

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ В СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛАХ InSe

Брандт Н. Б., Ковалюк З. Д., Кульбачинский В. А.

Исследована кинетика фотопроводимости монокристаллов β -политипа InSe при температурах 4.2—300 К. Обнаружено явление остаточной фотопроводимости с порогом $T_k \approx 50$ К.

При исследовании спектров излучательной рекомбинации у слоистых полупроводников группы $A^{III}B^{VI}$ было обнаружено, что при больших плотностях оптического возбуждения (до 3 МВт/см²) при температурах ниже некоторой критической образуется электронно-дырочная жидкость [1]. При существенно меньших плотностях оптического возбуждения (≈ 0.1 Вт/см²) спектр излучательной рекомбинации InSe характеризуется линиями эмиссии, обусловленными излучательным распадом свободных экситонов [1, 2]. Край поглощения в селениде индия формируется в результате оптических переходов между невырожденными состояниями валентной зоны и зоны проводимости. В центре гексагональной зоны Бриллюэна (точка Γ) имеют место прямые оптические переходы ($\Gamma_4^- \rightarrow \Gamma_3^+$), а не прямые переходы осуществляются между потолком валентной зоны и дном зоны проводимости в точке M ($\Gamma_4^- \rightarrow M_3^+$). Ширина запрещенной зоны InSe $\epsilon_g^I = 1.35$ эВ при 4.2 К. В работе [1] доказывается прямолинейность спектра InSe, однако, согласно экспериментальным работам [3-5], ϵ_g^I больше ширины не прямой запрещенной зоны ϵ_g^N на величину порядка 10 мэВ. Теоретические данные, в принципе, подтверждают этот вывод, хотя достичь такой точности при расчетах в настоящее время не представляется возможным.

Таким образом, оптическое поглощение и люминесценция кристаллов InSe достаточно хорошо изучены. Представляло интерес исследовать фотопроводимость этого материала в области собственного поглощения при гелиевых температурах, особенно при учете существования двумерных электронов при 4.2 К [6-8].

В работе исследовались магнитосопротивление при гелиевых температурах и кинетика фотопроводимости у монокристаллов β -политипа InSe, выращенных методом Бриджмена. Характерные размеры образцов $10 \times 1.5 \times 0.5$ мм, токовые и потенциальные контакты изготавливались из индия. Магнитное поле H направлялось перпендикулярно слоям, ток — перпендикулярно H вдоль слоев. Все исследованные образцы были n -типа при температурах от комнатных до гелиевых и обладали темновым сопротивлением $\rho = 300 \div 3000$ Ом·см при 4.2 К. Подсветка осуществлялась гелий-неоновым лазером с длиной волны $\lambda = 0.6328$ мкм мощностью 0.5 мВт.

При температурах от 300 до ≈ 30 К магнитосопротивление исследованных образцов положительно. При $T \leq 30$ К магнитосопротивление становится отрицательным, причем в слабых полях квадратично зависит от величины магнитного поля, с увеличением которого зависимость переходит в логарифмическую. На рис. 1 приведены эти данные для одного из высокоомных образцов. При понижении температуры до $T < 2$ К магнитосопротивление в больших полях отклоняется в положительную область и проявляются отчетливые осцилляции Шубникова—де-Гааза (ШГ), соответствующие двумерным электронам с концентрацией $2 \cdot 10^{11}$ см⁻² [при отклонении магнитного поля от оси C на угол θ , т. е. от направления, перпендикулярного слоям, частота осцилляций изме-

няется по закону $f(\theta) = f(0) \cos^{-1} \theta$]. Совокупность представленных экспериментальных данных указывает на то, что при $T \leq 30$ К трехмерные зонные носители вымерзают и проводимость кристаллов определяется двумерными электронами, у которых наблюдается явление слабой двумерной локализации [9]. Двумерные носители возникают, видимо, из-за захвата электронов на двумерных дефектах в базисной плоскости, характерных для слоистых кристаллов типа InSe [6].

Равномерное освещение поверхности скола образца приводило к уменьшению величины сопротивления. Магнитосопротивление, измеренное при постоянном освещении образца, в магнитном поле $H \geq 10$ кЭ становилось положительным (рис. 2). Выключение света только частично восстанавливало отрица-

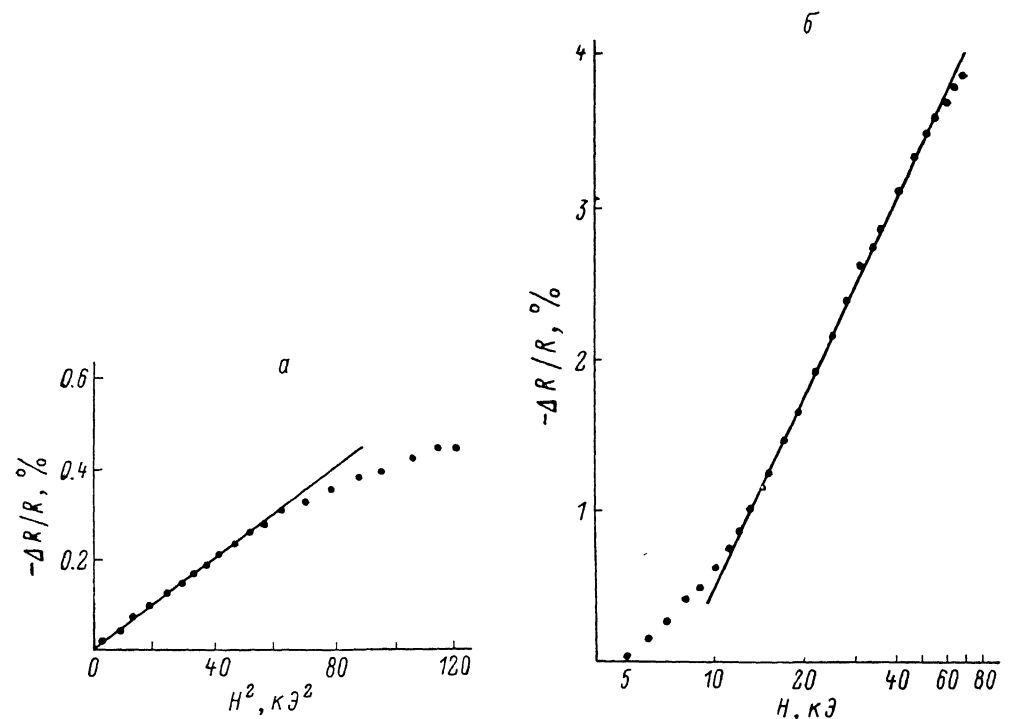


Рис. 1. Относительное изменение сопротивления высокоомного образца InSe при 4.2 К в зависимости от квадрата (а) и логарифма (б) величины магнитного поля.

тельное магнитосопротивление, которое возвращалось к первоначальному лишь при выдержке образцов при $T \geq 50$ К. Период осцилляций ШГ, отчетливо наблюдающихся при $T < 2$ К, не зависел от освещения образца.

Кинетика нарастания и спада фотопроводимости для одного из образцов представлена на рис. 3. При этом на источнике питания фиксировалось напряжение в несколько вольт, а изменение по времени сигнала фотопроводимости было пропорционально изменению тока в цепи на сопротивлении нагрузки $R=1$ кОм (R много меньше сопротивления образца).

Как видно из рис. 3, при 300 К, $t > 500$ с происходит насыщение фотопроводимости, и сопротивление не изменяется. Кинетика релаксации фотопроводимости имеет неэкспоненциальный характер. При аппроксимации функцией $A^{-t/\tau}$ величина τ оказывается равной 10^3 – 10^4 с.

При 4.2 К после начального быстрого роста фотопроводимость растет почти линейно, а при выключении подсветки наблюдается явление остаточной фотопроводимости с характерными временами релаксации $\tau > 10^6$ с. Остаточная фотопроводимость гасится при нагревании образца до $T \geq 50$ К.

Прежде всего отметим, что возбуждается близкая к поверхности область кристалла в связи с большим коэффициентом поглощения кристаллов InSe. При этом сопротивление приповерхностного слоя уменьшается за счет появле-

ния носителей в зоне. Поверхностный слой шунтирует объем образца. Поскольку магнитосопротивление зонных носителей тока положительно (напомним, что при $T > 30$ К, когда зонные носители еще не вымерзли, магнитосопротивление положительно), то в эксперименте наблюдается переход от отрицательного магнитосопротивления, связанного с локализацией носителей,

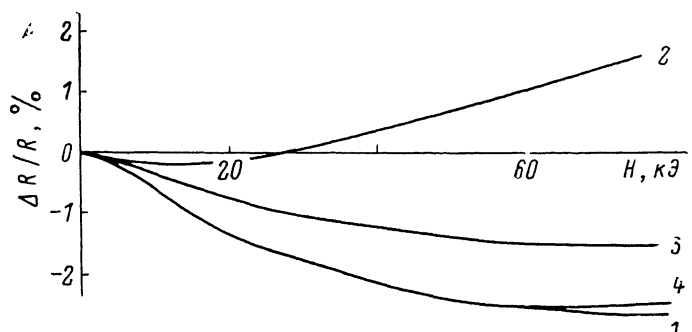


Рис. 2. Зависимость сопротивления образца от магнитного поля при 4.2 К до (1), во время (2) и после (3, 4) освещения, после освещения и выдержки в темноте при $T > 50$ К (4).

к положительному при включении освещения (рис. 2). За счет проводимости в направлении, перпендикулярном слою, неравновесные носители диффундируют в глубь кристалла, и при подсветке сопротивление образцов уменьшается со временем. Однако если при 300 К процесс уравнивается рекомбинацией, то при 4.2 К фотопроводимость не насыщается даже при достаточно больших

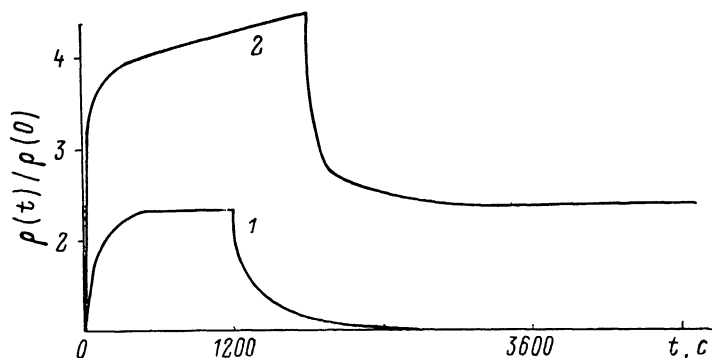


Рис. 3. Кинетика нарастания и спада сигнала фотопроводимости при 300 (1) и 4.2 К (2).

временах выдержки (рис. 3). Остаточная фотопроводимость в InSe связана с большими временами жизни неравновесных носителей и низкими скоростями их рекомбинации. Остаточную фотопроводимость можно объяснить пространственным разделением неравновесных носителей заряда внутренними потенциальными барьерами. Неэкспоненциальный характер релаксации может быть связан с изменением величины барьера в процессе релаксации.

Предлагается возможным также объяснить остаточную фотопроводимость особенностями зонной структуры InSe — наличием двух минимумов в зоне проводимости в точках Γ и M . Часть носителей в экстремуме M после выключения возбуждения релаксирует лишь при таких температурах, когда энергия kT сравнивается с величиной потенциального барьера, разделяющего эти экстремумы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Беленький Г. Л., Годжаев М. О., Салаев Э. Ю., Алиев Е. Т. — ЖЭТФ, 1986, т. 91, в. 5 (11), с. 1886—1896.
 [2] Гнатенко Ю. П., Жирко Ю. И., Ковалюк З. Д., Каминский В. М. — ФТТ, 1986, т. 28, в. 12, с. 3591—3594.

- [3] Andriyashik M. V., Saknovskii M. Yu., Timofeev V. B., Yakimova A. S. — Phys. St. Sol., 1968, v. 28, N 2, p. 277—282.
- [4] Бакуменко В. Л., Ковалюк З. Д., Курбатов Л. Н., Чишко В. Ф. — ФТП, 1986, т. 10, в. 6, с. 1045—1051.
- [5] Бакуменко В. А., Ковалюк З. Д., Курбатов Л. Н., Чишко В. Ф. — ФТП, 1976, т. 10, в. 7, с. 1246—1250; Robertson J. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1979, v. 12, N 12, p. 4777—4789; Depeursigne Y., Dong E., Girlanda R., Baldereschi A., Marchke K. — Sol. St. Commun., 1978, v. 27, N 8, p. 1449—1453.
- [6] Kress-Rogers E., Hopper G. F., Nicholas R. J., Hayes W., Portal J. C., Chevy A. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1983, v. 16, N 12, p. 4285—4295.
- [7] Беленький Г. Л., Годжаев М. О., Зверев В. Н. — Письма ЖЭТФ, 1986, т. 43, в. 12, с. 594—597.
- [8] Брандт Н. Б., Кульбачинский В. А., Ковалюк З. Д., Лошкарев В. Г. — ФТП, 1987, т. 21, в. 6, с. 1001—1004.
- [9] Альтшулер Б. Л., Аронов А. Г., Ларкин А. И., Хмельницкий Д. Е. — ЖЭТФ, 1981, т. 81, в. 8, с. 768—783.

Московский государственный
университет
им. М. В. Ломоносова

Получена 4.02.1988
Принята к печати 1.04.1988