

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ИНВЕРСИЯ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ СЛОЕВ  $Cd_xHg_{1-x}Te$ ,  
ПОДВЕРГНУТЫХ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

А. В. Двуреченский, В. Г. Ремесник, И. А. Рязанцев, Н. Х. Талипов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090, Новосибирск, Россия

(Получено 10.02.1992. Принято к печати 7.05.1992)

Известно, что при воздействии ионного пучка с энергией 0.5 кэВ и больше на поверхность  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x=0.2$ ) происходит инверсия типа проводимости материала с  $p$ -типа на  $n$ -тип [<sup>1-3</sup>]. При этом по глубине образца формируется структура с различным уровнем и типом проводимости подобно  $n^+ - n - p$ -структуре. Формирование такой структуры связано с движением свободной ртути и подавлением дефектов акцепторной природы [<sup>3</sup>]. Однако ионный пучок с такими энергиями при бомбардировке кристалла приводит к ряду нежелательных процессов, в частности распылению материала, изменению стехиометрии  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , генерации дефектов [<sup>1-3</sup>]. Чтобы избежать этих эффектов, необходимо использование плазмы ВЧ разряда водорода или инертных газов в качестве активирующей радиации. Энергия ионов и электронов в плазме лежит в интервале  $1 \div 10$  эВ и определяется потенциалом ионизации используемого газа [<sup>4</sup>]. Водород, являясь химически активной примесью, способен насыщать оборванные связи на дефектах.

Цель данной работы — исследование свойств слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ), подвергнутых воздействию плазмы как водорода, так и аргона.

Установка для проведения обработки образцов в плазме  $H_2$  и  $Ar$  включала в себя высоковакуумную камеру (вакуум  $8 \cdot 10^8$  мм рт. ст.) с системой откачки форвакуумным и турбомолекулярным насосом, УВЧ генератор с частотой 40.56 МГц, кварцевый реактор с блоком контроля температуры и систему напуска газов. Для исследования использовались объемные образцы КРТ  $p$ -типа составов  $x=0.217-0.25$  с концентрацией нескомпенсированных акцепторов  $N_A - N_D = 4 \cdot 10^5 \div 9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (см. таблицу). Обработка в плазме осуществлялась при комнатной температуре в течение 5—60 мин с плотностью тока ВЧ разряда  $j = 4 \div 10 \text{ мкА/см}^2$ . Необходимо отметить, что никакого напряжения на образцы не прикладывалось. Это является важным моментом, отличающим данные эксперименты от работ [<sup>1-3</sup>], в которых обработка поверхности подложек осуществлялась ускоренным потоком ионов с энергией  $> 0.5$  кэВ. Профили распределения электрически активных центров в образцах определялись методом дифференциального холловских измерений с шагом  $0.1 \div 10 \text{ мкм}$  [<sup>4</sup>]. Методом оптического отражения света [<sup>5</sup>] определялся состав  $x$  поверхностных слоев КРТ с точностью  $\Delta x = \pm 0.001$  при глубине зондирования 30 нм. Время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  определялось по релаксации фотопроводимости, возбужденной лазером  $AlGaAs$  с длиной волны излучения  $\lambda = 0.9 \text{ мкм}$  с точностью  $\Delta \tau = \pm 0.1 \text{ нс}$ . Измерения проводились при 77 К.

Номер образца	Исходный материал		Режим обработки		Параметры $n$ -слоя		Концентрация вблизи поверхности $n$ , $\text{см}^{-3}$	Глубина $n$ -слоя $d_n$ , $\mu\text{м}$	Вид плазмы
	$N_A - N_D$ , $\text{см}^{-3}$	$\mu_p$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$j$ , $\text{мкА}/\text{см}^2$	$t$ , мин	$N_s$ , $\text{см}^{-2}$	$\mu_n$ , $\text{эфф.}$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$			
1	$6.3 \cdot 10^{15}$	660	5	5	$1.2 \cdot 10^{11}$	$2.3 \cdot 10^5$	$6.0 \cdot 10^{15}$	8	$\text{H}_2$
2	$6.4 \cdot 10^{15}$	640	5	10	$2.4 \cdot 10^{11}$	$7.0 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^{16}$	10	$\text{H}_2$
3	$5.6 \cdot 10^{15}$	750	5	20	$4.6 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^{17}$	20	$\text{H}_2$
4	$5.4 \cdot 10^{15}$	760	4	10	Нет $n$ -слоя				$\text{H}_2, \text{Ar}$
5	$5.6 \cdot 10^{15}$	760	10.5	2	$2.3 \cdot 10^{13}$	$1.3 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^{18}$	10	$\text{H}_2$
6	$4.0 \cdot 10^{15}$	700	6	60	$7.1 \cdot 10^{13}$	$1.2 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^{17}$	130	$\text{H}_2$
7	$4.3 \cdot 10^{15}$	590	6	20	$7.8 \cdot 10^{12}$	$6.0 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^{16}$	80	$\text{H}_2$
8	$4.3 \cdot 10^{15}$	590	6	20	$6.9 \cdot 10^{13}$	$3.1 \cdot 10^4$	$4.1 \cdot 10^{18}$	85	$\text{Ar}$
9	$9.0 \cdot 10^{15}$	500	6	20	$4.9 \cdot 10^{13}$	$4.8 \cdot 10^4$	$2.8 \cdot 10^{18}$	50	$\text{Ar}$

Обнаружено, что выдержка образцов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x = 0.217 - 0.25$ )  $p$ -типа проводимости в плазме водорода или аргона при  $j > 4$   $\text{мкА}/\text{см}^2$  и  $t > 2$  мин приводит к инверсии проводимости материала с  $p$ -типа на  $n$ -тип на глубину до  $50 \div 100$   $\mu\text{м}$ . Характеристики получаемых слоев приведены в таблице. Видно, что с ростом времени обработки плазмы увеличивается слоевая  $N_s$  и объемная  $n$  концентрации носителей заряда, а также и толщина  $n$ -слоя. Увеличение  $j$  до значений больше 5  $\text{мкА}/\text{см}^2$  приводит к резкому нарастанию величин  $N_s$  и  $n$ . В случае использования плазмы с плотностью тока  $j < 4$   $\text{мкА}/\text{см}^2$  формирования  $n$ -слоя не обнаружено.

На рис. 1 и 2 представлены изменения  $N_s$ ,  $n$  и  $\mu$  по глубине образцов, подвергнутых воздействию плазмы  $\text{H}_2$  и  $\text{Ar}$  соответственно. Можно выделить следующие особенности: толщина  $n$ -слоя до 100  $\mu\text{м}$  и ступенчатый характер профилей рас-

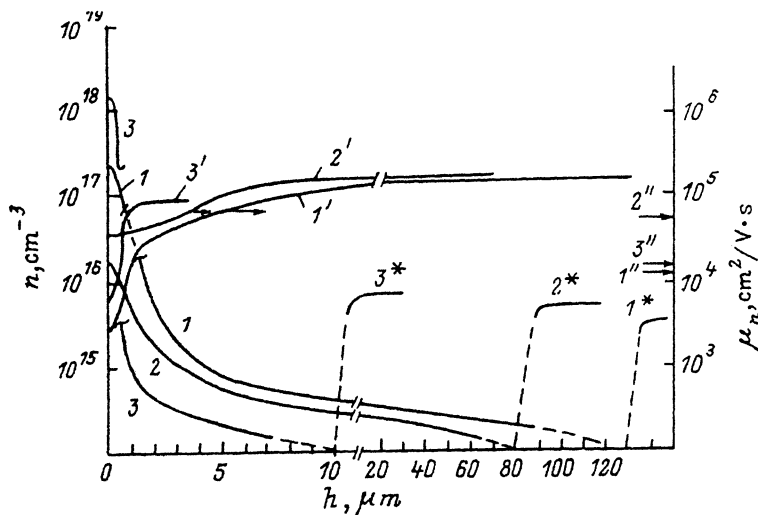


Рис. 1. Распределение концентрации электронов (1—3) или дырок (1\*—3\*) и подвижности электронов  $\mu_n$  (1'—3', 1''—3'') по глубине образца после обработки в плазме  $\text{H}_2$  для различных режимов: 1—1'' —  $j = 6$   $\text{мкА}/\text{см}^2$ ,  $t = 60$  мин; 2—2'' —  $j = 6$   $\text{мкА}/\text{см}^2$ ,  $t = 20$  мин; 3—3'' —  $j = 10.5$   $\text{мкА}/\text{см}^2$ ,  $t = 2$  мин.

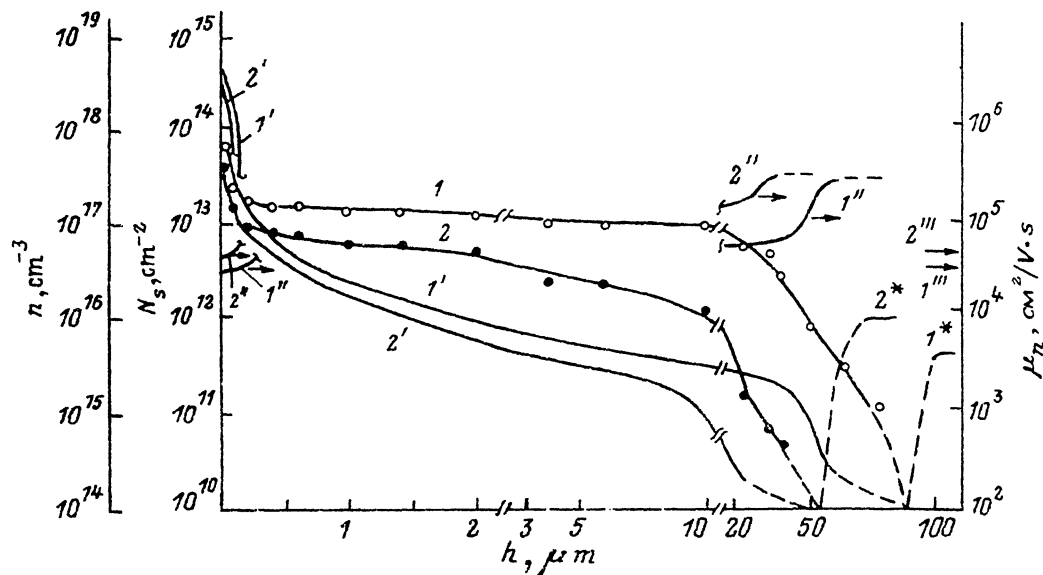


Рис. 2. Распределение слоев  $N_s$  (1, 2) и объемной концентрации электронов ( $1'$ ,  $2'$ ) или дырок ( $1^*$ — $2^*$ ) и подвижности электронов  $\mu_n$  ( $1''$ ,  $1'''$ ,  $2''$ ,  $2'''$ ) после обработки в плазме аргона при  $j = 6$  мкА/см<sup>2</sup> и  $t = 20$  мин образцов КРТ с различной исходной концентрацией дырок  $N_A - N_D$ ,  $\times 10^{15}$  см<sup>-3</sup>:  $1-1''$  — 4.3,  $2-2'''$  — 9.0.

пределения носителей заряда по глубине, характерный для структуры типа  $n^+ - n - p$ . Следует отметить высокую холловскую подвижность носителей заряда  $\mu_n = 1 \div 2 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с и большое время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau = 1$  мкс в  $n$ -слое (в  $p$ -слое  $\tau = 0.65$  мкс) при 77 К. В приповерхностном  $n^+$ -слое значения  $\mu_n = 2 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/В·с, что существенно больше аналогичных значений  $\mu_n$  для  $n^+$ -слоев, получаемых с помощью ионной имплантации. Эти данные по  $\tau$  являются типичными для всех образцов независимо от состава  $x$ .

Результаты по формированию  $n$ -слоев были одинаковы после обработки в водородной или аргоновой плазме. Исходя из этого можно заключить, что инверсия типа проводимости обусловлена чисто радиационным воздействием плазмы. Роль водорода как химически активной примеси в данных экспериментах не проявилась.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Воздействие  $\text{Ag-}$ ,  $\text{H}_2$ -плазмы на материал приводит к высвобождению Hg из микровключений на поверхности кристалла с последующей ее диффузией в глубь образца. Действительно, при добавлении паров серной кислоты в реактор образования  $n$ -слоя не наблюдалось ни при каких режимах плазменной обработки. По-видимому, пары серной кислоты в процессе воздействия плазмы удаляют избыточную ртуть с поверхности кристалла. Кроме того, методом оптического отражения света установлено, что состав приповерхностной области обработанных образцов в  $\text{Ag-}$ ,  $\text{H}_2$ -плазме не изменился. Таким образом, единственным источником свободной Hg могут являться только ее микровключения. Следует отметить, что при выбранных значениях  $j = 4 \div 9$  мкА/см<sup>2</sup> не обнаружено заметного распыления поверхности исследуемых образцов. (С помощью интерференционного микроскопа не обнаружено ступени между защищенной и открытой частями образца, обработанного в течение  $t > 20$  мин).

Пороговую зависимость формирования  $n^+ - n$ -слоев от плотности тока можно связать с тем, что при малых значениях  $j < 4$  мкА/см<sup>2</sup> микровключения устойчивы к воздействию плазмы, а при больших  $j > 4$  мкА/см<sup>2</sup> появляются междоузельные

атомы ртути. Необходимо отметить, что пороговая зависимость от мощности плазмы обнаружена в работе [6], в которой исследовался процесс травления  $\text{SiO}_2$  с помощью водородно-плазменной обработки. Было установлено, что при мощности плазмы с электронной плотностью  $n_e > 10^{10} \text{ см}^{-3}$  происходит удаление  $\text{SiO}_2$ , в то время как при  $n_e < 10^{10} \text{ см}^{-3}$   $\text{SiO}_2$  остается на поверхности Si.

Двухступенчатый характер профиля распределения носителей заряда образцов КРТ, обработанных в плазме газов при  $T = 300 \text{ К}$ , можно связать с двумя видами миграции Hg: первый — «быстрая» диффузия ртути ( $D_{\text{Hg}} = 4 \div 5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ ) по междоузлиям с образованием глубокого  $n$ -слоя; второй — «медленная» или обычная диффузия ( $D_{\text{Hg}} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$ ) по вакансиям с формированием  $n^+$ -слоя. Чтобы исключить вероятность того, что формирование глубоких (до  $l \sim 130 \text{ мкм}$ )  $n$ -слоев связано с диффузией Hg в разогретых до  $T > 300\text{—}400 \text{ }^\circ\text{C}$  образцах независимо от термодары, проводилась оценка максимальной  $T$  в реакторе. На индикатор из сплава Вуда нанесли риски, края которых оплавляются при  $T = 67 \text{ }^\circ\text{C}$ . Оказалось, что при максимальной мощности ВЧ разряда ( $j = 10.5 \text{ мкА/см}^2$ ) в течение 60 мин нагрев спутника не превышал  $67 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В итоге можно заключить, что обработка в плазме газов Ag,  $\text{H}_2$  образцов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с  $x = 0.217 \div 0.25$   $p$ -типа позволяет получать глубокие (до  $100 \text{ мкм}$ ) слои  $n$ -типа проводимости с хорошими электрофизическими характеристиками. Обнаружено пороговое значение плотности тока ВЧ разряда ( $j = 4 \text{ мкА/см}^2$ ), ниже которого инверсии проводимости под действием плазмы не наблюдается. Выявлено аномально глубокое проникновение Hg с поверхности в глубь кристалла под действием плазмы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J. T. M. Wotherspoon. U. S. Patent 4.411.732 (1983).
- [2] В. И. Иванов-Омский, К. Е. Миронов, К. Д. Мынбаев. ФТП, 24, 2222 (1990).
- [3] L. O. Bubulac. J. Cryst. Growth., 86, 723 (1988).
- [4] Н. Х. Талипов, В. П. Попов, В. Г. Ремесник, З. А. Нальпина. ФТП, 26, 310 (1992).
- [5] H. V. Boenig. Plasma Science and Technology, Chap. 13, 36. N. Y. (1983).
- [6] H. Arwin, D. E. Aspnes. J. Vac. Sci. Techn., A2, 1316 (1984).
- [7] K. Nakashima, M. Ishii, I. Tajima, M. Yamamoto. Appl. Phys. Lett., 58, 2663 (1991).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 27, вып. 1, 1993

### БАРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$

С. С. Болгов, В. П. Кислый, В. К. Малютенко, А. П. Савченко

Институт полупроводников Академии наук Украины,  
252650, Киев, Украина  
(Получено 28.05.1992. Принято к печати 8.06.1992)

Недавно в [1] нами была показана возможность управления концентрацией свободных носителей заряда при  $T > 300 \text{ К}$  в узкозонной части гетероструктур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$  с помощью контактных явлений эксклюзии и аккумуляции. Этот эффект был использован в качестве нетрадиционного способа генерации положительной и отрицательной люминесценции в узкозонных полупроводниках при высоких температурах. В настоящей работе исследуется возможность