

изменению области спектральной чувствительности длинных варизонных фотодиодов, что позволяет формировать спектральные характеристики с заданными полупириной и положением максимума.

Л и т е р а т у р а

- [1] Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Смоляр А. Н. Фоточувствительность длинных диодов с варизонной базой в условиях двойной инжекции. — ФТП, 1984, т. 18, в. 8, с. 1480—1482.
- [2] Морозов Б. В., Болховитянов Ю. Б., Габараев Р. С., Кравченко А. Ф., Юдаев В. И. О форме края поглощения варизонных структур полупроводниковых соединений АШВ^v. — ФТП, 1980, т. 14, в. 8, с. 1486—1491.
- [3] Коваленко В. Ф., Пека Г. П., Шепель Л. Г. Фотолюминесцентные методы определения параметров варизонных полупроводников. — ФТП, 1980, т. 14, в. 7, с. 1350—1354.

Киевский государственный
университет им. Т. Г. Шевченко

Получено 17.07.1986
Принято к печати 2.06.1987

ФТП, том 22, вып. 1, 1988

ОСОБЕННОСТИ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛАХ n -TlSbSe₂

Гицу Д. В., Гринчешен И. Н., Красовский В. Ф., Попович Н. С.

В последнее время значительно возрос научный и практический интерес к слоистым полупроводникам, в том числе к кристаллам соединений TlSbSe₂ и TlSbS₂ [1-4]. На их основе получены широкополосные фотодиоды с высоким и постоянным значением квантовой эффективности в широком спектральном диапазоне [5].

Далее приводятся результаты исследований проводимости и фотопроводимости при различных температурах и интенсивностях возбуждения, температурные зависимости фототока, спектры термостимулированной проводимости (ТСП), а также кинетика фотопроводимости с целью определения реальной схемы рекомбинационных переходов в кристаллах этого типа.

На основе полученных результатов построена трехуровневая рекомбинационная модель для TlSbSe₂, в которой, кроме «быстрых» рекомбинационных центров, присутствуют «медленные» очувствляющие центры рекомбинации и уровни прилипания для основных носителей заряда (электронов).

Для измерений из монокристаллического слитка, полученного методом зонной плавки, выкалывались образцы размером 5×3×0.3 мм, на свежие сколы которых наносились индиевые контакты. Концентрация носителей заряда в образцах TlSbSe₂ при комнатной температуре $n \approx 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³, а подвижность $\mu \approx 50$ см²/В·с.

Исходные кристаллы TlSbSe₂ имели при 300 К удельную электропроводность $\sigma_T = 6 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹·см⁻¹, отношение σ_ϕ / σ_T (σ_ϕ — проводимость образцов при освещении белым светом интенсивностью $L = 10^3$ Лк) составляет 3÷5. При понижении температуры до 78 К $\sigma_T \approx 10^{-8}$ Ом⁻¹·см⁻¹, отношение $\sigma_\phi / \sigma_T = 10^6$. На температурной зависимости электропроводности (рис. 1, б) наблюдается наклон с энергией активации $\Delta E_i = 0.32$ эВ. При более высоких температурах начинается собственная проводимость.

В спектральном распределении фотопроводимости (ФП) кристаллов TlSbSe₂ при 78 К наблюдаются два максимума фоточувствительности, которые соответствуют собственной и примесной ФП (рис. 1, а). Ширина запрещенной зоны E_g кристаллов TlSbSe₂, определенная по спектральной зависимости ФП, равна 0.82 эВ. По длинноволновой границе $I_\phi(h\nu)$ было определено энергетическое расстояние от потолка валентной зоны до центров, ответственных за примесную фотопроводимость, вычисленное как $E_g - h\nu_{rp} \equiv E_{vr} = (0.35 \pm 0.05)$ эВ.

На всех исследованных образцах TlSbSe_2 наблюдается один пик ТСП при $T \approx 90$ К. Энергетическое положение уровня прилипания (УП) E_t определялось по величинам тока и температуре максимума ТСП [6]. Применимость метода обусловлена линейностью ЛАХ при токах ТСП, постоянством I_T и времени жизни электронов τ_{rn} на r -центрах в области опустошения уровней прилипания. Глубина залегания E_t УП для образцов TlSbSe_2 $E_t \approx (0.12 \pm 0.02)$ эВ. Концентрация УП измерялась по площади под кривой ТСП с использованием значения τ_{rn} , непосредственно измеренного по кинетике ФП, $N_t \approx 10^{15}$ см $^{-3}$. Величина N_t оценивалась и по точке перехода ЛАХ от $\alpha = 1.0$ к $\alpha = 0.5$. Наблюдалось хорошее количественное совпадение.

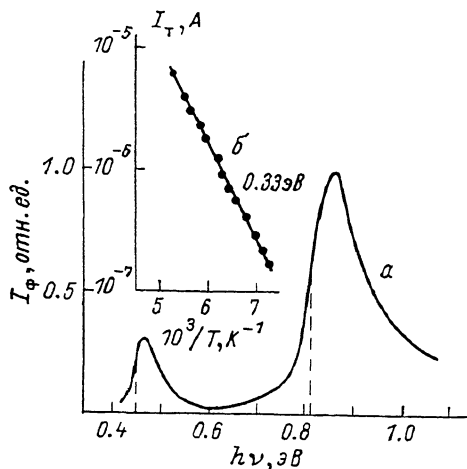


Рис. 1. Спектральное распределение фотопроводимости при 78 К (а) и температурная зависимость темновой проводимости (б) кристаллов $n\text{-TlSbSe}_2$.

Температурная зависимость ФП (с учетом температурной зависимости подвижности [3]) и ЛАХ кристаллов TlSbSe_2 приведены на рис. 2, А. При малых интенсивностях возбуждения на температурной зависимости ФП наблюдаются два участка — слабая активация фототока (до 80 К) и температурное гашение фототока (ТГФ). В области ТГФ ЛАХ сверхлинейны (рис. 2, Б). Эти особен-

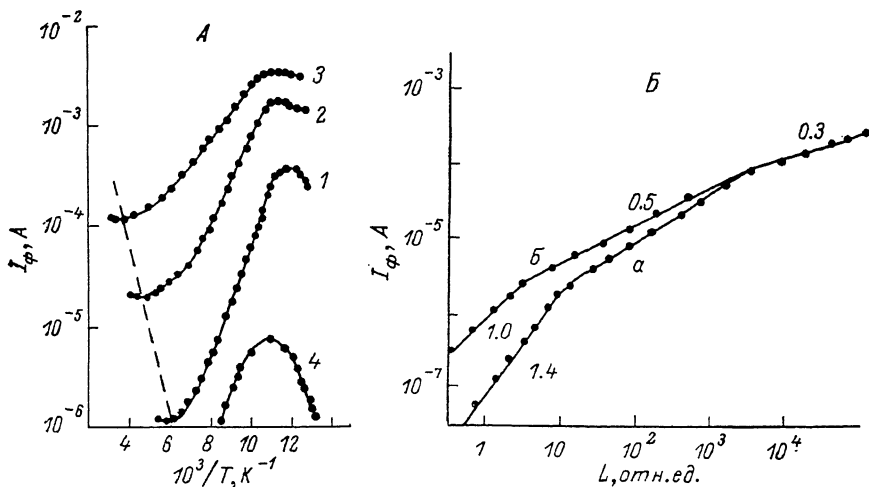


Рис. 2.

А — температурная зависимость T_Φ при различных уровнях освещения (1—3) и спектр ТСП (4) кристаллов $n\text{-TlSbSe}_2$; Б — ЛАХ кристаллов TlSbSe_2 при 110 К (а) (область гашения I_Φ) и при 78 К (б).

ности связаны с существованием в кристаллах TlSbSe_2 двух типов рекомбинационных центров [7] — очувствляющих r -центров медленной рекомбинации и s -центров быстрой рекомбинации. ТГФ вызвано перезарядкой r - и s -центров в результате возбуждения электронов с r -центров и их захвата на s -центры, обуславливающие низкую фоточувствительность. В исследуемых кристаллах при 78 К реализуется случай сильной фоточувствительности $K_r \approx 10^3$ ($\gg 1$). Концентрация r -центров, определяющих фоточувствительность TlSbSe_2 , найденная по участку насыщения ЛАХ, $N_r \sim (1 \div 3) \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$.

Сечение захвата r -центром электронов (S_{nr}), определенное методом «светового удара» [8], оказалось равным $2 \cdot 10^{-20}$ см². Из соотношения для кратности ТГФ [$K_r = G_r (S_{ns}/S_{nr})$] оценено сечение захвата электронов s -центром, при этом $S_{ns} = 10^{-17}$ см². При высоких температурах, соответствующих концу ТГФ ($T \approx 180$ К), УП уже слабо влияют на рекомбинацию в кристаллах TlSbSe_2 , и фототок в высокотемпературных точках перегиба зависимости $I_\phi(T)$ должен описываться уравнением [6]

$$I_\phi = S_0 e^{\mu_n} F N_c \frac{g_s S_{pr}}{g_r S_{ns}} \exp\left(-\frac{E_{vr}^T}{kT}\right), \quad (1)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения образца, e — заряд электрона, F — напряженность электрического поля, N_c — эффективность плотности состояний в s -зоне, $g_s = 1 - g_r$ — доля рекомбинационного потока через s -центры, S_{nr} — сечение захвата электронов r -центром. Экспериментальная зависимость $\lg I_\phi = f(10^3/T)$, соответствующая уравнению (1), приведена на рис. 2 (штриховая кривая). Из ее наклона определена «термическая» глубина залегаания r -центров $E_{vr}^T = 0.32$ эВ, которая оказалась близкой к величине E_{vr}^0 . Из зависимости (1) определено также значение $S_{pr} = (3 \div 5) \cdot 10^{-17}$ см². Видно, что r -центры в TlSbSe_2 обладают значительной асимметрией сечений захвата основных и неосновных носителей заряда $S_{pr}/S_{nr} \approx 10^3$.

Таким образом, наличие температурного гашения фототока, сверхлинейность ЛАХ в области ТГФ, а также кинетика ФП свидетельствуют о том, что фотопроводимость кристаллов n - TlSbSe_2 определяется наличием по крайней мере нескольких типов центров рекомбинации (r - и s -центры) и t -уровнями прилипания. Фоточувствительность кристаллов n - TlSbSe_2 определяется степенью заполнения (компенсации) электронами акцепторного уровня, который лежит выше потолка валентной зоны на 0.35 эВ. Степень заполнения акцепторных центров задается уровнем прилипания, концентрация которого регулируется временем отжига кристаллов n - TlSbSe_2 в атмосфере, обогащенной халькогеном.

Хотя приведенный выше анализ трехуровневой модели был разработан авторами работы [9] для высокоомных кристаллов, эта модель удовлетворительно описывает рекомбинационные процессы в специально не легированных кристаллах n - TlSbSe_2 .

Л и т е р а т у р а

- [1] Малик А. И., Ковалюк З. Д. Эффективный фотоприемник ближнего УФ излучения на основе гетероперехода $\text{SnO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ -GaSe. — Письма ЖТФ, 1981, т. 7, в. 9, с. 533—535.
- [2] Rouquette P., Allegre J., Gil B., Camassel J., Mathieu H. — Phys. Rev. B, 1986, v. 33, N 6, p. 4114—4118.
- [3] Gitsu D. V., Grincheshen I. N., Popovich N. S. — Phys. St. Sol. (a), 1983, v. 76, N 1, p. k5—k7.
- [4] Grincheshen I. N., Popovich N. S., Shtanov A. A. — Phys. St. Sol. (a), 1984, v. 85, N 1, p. k85—k88.
- [5] Гринчешен И. Н., Попович Н. С. Особенности фотоэлектрических свойств барьерных структур на основе кристаллов TlSbSe_2 . — ФТП, 1985, т. 19, в. 2, с. 230—233.
- [6] Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М., 1962. 560 с.
- [7] Роуз А. Основы теории фотопроводимости. М., 1966. 192 с.
- [8] Сальков Е. А., Шейнман М. К. Метод определения рекомбинационных уровней в моноплярных фотопроводниках. — ФТТ, 1963, т. 5, в. 2, с. 397—399.
- [9] Лашкарев В. Е., Любченко А. В., Шейнман М. К. Неравновесные процессы в фотопроводниках. Киев, 1981. 264 с.

Институт прикладной физики
АН МССР
Кишинев

Получено 22.09.1986
Принято к печати 2.06.1987