

Особенности фотопроводимости $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.2 \div 0.3$) с тонкопленочным алюминиевым покрытием

© Э.Ю. Салаев, Э.К. Гусейнов, Атеш Тезер*, Н.Д. Исмаилов

Институт фотоэлектроники Академии наук Азербайджана,
370141 Баку, Азербайджан

* ТУБИТАК, Мармара Исследовательский Центр,
41470 Гебзе, Турция

(Получена 13 июня 1996 г. Принята к печати 25 октября 1996 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования фотопроводимости n - и p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.2 \div 0.3$) при нанесении на поверхность тонких пленок алюминия. Анализ полученных результатов проведен с учетом влияния приповерхностной области пространственного заряда и рекомбинации в ней. Из измерений фотопроводимости и барьерного фототока определены значения скорости поверхностной рекомбинации и поверхностной подвижности носителей заряда.

1. Введение

Неслабеющий интерес к монокристаллам $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ из-за их широкого применения в оптоэлектронике стимулирует всесторонние исследования их физических свойств, в том числе микроскопических. Изучение этих свойств и умение управлять параметрами поверхности необходимы для создания на основе этих кристаллов фотоприемников с высокими фотоэлектрическими параметрами. Поверхностно-управляемые фотоприемники по сравнению с обычными обладают повышенной фоточувствительностью, меньшим уровнем шумов и меньшей поверхностной рекомбинацией влияющими на характеристики приборов [1]. При поверхностном легировании $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ металлами Ag, Au из нейтральных растворов, являющемся одним из методов управления состоянием поверхности [2], наблюдается спад фоточувствительности в коротковолновой области спектра $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, связанный с повышением скорости поверхностной рекомбинации. В то же время при исследовании фотопроводимости $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при нанесении на поверхность монокристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ методом термического испарения в вакууме различных металлов было показано, что спад фоточувствительности в коротковолновой области спектра обусловлен не только увеличением поверхностной рекомбинации, но и в значительной степени уменьшением величины поверхностной подвижности носителей заряда. Среди ряда использованных металлов особо отличается алюминий, при нанесении которого на поверхность $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ может наблюдаться значительное увеличение фоточувствительности в коротковолновой области спектра.

В данной работе представлены результаты комплексного исследования фотопроводимости монокристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.2 \div 0.3$) при нанесении методом термического испарения в вакууме на химически травленную поверхность тонких пленок алюминия.

2. Методика эксперимента

В экспериментах использовались монокристаллы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.2 \div 0.3$) n -типа проводимости с $N_d = (1-0.13) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_n = (3-6) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и p -типа проводимости с $N_a = (3-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_p = (4.5-5.5) \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Поверхность пластин подвергалась химико-механической полировке с последующим травлением в 4%-м бромсодержащем травителе. Омические контакты на пластике создавались электрохимическим осаждением индия. Пленки алюминия толщиной от 10 до 300 Å осаждались термическим испарением в вакууме на установке с турбомолекулярной системой откачки. Толщина алюминиевой пленки контролировалась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 по толщине металлизации стеклянной пластины, располагаемой ближе к источнику испарения, чем образец. При напылении алюминия омические контакты на образце прикрывались специальной маской, обеспечивающей зазор шириной около 100 мкм между омическими контактами и алюминиевым затвором. Для контакта к полупрозрачному затвору по центру поперек образца напылялась серебряная полоска размерами $50 \times 300 \text{ мкм}^2$, к которой прижималась упругая стальная проволока. Величина поверхностного изгиба зон определялась по измерениям насыщенной фотоэдс [3]. Вольт-амперные характеристики измерялись на частоте 50 Гц, а вольт-фарадные характеристики, определяемые резонансным методом, измерялись на частотах 0.1–3 МГц. Остальные детали эксперимента описаны в работах [4,5]. Все измерения проводились при температуре 77 К.

3. Результаты и обсуждение

Эксперименты обнаруживают, что после осаждения пленок алюминия на поверхность n - и p - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ наблюдается существенное изменение спектральной харак-

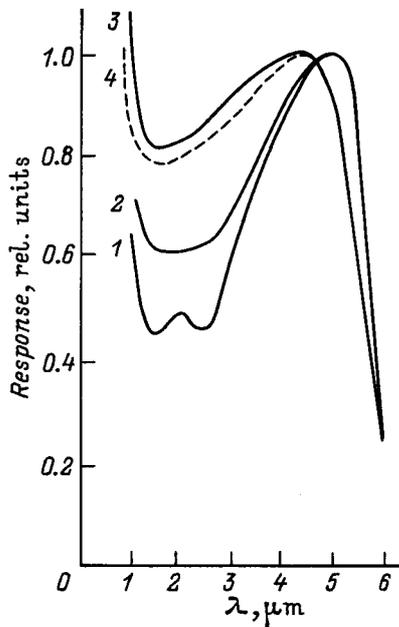


Рис. 1. Спектральная зависимость фотопроводимости $Cd_{0.28}Hg_{0.72}Te$ с $\tau_v = 1$ мкс при 80 К: 1 — со свободной поверхностью; 2–4 — с поверхностью, покрытой пленкой алюминия толщиной: 2 — 50 Å ($\tau_s = 2$ мкс); 3 — 150 Å ($\tau_s = 10$ мкс); 4 — 150 Å ($\tau_s = 5$ мкс) с подсветкой.

теристики и кинетики релаксации фотопроводимости. По сравнению с исходными данными для свободной поверхности $Cd_xHg_{1-x}Te$ (рис. 1, кривая 1) по мере роста толщины алюминиевой пленки (толщины 20 ÷ 80 Å) наблюдается незначительное увеличение поверхностного времени жизни τ_s и фоточувствительности в коротковолновой области спектра σ_s (рис. 1, кривая 2). Увеличение τ_s и σ_s продолжается до насыщения при толщинах пленки, при которых уже проявляется их заметная проводимость (толщины более 100 Å) (рис. 1, кривая 3). Наибольший эффект увеличения этих параметров — до 50 раз для составов $x = 0.28 \div 0.3$ — наблюдается для некомпенсированных и слабо компенсированных образцов, обладающих сравнительно низким значением объемного времени жизни носителей заряда $\tau_v = (0.3 \div 1.0) \cdot 10^{-6}$ с. Эффект значительно ослабевает по мере уменьшения ширины запрещенной зоны монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$. Кратность роста фоточувствительности в коротковолновой области спектра $K_\sigma = \sigma_s/\sigma_s^0$ меньше кратности увеличения поверхностного времени жизни $K_\tau = \tau_s/\tau_s^0$ (где σ_s^0 и τ_s^0 — исходные значения фотопроводимости и поверхностного времени жизни носителей заряда на свободной поверхности образцов; σ_s , τ_s — значения для поверхности с нанесенным слоем алюминия). Для сильно компенсированных образцов с $\tau_v > 10^{-5}$ с поверхностное время жизни τ_s практически не изменялось, тогда как фотопроводимость σ_s чаще всего уменьшалась в несколько раз (иногда в 20 раз) (рис. 2, кривая 2) по сравнению с исходным значением σ_s для свободной

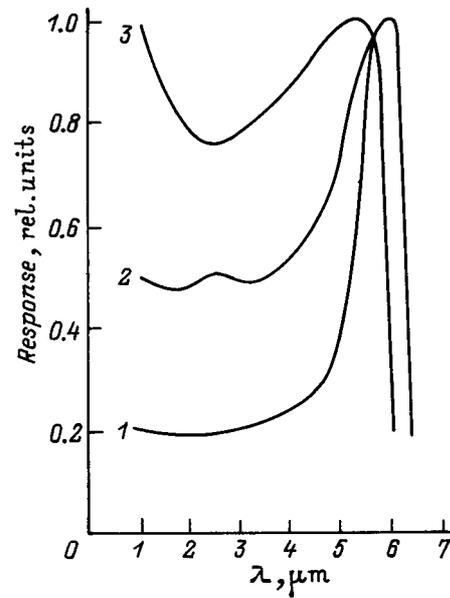


Рис. 2. Спектральная зависимость фотопроводимости $n-Cd_{0.27}Hg_{0.73}Te$ с $\tau_v = 12$ мкс при 80 К: 1 — со свободной поверхностью ($\tau_s = 12$ мкс); 2 — с поверхностью, покрытой пленкой алюминия толщиной 170 Å ($\tau_s = 12$ мкс); 3 — спектр барьерной фотоэда структуры $Al-Cd_{0.27}Hg_{0.73}Te$.

поверхности. С уменьшением E_g наблюдалось уменьшение τ_s по сравнению с τ_v . Для образцов с покрытием при малых уровнях фотовозбуждения кинетика спада фототока отвечает простому экспоненциальному закону (рис. 3, а, кривая 1); с увеличением уровня импульсной засветки появляется быстрая составляющая спада фототока с постоянной времени τ_s , приближающейся к τ_v . Дополнительная постоянная подсветка уменьшает τ_s (рис. 3, а, кривая 3), но распределение фоточувствительности в коротковолновой области спектра понижается в значительно меньшей степени (рис. 1, кривая 4).

Из характера вольт-амперных зависимостей структур $Al-Cd_xHg_{1-x}Te$ следует, что диэлектрический зазор между металлом и полупроводником даже при приложении напряжения смещения до 1 В является туннельно-непрозрачным для носителей заряда. Это позволяет для определения поверхностных параметров использовать вольт-емкостной метод, применяемый для анализа структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) с толстым диэлектриком. По оценке, величина плотности поверхностных состояний составила $N_{ss} \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Анализ этих характеристик для структур на основе n - и $p-Cd_xHg_{1-x}Te$ указывает на истощающий изгиб зон при $U = 0$. На это же указывает одинаковая в среднем величина фотоэда насыщения ($\varphi_s \leq 60$ мВ для состава $x = 0.28$ при 77 К) при наличии теплового фона, воздействующего на эти структуры. Ток генерации фонового излучения может понижать начальную высоту барьера φ_s на 30–50 мВ, так что можно полагать, что

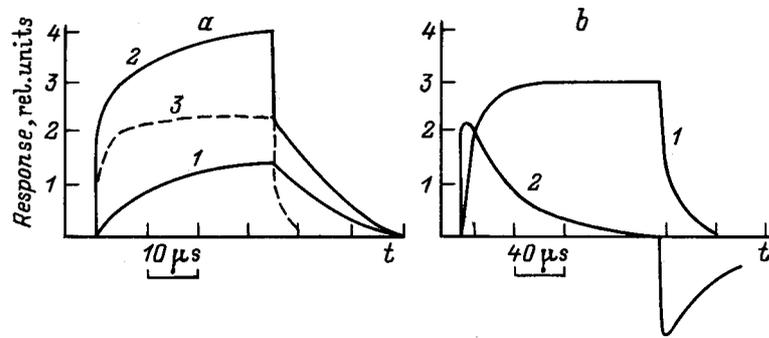


Рис. 3. Кинетика релаксации фотопроводимости. *a.* 1, 2 — при малом и большом уровнях импульсной засветки, 3 — при наличии постоянной подсветки и барьерного фототока. *b.* 1 — при $R_0 = 1$ МОм, 2 — при $R_0 = 0.3$ кОм для структуры Al–Cd_{0.28}Hg_{0.72}Te.

$\varphi_s \approx 0.1$ В. Однако использование данных значений φ_s и N_{ss} в формировании барьера по модели Бардина не дает удовлетворительного объяснения результатам, получаемым для *n*- и *p*-Cd_{*x*}Hg_{1-*x*}Te одинакового состава. Для структур металл-Cd_{*x*}Hg_{1-*x*}Te необходимо учитывать нарушение стехиометрии в поверхностном слое при нанесении металла из-за слабо связанных атомов ртути, вакансии которых создают акцепторные уровни в запрещенной зоне [6]. Поэтому факторы, определяющие высоту барьера на *n*- и *p*-Cd_{*x*}Hg_{1-*x*}Te, могут различаться. И, по-видимому, слабое изменение изгиба поверхностных зон на начальной стадии нанесения пленок алюминия связано с формированием переходного слоя и перестройкой системы поверхностных состояний. Проблема формирования барьера требует особого изучения, и поэтому далее мы рассматриваем только результаты, полученные для слоев алюминия толщиной 100–300 Å.

Анализ наблюдаемых особенностей фотопроводимости проведем с учетом фотопроводимости приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) и рекомбинации в ней. Как было показано в [5], при истощении фотопроводимость Cd_{*x*}Hg_{1-*x*}Te ($x = 0.2 \div 0.3$) локализуется в приповерхностной ОПЗ и аппроксимируется выражением

$$\sigma(\alpha) = eI\eta(1 + b) \left\{ \mu_{ps}\tau_s [1 - \exp(-\alpha l)/(1 + \alpha l)] + [\mu_{pv}\tau_v \exp(-\alpha l)/(1 + \alpha L_d)] \right\}, \quad (1)$$

где I — интенсивность генерации пар электрон–дырка; μ_v, μ_s — объемная и поверхностная подвижности носителей заряда; $b = \mu_{nv}/\mu_{pv} \approx \mu_{ns}/\mu_{ps}$; α — коэффициент поглощения; l — ширина ОПЗ; L_d — диффузионная длина для неосновных носителей заряда; η — квантовая эффективность внутреннего фотоэффекта. В области сильного поглощения, когда имеем

$$\sigma_s = eI\eta(1 + b) \mu_s \tau_s, \quad (2)$$

$$\tau_s^{-1} = \tau_v^{-1} \left[(1 + L_-^T)/(1 + L_-) \right] + S/L_d(1 + L_-), \quad (3)$$

где

$$L_- = L_d^{-1} \int_0^l \exp[-\varphi(x)] dx;$$

$$L_-^T = L_d^{-1} \int_0^l \exp[-\varphi(x)] \tau_p \tau^{-1}(x) dx$$

при истощении

$$L_- = L_e L_d^{-1} \int_0^l \exp(-\varphi_s)/\sqrt{-\varphi_s - 1}. \quad (4)$$

Если после нанесения металла на поверхность образца поверхностный изгиб зон увеличивается, то, как следует из (3), при малых скоростях поверхностной рекомбинации $S < L_d(1 + L_-)\tau_v^{-1}$ и рекомбинации в ОПЗ, $L_-^T < L_-$, поверхностное время жизни носителей заряда τ_s возрастает. В этом случае, как и наблюдается для слабо компенсированных образцов Cd_{*x*}Hg_{1-*x*}Te, фоточувствительность в коротковолновой области спектра растет. Для образцов с высокой степенью компенсации концентрации носителей заряда и сравнительно большими значениями τ_v , из-за ограничения τ_s скоростью поверхностной рекомбинации и рекомбинации в ОПЗ, трудно реализовать условие $\tau_s > \tau_v$. Вследствие этого, для этих образцов спад фоточувствительности в коротковолновой области спектра после нанесения пленки, как следует из (2), может быть обусловлен меньшими значениями поверхностной подвижности носителей заряда μ_s по сравнению с объемной μ_v . В условии локализации фотопроводимости в ОПЗ при $\mu_s = \mu_v$ и $\tau_s = \tau_v$ спектральная зависимость $\sigma(\alpha)$ тождественна спектральной зависимости конденсаторной фотоэдс $U_\sigma(\alpha)$ [7]. Поэтому понижение $\sigma(\alpha)$ относительно кривой $U_\sigma(\alpha)$ в коротковолновой области спектра пропорционально отношению μ_v/μ_s . Из сравнения спектров $U_\sigma(\alpha)$ и $\sigma(\alpha)$ (рис. 2, кривые 2, 3), принимая для *n*-Cd_{*x*}Hg_{1-*x*}Te значение $\mu_v = 6 \cdot 10^4$ см²/В·с, была определена поверхностная подвижность носителей заряда $\mu_s = 2 \cdot 10^4$ см²/В·с.

При увеличении уровня импульсной засветки или присутствия постоянной подсветки поверхностные зоны спрямляются, что ведет к появлению быстрой компоненты спада фототока с τ_s , приближающимся к τ_v . При этом во столько же раз должна уменьшаться фоточувствительность в коротковолновой области спектра. Однако по мере спрямления зон условие локализации фотопроводимости в ОПЗ нарушается и вклад поверхности в общую фотопроводимость уменьшается, при этом μ_s приближается к μ_v , чем и объясняется слабое уменьшение $\sigma(\alpha)$ при подсветке. Таким образом, наблюдаемый спад σ_s после нанесения алюминиевой пленки на образец обусловлен не скоростью поверхностной рекомбинации, а меньшими значениями μ_s по сравнению с μ_v .

Для определения величины S удобно воспользоваться кривыми релаксации фототока в поверхностно-барьерной структуре $Al-Cd_xHg_{1-x}Te$ (рис. 3, а). В режиме холостого хода $R_0 > R_w$ (здесь R_0 — сопротивление нагрузки, R_w — сопротивление ОПЗ) постоянная времени нарастания $\tau_1 = R_w \cdot C_w$ (где C_w — емкость ОПЗ). В режиме короткого замыкания $R_0 \ll R_w$ фототок нарастает с постоянной времени $\tau_2 = R_0 \cdot R_w$ и, достигнув определенного значения, спадает с постоянной времени τ_r , связанной с S выражением [8]

$$\tau_r = L_e(-\varphi_s^L) \left[(S_{pe} + S^*) \sqrt{-\varphi_s^L} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где S_{pe} — скорость эмиссии носителей заряда через диэлектрический зазор. В нашем случае $S_{pe} \ll S^*$. Определив величины $\varphi_s^L = 7$, $\tau_r = 4 \cdot 10^{-5}$ с, $L_e = 6 \cdot 10^{-5}$ см, из выражения (5) находим $S^* = 500$ см/с, так что, действительно, $S^* \ll L_d \tau_v^{-1} (1 + L_-) = 6 \cdot 10^4$ см/с.

Принимая во внимание (4) и (5), выражение (3) можно записать в виде $\tau_s^{-1} = \tau_v^{-1} [(1 + L_-^+)/(1 + L_-)] + \tau_r^{-1}$, из которого следует, что τ_s может возрастать лишь при условии, когда второе слагаемое намного меньше первого, и при уменьшении рекомбинации в ОПЗ при увеличении поверхностного изгиба зон ($(1 + L_-^+) \rightarrow 1$). Такой вывод справедлив, если пренебречь туннельными явлениями в ОПЗ, что и принималось в работе [8].

Однако для $Cd_xHg_{1-x}Te$ узкозонных составов эти эффекты могут преобладать при низких температурах. На рис. 4 приведены зависимости фототока короткого замыкания от напряжения смещения в структурах. Можно видеть, что при обратном напряжении смещения фототок в структуре на основе сильно компенсированного образца с $N_d \simeq 10^{13}$ см $^{-3}$ уменьшается. Подобный спад фототока наблюдался в МДП структуре на основе $p-Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ с $N_a = 3 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ в работе [9], и объяснялось это туннелированием носителей заряда через примесные центры в ОПЗ. Как показывает анализ, для концентраций $N_d \simeq 10^{13}$ см $^{-3}$ этот механизм неприемлем. К тому же для образца $p-Cd_xHg_{1-x}Te$ с $N_a = 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ в пределах указанных на рис. 4 напряжений смещения спад фототока не наблюдается.

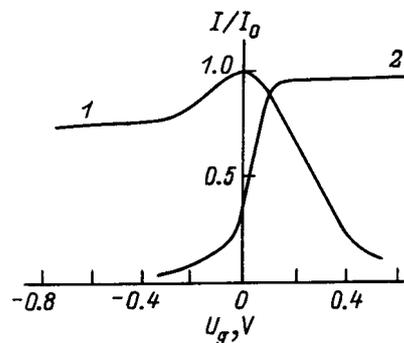


Рис. 4. Зависимость фототока короткого замыкания от приложенного напряжения на затворе в структурах: 1 — $Al-n-Cd_{0.27}Hg_{0.73}Te$ с $N_d = 10^{13}$ см $^{-3}$, 2 — $Al-p-Cd_{0.3}Hg_{0.7}Te$ с $N_a = 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$.

Наблюдаемые особенности качественно хорошо объясняются флуктуационной теорией для барьерных структур [10], в соответствии с которой в сильно компенсированных материалах туннелирование носителей заряда в ОПЗ может быть облегчено из-за образования проколов — флуктуационных скоплений ионизированных доноров и акцепторов, приводящих к локальному сужению барьера. Туннельные токи ограничивают увеличение высоты барьера и поверхностного времени жизни. Этот фактор усиливается с уменьшением ширины запрещенной зоны материала. Так, для $Cd_xHg_{1-x}Te$ состава $x = 0.2$ ($E_g \simeq 0.1$ эВ) с $\tau_v = 3 \cdot 10^{-6}$ с после нанесения слоя алюминия наблюдается даже уменьшение поверхностного времени жизни до величины $5 \cdot 10^{-7}$ с. Этим и объясняется, на наш взгляд, неизменность или уменьшение τ_s для сильно компенсированных образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x = 0.2 \div 0.3$) после нанесения на поверхность слоя алюминия.

4. Заключение

Наблюдаемые особенности фотопроводимости для n - и p - $Cd_xHg_{1-x}Te$ с тонким алюминиевым покрытием хорошо интерпретируются в рамках модели, учитывающей фотопроводимость в приповерхностной ОПЗ и рекомбинации в ней. Для некомпенсированных и слабо компенсированных образцов с $\tau_v = (0.3 \div 1.0) \cdot 10^{-6}$ с после нанесения тонкого слоя алюминия изгиб поверхностных зон увеличивается, что, вследствие малой скорости поверхностной рекомбинации ($S \sim 100$ см/с), ведет к увеличению τ_s и повышению фоточувствительности в коротковолновой области спектра. Для сильно компенсированных образцов с $\tau_v > 10^{-5}$ с увеличения τ_s не наблюдается, что связано с существенными туннельными и туннельно-рекомбинационными процессами в ОПЗ. В условиях локализации фотопроводимости в приповерхностной ОПЗ из комбинированных измерений фотопроводимости и барьерной фотодс для обоих типов образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$ найдены значения скорости

поверхностной рекомбинации и поверхностной подвижности носителей заряда. Показано, что меньшие значения поверхностной подвижности по сравнению с объемной могут приводить к сильному (до 20 раз) понижению фоточувствительности в коротковолновой области спектра.

Список литературы

- [1] Н.Р. Ангин, В.В. Антонов, А.В. Войцеховский, М.Р. Пашковский. Зарубежн. электрон. техн., **5**, 49 (1984).
- [2] Е.П. Мацасс, А.И. Власенко, Е.А. Сальков, О.В. Снитко, А.В. Любченко, УФЖ, **26**, 670 (1981).
- [3] А.Я. Вуль, К.В. Санин, В.И. Федоров, Р.Ю. Хансеваров, Ю.В. Шмарцев. Письма ЖТФ, **5**, 932 (1979).
- [4] E.K. Guseinov, N.D. Ismailov. Turkish J. Phys., **18**, 660 (1994).
- [5] Э.К. Гусейнов, Н.Д. Исмаилов. ФТП, **29**, 1790 (1995).
- [6] D.J. Peterman, D.J. Friedman, Appl. Phys. Lett., **42**, 886 (1980).
- [7] В.А. Зуев, А.В. Саченко, К.В. Толпыго. *Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах* (М., Радио и связь, 1977).
- [8] А.Я. Вуль, К.В. Санин, А.Т. Дидейкин, Ю.С. Зинченко, А.В. Саченко. ФТП, **17**, 1471 (1983).
- [9] В.В. Антонов, А.В. Войцеховский, А.В. Криулин, Д.А. Марцулов, М.С. Никитин, А.Ю. Никофоров, А.С. Петров, А.А. Умеренко. Микроэлектроника, **16**, 407 (1987).
- [10] М.Е. Райх, И.М. Рузин. ФТП, **21**, 456 (1987).

Редактор В.В.Чалдышев

Peculiarities of photoconductivity of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.2-0.3$) single crystals with thin aluminium film coatings

E.Yu. Salayev, E.K. Guseinov, Atesh Tezer*,
N.D. Ismailov

Institute of Photoelectronics
of Azerbaijan Academy of Sciences,
370141 Baku, Azerbaijan

* TUBITAK, Marmara Research Center,
41470 Gebze, Kocaeli-Turkey

Abstract Results of an experimental study of photoconductivity of p - and n - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.2-0.3$) under surface coating with the thin aluminium film are presented. Analysis of the results has been carried out with taking into account the influence of the subsurface range of a space charge on the photoelectric properties of $\text{Al}-\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Due to measurements of the photoconductivity and barrier photocurrent, the values of the surface recombination rate and the surface mobility of the charge carriers have been determined.