7] методом РСГУ на ионно-имплантированных $n^+ - p$ -переходах. Это исключает возможность связать обнаруженную в [7] и в нашей работе ловушку с радиационным дефектом, возникающим при имплантации. Тот факт, что вопреки ожиданиям этот центр выглядит в спектрах РСГУ как дырочная ловушка, объясняется большей близостью ее уровня к валентной зоне, чем к зоне проводимости (расчет показывает, что для опубликованных значений сечения захвата электронов донорами $H1$ коэффициент эмиссии дырок с них при температурах, когда наблюдается пик РСГУ, действительно превышает коэффициент эмиссии электронов).

В отношении ловушки $E1$ ранее высказывались предположения, что она связана с комплексами структурных дефектов с кислородом и ее образование подавляется в случае выращивания в присутствии водорода [9]. Наши результаты подтверждают такую идентификацию, поскольку в эпитаксиальных $n^+ - p$ -переходах, полученных в токе водорода, ловушка $E1$ вообще не наблюдается.

Список литературы

- [1] Laff R. A., Fan H. J. // Phys. Rev. 1961. V. 121. N 1. P. 53—62.
- [2] Hollis J. E. L., Choo C. S., Heasell E. L. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 4. P. 1626—1634.
- [3] Наследов Д. Н., Сметанникова Ю. С. // ФТТ. 1962. Т. 4. В. 1. С. 110—115.
- [4] Барышев Н. С., Вдовкина Е. Е., Мартынович А. П., Несмелова И. М., Цицина Н. П., Аверьянов П. С. // ФТТ. 1966. Т. 8. В. 7. С. 2258—2264.
- [5] Зайтов Ф. А., Исаев Ф. Р., Поляков А. Я., Кузьмин А. В. Влияние проникающей радиации на свойства антимонида и арсенида индия. Баку, 1984. 203 с.
- [6] Lang D. V., Kimmerling L. C. // Latt. Def. Semicond. Conf. Ser. N 23. London—Bristol, 1975. P. 581—588.
- [7] Tsukioka K., Miyazawa H. // Japan. J. Appl. Phys. 1982. V. 21. N 8. P. L526—L528.
- [8] Martin G. M., Mittonneau A., Pons D., Mircea A., Woodard D. W. // J. Phys. 1980. V. C13. N 6. P. 3855—3882.
- [9] Зайтов Ф. А., Горшкова О. В., Поляков А. Я., Попков А. И., Кеворков М. Н. // ФТТ. 1981. Т. 15. В. 6. С. 836—839.

Государственный научно-исследовательский
и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Получено 10.01.1989
Принято к печати 1.07.1989

ФТП, том 23, вып. 11, 1989

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПАМЯТЬ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ВЫСОКООМНОГО ZnSe

Горя О. С., Ковалев Л. Е., Коротков В. А.,
Маликова Л. В., Симашкевич А. В.

В ряде работ [1-4] наблюдались вспышки на релаксационных кривых фотопроводимости, обусловленные различными физическими механизмами. В настоящей работе было обнаружено, что после предварительного оптического возбуждения определенной длины волны высокосоомных ZnSe, ZnS, CdS на релаксационных кривых фототока наблюдается вспышка фототока на других длинах волн (см. рисунок, а). Авторами [1, 2] подобное явление связывалось с перезарядкой локальных центров.