

УДК 621.315.92

**ФОТОПРОВОДИМОСТЬ КРИСТАЛЛОВ  $Cd_xHg_{1-x}Te$   
ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ****Б.Ш.БАРХАЛОВ, З.В.ДЕМИРОВА, Г.С.СЕЙДЛИ***Институт фотоэлектроники НАН Азербайджана  
370141, Баку, ул. Ф.Агаева, 555 квартал*

*Исследованы рекомбинационные процессы происходящие в кристаллах кадмий-ртуть-теллур при малых и высоких уровнях поверхностного возбуждения. Обсуждаются особенности спектральных характеристик и рекомбинационных процессов в зависимости от условий возбуждения.*

Реальные монокристаллы твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ), полученные в недостаточно строгих технологических условиях, содержат значительное количество термодинамически неравновесных дефектов (точечных и протяженных), которые могут возникать и при химико-технологической обработке поверхности, неизбежной в процессе изготовления малоразмерных элементов и приборов [1,2]. В материалах с низким порогом пластичности наличие таких дефектов может в условиях внешнего воздействия не только изменить, но и дестабилизировать во времени их электрофизические и фотоэлектрические характеристики.

Существует большое количество методов обработки поверхности КРТ с целью ее стабилизации и уменьшения влияния состояния поверхности на чувствительность [3]. При этом отсутствуют сведения о механизмах рекомбинации, действующих при поверхностном возбуждении этих кристаллов. Такие сведения могли бы помочь найти пути уменьшения скорости поверхностной рекомбинации.

В настоящей работе приводятся результаты исследования рекомбинационного процесса при низких и высоких уровнях поверхностного возбуждения кристаллов КРТ  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $0,25 \leq x \leq 0,30$ ).

Исследовались кристаллы КРТ n-типа проводимости с концентрацией носителей заряда  $n_0=10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при температуре  $T=80\text{K}$ . Состав и однородность состава контролировались микрорентгеновским анализатором "Сamebax". Поверхность кристаллов обрабатывали стандартными методами, т.е. вырезанные из шайб образцы шлифовали и полировали с последовательным применением микропорошков от М5 до М1. Механически обработанные образцы травили в растворе 8%-ного  $Br_2$  в  $HBr$ . На свежетравленную поверхность наносили индиевые контакты. Образцы представляли собой параллелепипеды с линейными размерами  $(0,3 \div 0,4) \cdot 0,1 \cdot 0,05 \text{ см}$ .

Спектральные характеристики фотопроводимости измеряли в температурном диапазоне  $80 \div 300\text{K}$  на фиксированной частоте модуляции  $f=800\text{Гц}$ . Источником монохроматического излучения служил спектрометр ИКС-21. Усиление и синхронное преобразование осуществляли с помощью селективного усилителя У2-6 и синхронного преобразователя В9-2. Спектральные зависимости записывали на самопишущем потенциометре КСП-4.

Время жизни неравновесных носителей заряда в образцах измерялось по релаксации сигнала фотопроводимости при возбуждении импульсами света в диапазоне температур  $80 \div 300\text{K}$ .

При определении времени жизни в объеме  $\tau_v$  и на поверхности  $\tau_s$  для возбуждения использовали гелий-неоновый ( $\lambda=3,39\text{мкм}$ ) Ga-As лазеры ( $\lambda=0,9\text{мкм}$ ). Сигнал усиливали

широкополосным усилителем УЗ-23, для визуальной регистрации использовали осциллографы С1-70 и С7-8.

Спектральное распределение fotocувствительности  $U_c(\lambda)$  некоторых образцов приведено на Рис.1. Кривые имеют типичный  $\delta$ -образный вид, свидетельствующий о повышенном темпе рекомбинации в области сильного поглощения. Максимум спектральной чувствительности точно соответствует значению ширины запрещенной зоны  $E_g$ , рассчитанному для данного состава кристаллов. Естественно, что влияние поверхности более существенно в случае образцов с большим временем жизни  $\tau_v$ , о чем можно судить по кратности отношения сигнала в максимуме фотопроводимости к ее значению на коротковолновом плато, т.е.  $K = U_{max}/U_s$ .

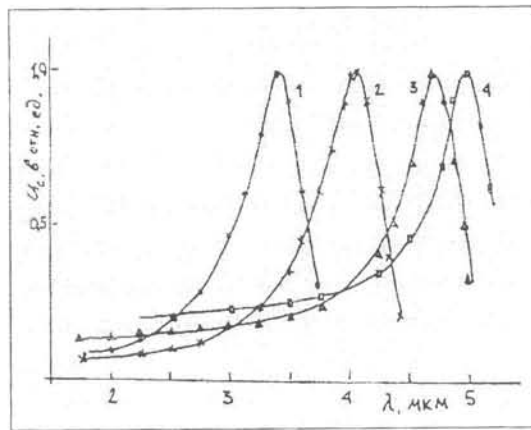


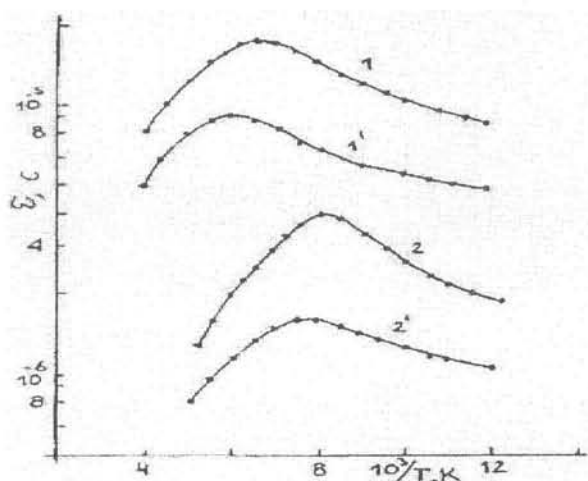
Рис.1.

Спектральное распределение fotocувствительности кристаллов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  при  $T=80K$ ,  $x$ : 1-0,30; 2-0,28; 3-0,26; 4-0,25.

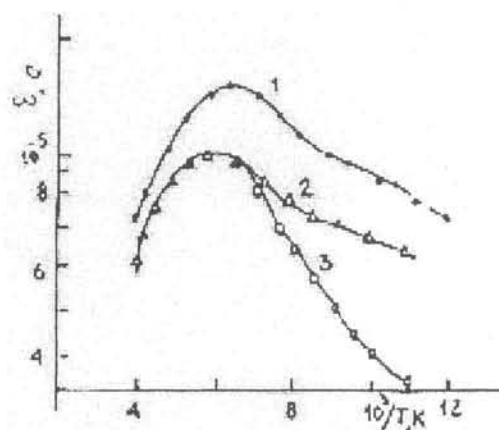
Характерной особенностью функции  $U_c(\lambda)$  является зависимость  $K$  от температуры. При нагревании кристаллов амплитуда сигнала в коротковолновой области спектра возрастает. Для кристаллов с  $x = 0,29$  величина  $K$  уменьшается от 6 при  $T=80K$  до 2 при  $T=200K$ . Максимум  $U_c(\lambda)$  при этом смещается в коротковолновую область [4].

Кривые релаксации фотопроводимости изучаемых кристаллов исследовались при низких и высоких уровнях возбуждения. В линейном режиме кривые релаксации были экспоненциальными с одним  $\tau_s$  и двумя характеристическими временами  $\tau_v$ . Температурная зависимость  $\tau_s$  для двух кристаллов с одним временем релаксации приведена на Рис 2. Несмотря на то, что для этих образцов  $\tau_v$  были различными, значения  $\tau_s$  различались не столь существенно при  $T=80K$ .

В образцах со сложным спектром  $U_c(\lambda)$  в области сильного поглощения на кривых релаксации сигнала фотопроводимости при поверхностном возбуждении ( $\lambda=0,9\mu m$ ) можно выделить два участка с  $\tau_{s_1} = 2 \cdot 10^{-6} c$  и  $\tau_{s_2} = 3 \cdot 10^{-7} c$  (при  $T=80K$ ). Имея различные температурные зависимости значения  $\tau_{s_1}$  и  $\tau_{s_2}$  сближаются при нагревании, и при 140K в релаксации появляется лишь одно время  $\tau_s$ , близкое  $\tau_v$  (Рис.3). Характерно, что в этой же области температур fotocувствительность при объемном и поверхностном возбуждении практически одинакова.


**Рис.2.**

Температурные зависимости  $\tau$  для образцов с  $x=0,28$  (1,1') и  $x=0,26$  (2,2') при объемном и поверхностном возбуждении.


**Рис.3.**

Температурные зависимости  $\tau$  для образца с  $x=0,28$  при объемном (1) и поверхностном возбуждении (2,3) соответственно для медленной и быстрой составляющей.

В отличие от линейного режима при высоких уровнях возбуждения кривая релаксации фотопроводимости после лазерного возбуждения ( $\lambda = 0,9 \mu\text{м}$ ) имеет более сложный характер. Непосредственно после окончания действия импульса релаксация фотопроводимости происходит быстро, по неэкспоненциальному закону. Относительная амплитуда этого участка возрастает с ростом степени компенсации кристаллов, т.е. с уменьшением  $n_0$ . На длинновременном участке релаксация происходит по экспоненциальному закону с характеристическим временем близким к значениям  $\tau_s$ , измеренным в линейном режиме.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Для КРТ, в котором преобладает зона-зонная рекомбинация [7], можно указать несколько причин, понижающих чувствительность при поверхностном возбуждении носителей заряда.

При участии в процессе рекомбинации поверхностных состояний возникает дополнительный (по отношению к объему) канал рекомбинации. Это может быть обнаружено экспериментально по температурной зависимости  $\tau_s$  при поверхностном возбуждении – его активации с ростом температуры.

Повышенный темп рекомбинации может быть связан с тем, что если поверхность образца обогащена носителями заряда, то по мере приближения к ней можно ожидать меньшего  $\tau_s$  в области  $x_s < x$ , и появления встроенного электрического поля, стягивающего носители заряда к поверхности. Указанный механизм характеризуется уменьшением  $\tau_s$  в области собственной проводимости образца. Удовлетворительное согласие расчета с экспериментом при поверхностном возбуждении может быть получено, если считать, что на поверхности существует обогащающий изгиб ( $n_{0s} > n_0$ )

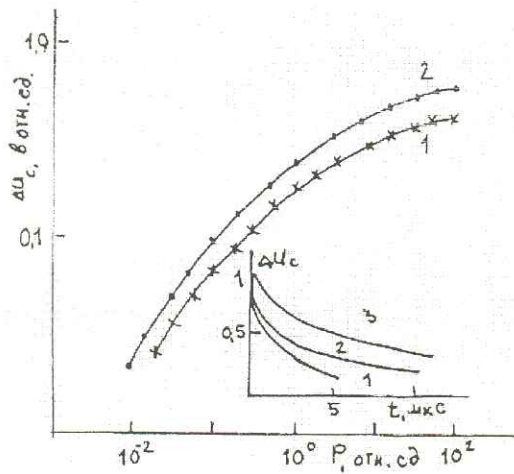
Если принять, что при поверхностном возбуждении и при  $\Delta n \geq n$  реализуется механизм Оже-рекомбинации, то экспериментальная кривая релаксации находит свое естественное объяснение.

Если предположить, что вблизи поверхности имеется слой с повышенной концентрацией носителей заряда, где неравновесные носители заряда распределены

равномерно, то решение соответствующего кинетического уравнения для  $\Delta n(t)$  при условии  $\Delta n = \Delta p$  приводит к следующему выражению для двух предельных режимов возбуждения [6]:

$$\Delta n(t) = \begin{cases} \frac{\Delta n_{\max}}{\sqrt{t[(\Delta n_{\max}/n_{0s})^2 - 1]}/\tau_s + 1} & \text{при } \Delta n_{\max} \gg n_{0s} \\ \Delta n_{\max} \exp(-t/\tau_s) & \text{при } \Delta n_{\max} \ll n_{0s} \end{cases}$$

Первое выражение описывает начальные участки кривых релаксации (гиперболу второго порядка), которые в координатах  $\frac{(\Delta n_{\max}/\Delta n) - 1}{(\Delta n_{\max}/\Delta n - 1) - \tau_s} = \frac{t}{\tau_s}$  преобразуются в прямую, по наклону которой можно определить значение  $\tau_s$ . Второе выражение описывает более длинновременной участок кривой релаксации с характеристическим временем равным  $\tau_s$ .



Специфический характер имеют люксамперные характеристики (ЛАХ), т.е. зависимость  $\Delta n(P)$ , где  $P$  - интенсивность возбуждения (Рис.4).

**Рис.4.**

ЛАХ кристаллов с  $x=0,27$  (кривая1) и  $x=0,29$  (кривая2) при  $T=80K$ . На вставке кривые релаксации сигнала фотопроводимости при различных уровнях возбуждения (уровень растет от кривой 1 к 3).

При низких уровнях возбуждения, когда  $\Delta t \ll \tau$ , она линейная, т.е.  $\Delta n \sim P$ , что характерно для этого режима возбуждения, когда  $\tau$  обусловлена только темпом генерации. При высоких уровнях возбуждения, когда  $\Delta t \gg \tau$ , ЛАХ становится линейной и обнаруживает тенденцию к насыщению. ЛАХ, подобные приведенным на Рис.4, должны наблюдаться при Оже - рекомбинации, если выполняются следующие условия [5]: возбуждение - поверхностное, глубина проникновения света  $d = 1/\alpha \ll L_p$  ( $\alpha$  - коэффициент поглощения,  $L_p$  - длина диффузии носителей заряда); скорость поверхностной рекомбинации мала, т.е. параметр  $L_s \approx P/s \gg \frac{1}{\alpha}$ . Легко проверить, что эти условия выполняются на опыте. Значение  $L_D$  в исследуемых кристаллах при  $\tau \approx (5 \div 8) \cdot 10^{-6} c$  лежит в пределах  $(2 \div 6) \cdot 10^{-3} cm$ ,  $\alpha = 10^4 cm^{-1}$  ( $d = 2 \cdot 10^{-4} cm$ ),  $L_s \approx 4 \cdot 10^{-4} cm$  при  $S = 2 \cdot 10^3 cm/c$ .

Отметим, что весьма слабый наклон ЛАХ вызван тем, что  $L_D$  при Оже - рекомбинации зависит от концентрации неравновесных носителей заряда, поскольку  $\tau \sim (\Delta n)^{-2}$  и  $L_D = \sqrt{D\tau} \sim \Delta n^{-1}$ , т.е. с ростом  $P$  толщина слоя, в котором происходит рекомбинация, уменьшается, и это ведет к дополнительному увеличению  $P$  и уменьшению  $\tau$  даже при выполнении условия  $\frac{1}{\alpha} < L_D$ .

Таким образом показано, что с увеличением уровня фотовозбуждения появление на приповерхностном слое стягивающего электрического поля приводит к изменению механизмов рекомбинации на поверхности.

1. Н.М.Бойных, А.В.Ванюков, *Изв.АН СССР, Металлы*, № 5 (1974) 14.
2. C.J.Crillham, R.A.Farrer, *J. Mater. Sci.*, **12** (1977) 1994.
3. Н.Н.Белый, Н.С.Барышев, И.М.Гарасова, Б.В.Понасенко, *ОМП*, N10 (1978) 13.
4. J.L.Shmit, E.L.Stelzer, *J.Appl.Phys.*, **40** (1969) 4865.
5. В.А.Зуев, А.В.Саченко, К.Б. Толпыго, "Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах". Москва, "Сов.радио", (1977) 256.
6. Г.Н.Галкин, "Междузонные процессы рекомбинации в полупроводниках при высоких уровнях возбуждения". Автореф.докт. дис. Москва, (1977) 37.
7. M.A.Kinch, M.J.Brou, A.Simmons, *J. Appl. Phys.*, **44** (1973) 1649.

**SƏTHİ HƏYƏJANLANMA ŞƏRAİTİNDƏ  
Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te KRİSTALLARININ FOTOKEÇİRİJİLİYİ**

**B.Ş.BARXALOV, Z.V.DƏMİROVA, Q.S.SEYİDLİ**

İşdə Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te (0,25 ≤ x ≤ 0,30) kristallarında alçaq və yüksək səthi həyəjanlanma şəraitində gedən rekombinasiya prosesləri tədqiq olunmuşdur. Bu materiallarda həyəjanlanma şəraitindən asılı olaraq spektral xarakteristikalar və rekombinasiya proseslərinin xüsusiyyətləri müzakirə olunmuşdur.

**PHOTOCONDUCTIVITY in Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te CRYSTALS  
under SURFACE EXCITATION**

**B.Sh.BARKHALOV, Z.V.DAMIROVA, G.S.SEYIDLI**

Recombination processes in Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te (0,25 ≤ x ≤ 0,30) crystals under low and high surface excitation have been studied. The peculiarities of spectral characteristics and recombination processes versus excitation conditions were discussed.

Редактор: З.Аждаров