

©1994 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОМБИНАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ СВЧ МЕТОДОМ

П.А.Бородовский, А.Ф.Булдыгин, В.Г.Ремесник

Институт физики полупроводников

Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, Новосибирск, Россия

(Получена 12 апреля 1994 г. Принята к печати 25 мая 1994 г.)

Проведен анализ влияния неоднородности состава по толщине эпитаксиального слоя и поверхностной рекомбинации на измеренное СВЧ методом время релаксации фотопроводимости τ при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Показано, что значения τ , полученные при комнатной температуре, коррелируют с профилем неоднородности состава по глубине эпитаксиального слоя, а при температуре жидкого азота — с усредненным по толщине пленки значением x . В эпитаксиальных слоях с концентрацией дырок ниже 10^{16} см^{-3} τ ограничивается поверхностной рекомбинацией ($S > 10^4 \text{ см/с}$).

Рекомбинация неравновесных носителей заряда (ННЗ) в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ исследована в большом числе работ (см. обзор [1]). Наблюдаемые температурные зависимости времени релаксации фотопроводимости (ФП) хорошо согласуются с теоретическими расчетами времени жизни для межзонной рекомбинации τ_v (см., например, [2,3]). В чистых кристаллах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ измеренная величина времени жизни τ при 77 К составляет несколько микросекунд. Однако в кристаллах p -типа проводимости с концентрацией рекомбинационных центров $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ время жизни ННЗ уменьшается до 0.1 мкс и ниже. Температурная зависимость τ в этом случае объясняется двухуровневой моделью рекомбинации Шокли-Рида [4]. В обзорной работе [5] отмечается, что опубликованные значения времени жизни в $p\text{-Cd}_{0.225}\text{Hg}_{0.775}\text{Te}$ изменяются от $\sim 1 \text{ нс}$ до 1 мкс и более при 77 К. Неоднородность состава твердого раствора по толщине в эпитаксиальных пленках и влияние поверхностной рекомбинации существенно затрудняют анализ экспериментальных результатов. Методом стационарной ФП и фотоэлектромагнитным методом в работах [6,7] определялись времена жизни ННЗ и скорости поверхностной рекомбинации в образцах, изготовленных из эпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ p -типа проводимости.

В настоящей работе проведен анализ влияния поверхностной рекомбинации и неоднородности состава по толщине эпитаксиальной пленки на время релаксации ФП, измеренное СВЧ методом. При анализе экспериментальных результатов использовались следующие уравнения, полученные в работе [8] для определения скоростей поверхностной рекомбинации S_1 и S_2 на двух сторонах тонкой полупроводниковой пластины:

$$\Delta n(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} W_m(z) \exp(-t/\tau_m), \quad (1)$$

$$1/\tau_m = 1/\tau_v + D\lambda_m^2 = 1/\tau_v + 1/\tau_s, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg}(\lambda_m d) = \frac{(S_1 + S_2) D \lambda_m}{D^2 \lambda_m^2 - S_1 S_2}, \quad (3)$$

где D — коэффициент амбиполярной диффузии, τ_v — объемное время жизни, d — толщина полупроводниковой пластины. Коэффициенты $W_m(z)$ в (1) определяются из условия, что при $t = 0$ имеем $\Delta n(z, 0)$. Из уравнений (1)–(3) следует, что первый член ряда ($m = 1$) затухает гораздо медленнее, чем члены более высокого порядка, и спустя некоторое время можно учитывать только первый член с $\tau_s = 1/(D\lambda_1^2)$. Можно показать, что при малой скорости поверхностной рекомбинации и $S_1 = S_2 = S$ величина $\tau_s = d/(2S)$, а для очень сильной поверхностной рекомбинации ($S \rightarrow \infty$) $\tau_s = d^2/(\pi^2 D)$.

В случае толстого образца, $d > \sqrt{D\tau_v}$, учитывая поверхностную рекомбинацию только с одной стороны, освещаемой сильно поглощаемым светом ($\alpha d \gg 1$), можно получить следующее приближенное выражение для скорости поверхностной рекомбинации:

$$S = D\lambda_1^2 L = (1/\tau_1 - 1/\tau_v)L, \quad (4)$$

где $L = \sqrt{D\tau_v}$ — длина амбиполярной диффузии.

Измерение времени релаксации ФП методом СВЧ при импульсном освещении полупроводниковой пластины проводилось нами на установке, описанной в [9]. Оптическое возбуждение носителей осуществлялось импульсным полупроводниковым лазером ЛПИ-12 ($\lambda \approx \approx 0.92$ мкм) с максимальной мощностью излучения ~ 7 Вт, длительностью импульса 150 нс, длительностью заднего фронта ~ 7 нс. Для охлаждения азотом образец помещался в пенопластовый сосуд, имеющий дно из фторопластовой пленки толщиной 100 мкм. Для двух образцов в табл. 1 приведены паспортные значения концентрации носителей заряда (p) и подвижности (μ_p) при 77 К вместе с измеренными τ и расчетными значениями τ_v при комнатной температуре и при охлаждении до температуры жидкого азота. Расчетные значения τ_v получены по формулам из работы [10]. В расчетах учитывалась оже-рекомбинация для двух процессов: с участием двух электронов и одной дырки (τ_{A1}) и с участием двух тяжелых дырок и электрона с переходом тяжелой дырки в легкую (τ_{A7}). С понижением температуры начинает доминировать второй процесс и при 77 К достаточно учесть τ_{A7} . Кроме того, при 77 К

Таблица 1. Параметры образцов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$: измерение и расчет

x	p , 10^{15} см^{-3}	μ_p , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Эксперимент (ФП)		Расчет		
			τ , мкс		τ_v , мкс		S , $10^4 \text{ см}/\text{с}$
	77 К	77 К	77 К	300 К	300 К	77 К	77 К
0.22	1.0	680	0.32	0.08	0.08	1.9	7.6
0.225	4.3	600	0.45	0.11	0.117	0.87	2.0

Таблица 2. Параметры эпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$: состав, толщина пленки, концентрация и подвижность дырок, время релаксации ФП

№ структуры	x	d , мкм	p , 10^{15} см^{-3}	μ_p , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Эксперимент (ФП)		Расчет
					τ , нс		τ_v , нс
			77 К	77 К	77 К	300 К	300 К
761-26	0.215	32	8.5	540	15	25	64
730-754	0.228	32	8.8	480	16	42	154
360-8	0.217	29	22	-	12	20	65
98-19	0.216	32	25	300	15	25	72
306-1	0.216	27	29	290	15	25	71
761-18	0.212	29	48	480	15	20	48

учитывалась излучательная рекомбинация ($\tau_R = n_i^2 / (G_{RP0})$ [11]). Расчетные значения τ_v при комнатной температуре хорошо согласуются с измеренными значениями времени релаксации ФП. При охлаждении образца жидким азотом экспериментальные значения τ заметно меньше расчетных τ_v , что может быть связано с влиянием поверхностной рекомбинации. Поскольку толщина образцов ($d \approx 0.8$ мм) была существенно больше диффузионной длины ($L \approx 0.1-0.2$ мм), используя формулу (4) можно определить скорости поверхностной рекомбинации S , которые также приведены в табл. 1. Полученные значения S вполне реальны, если учесть, что нами не предпринимались какие-либо меры для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации.

Измерения времени релаксации ФП в эпитаксиальных структурах $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ проводились на образцах, параметры которых приведены в табл. 2. Экспериментальные значения τ при комнатной температуре существенно выше значений τ , полученных при охлаждении образцов жидким азотом. Кроме того, приведенные в табл. 2 расчетные значения τ_v в несколько раз больше полученных из измерений при комнатной температуре в отличие от объемных образцов (см. табл. 1). Это свидетельствует о том, что эпитаксиальные пленки неоднородны по составу и использованные в расчетах паспортные значения являются некоторыми усредненными величинами по толщине пленки. Если учесть, что при комнатной температуре длина диффузии в несколько раз меньше толщины пленки d , то экспериментальные зна-

Таблица 3. Сравнение результатов измерений (τ) и расчета (τ_v) при $T = 300$ К в структурах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$

№ структуры	761-26	730-754	360-8	98-19	306-1	761-18
x_0	0.204	0.212	0.200	0.205	0.200	0.201
τ_v , нс	25	52	16.5	30.5	16.5	15
τ , нс	25	42	18	25	25	20

Таблица 4. Результаты измерений (τ) и расчета (τ_v , S_1 , S_2) параметров структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$ при $T = 77$ К

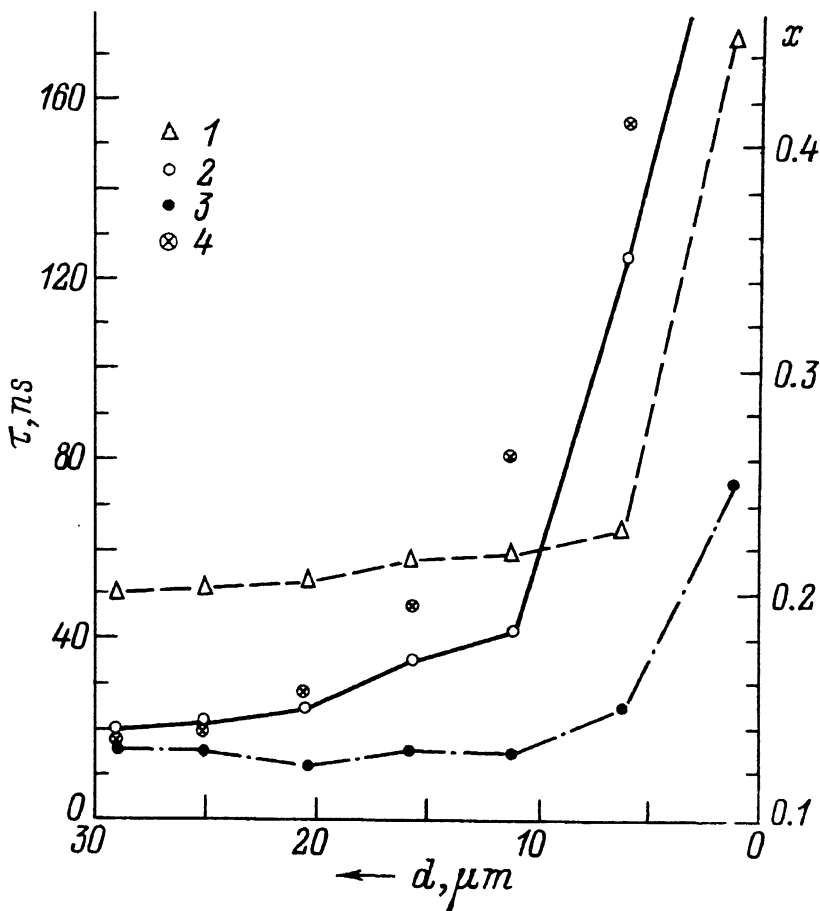
№ структуры	761-26	730-754	360-8	98-19	306-1	761-18
\bar{x}	0.215	0.228	0.217	0.216	0.216	0.212
τ , нс	15	16	12	15	15	15
τ_v , нс	130	100	15	21	15.6	12.5
S , 10^5 см/с ($S_1 = S_2$)	1.1	0.98	0.22	0.34	-	-
S_1 , 10^5 см/с ($S_2 = 0.1S_1$)	2.9	2.55	0.45	0.75	-	-

чения τ должны коррелировать с изменением x по толщине пленки и их нужно сравнивать со значениями τ_v , рассчитанными по величине x_0 , характеризующей состав в приповерхностном слое.

Определение содержания Cd в приповерхностном слое (x_0) проводилось по спектрам оптического отражения в области энергии 1.5–6 эВ по известной методике (см., например, [12]). Спектры отражения записывались при комнатной температуре с помощью специальной приставки на спектрофотометре SpecordUV-VIS ($\lambda = 180$ –800 нм). Точность определения x_0 по калибровочной кривой в нашем случае составляла $\Delta x = \pm 0.003$, толщина анализируемого слоя ~ 300 нм.

Расчетные значения τ_v для найденный величин x_0 в исследованных образцах в сравнении с результатами измерения времени релаксации ФП приведены в табл. 3. Достаточно хорошее согласие результатов расчета и измерений свидетельствует также о том, что влиянием поверхностной рекомбинации при комнатной температуре можно пренебречь. Использованная вами методика определения состава твердого раствора в приповерхностной области x_0 позволила также грубо измерить распределение x по толщине пленки при последовательном уменьшении ее толщины путем химического травления. Одновременно проводились и измерения τ при различных толщинах пленки.

На рисунке приведены результаты этих измерений для одного из образцов (структура 761-18). Как видно из рисунка, наблюдается корреляция зависимостей x и τ от толщины пленки при комнатной температуре. При охлаждении жидким азотом такой корреляции не наблюдалось, хотя в некоторых образцах имело место возрастание τ в несколько раз при стравливании пленки до толщины менее чем 5 мкм. Такая разница может быть объяснена тем, что при охлаждении жидким азотом длина диффузии ННЗ больше толщины пленки и измеренные значения τ должны сравниваться с расчетными значениями τ_v по



Распределение по толщине эпитаксиального слоя структуры $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te/CdTe}$ содержания Cd x (1), а также времени релаксации фотопроводимости τ при комнатной температуре (2) и при охлаждении жидким азотом (3), 4 — расчетные значения τ_v при 300 К.

усредненным величинам \bar{x} (табл. 4). В образцах с $p \gtrsim 2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ измеренные и расчетные значения хорошо согласуются. В структурах с $p \lesssim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ расчетные величины τ_v существенно больше измеренных и здесь необходимо учитывать поверхностную рекомбинацию. В табл. 4 приведены вычисленные значения скорости поверхностной рекомбинации по формулам (2)–(3) для случаев $S_1 = S_2 = S$ и для $S_2 = 0.1S_1$. В последнем случае мы полагали, что скорость поверхностной рекомбинации на границе пленка-подложка существенно ниже, чем на свободной поверхности, как и в работах [6,7].

Отметим, что полученные значения S_1 заметно ниже, чем в работе [7], но достаточно удовлетворительно согласуются с результатами работы [6], где $S_2 < 0.1S_1$ и скорость поверхностной рекомбинации при 77 К на свободной поверхности $S_1 \simeq 1 \cdot 10^5$ и $9 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ при концентрации дырок $7 \cdot 10^{15}$ и $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Список литературы

- [1] Н.С. Барышев, Б.Л. Гальмонт, М.И. Ибрагимова. ФТП, **24**, 209 (1990).
- [2] В.В. Зуев, А.И. Клышевич, А.А. Стяпоновичус, М.П. Яковлев. ФТП, **26**, 171 (1992).
- [3] Н.Л. Баженов, В.И. Иванов-Омский, Н.Н. Константинова, В.К. Огородников. ФТП, **26**, 2202 (1982).
- [4] R. Fastow, Y. Nemirovsky. J. Appl. Phys., **66**, 1705 (1989).
- [5] R. Fastow, D. Goren, Y. Nemirovsky. J. Appl. Phys., **67**, 1749 (1990).
- [6] G. Sarusi, A. Zemel, D. Eger. J. Appl. Phys., **72**, 2312 (1992).
- [7] S.A. Studenikin, I.A. Panaev. Semicond. Sci. Technol., **8**, 1324 (1993).
- [8] В.А. Заварицкая, А.В. Кудинов, В.А. Миляев, В.А. Никитин, А.М. Прохоров, А.В. Широков. ФТП, **18**, 2160 (1984).
- [9] П.А. Бородовский, А.Ф. Булдыгин, Д.Г. Тарло. А.с. СССР № 1689874. БИ, **41** (1991).
- [10] A. Jozwikowska, K. Jozwikowska, A. Rogalski. Infr. Phys., **31**, 543 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова
