

Нестационарная фотоэдс в кристаллах дисульфида олова в условиях сильного приповерхностного возбуждения

© М.А. Брюшинин^{*,**}, Г.Б. Дубровский^{*}, А.А. Петров^{*}, И.А. Соколов^{*,**}, N.A. Vainos^{***}, С. Kalpouzos^{***}

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

^{**} Институт проблем машиноведения Российской академии наук, 199178 Санкт-Петербург, Россия

^{***} Institute of Electronic Structure and Laser, FORTH, Heraklion, Greece

(Поступила в Редакцию 26 октября 2001 г.)

Исследуются особенности возбуждения нестационарной фотоэдс в молекулярных кристаллах дисульфида олова. Обнаружено существенное уширение зависимости фототока от пространственной частоты интерференционной картины. Наблюдаемый ход зависимости объяснен в рамках модели фотопроводника с несколькими типами носителей заряда одного знака.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-16890) и грантов НАТО (НТЕН.LG 970314, CNS 972900).

К характерным особенностям дисульфида олова (SnS_2) относятся сильная анизотропия свойств и политипизм, связанные со слоистой структурой вещества. Кристаллическая структура SnS_2 представляет собой молекулярную плотную упаковку [1]. Минимальной структурной единицей кристаллов является мономолекулярный слой, состоящий из трех атомных слоев: S–Sn–S. Соседние молекулярные слои связаны друг с другом силами Ван-дер-Ваальса. Сверхструктурные возмущения простейших структур кристалла, связанные с регулярными поворотами молекулярных слоев, приводят к появлению различных политипных модификаций.

В работах [2–5] приведены результаты исследования оптических свойств SnS_2 . Было обнаружено, что кристаллы обладают заметной фотопроводимостью в видимой части спектра [6–8] и малым временем отклика [9,10]. Тем не менее к настоящему времени не сформировалось полное и однозначное представление о свойствах кристалла для широкого спектра частот падающего излучения.

Основной целью данной работы является экспериментальное исследование нестационарной фотоэдс [11] в кристалле SnS_2 для различных длин волн записывающего света и выявление особенностей приповерхностного возбуждения тока коротковолновым светом.

1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для исследования эффекта нестационарной фотоэдс показана на рис. 1. В качестве источника когерентного излучения использовался He–Ne лазер ЛГН-215 ($\lambda = 633 \text{ nm}$, $P_{out} \approx 40 \text{ mW}$) и He–Cd лазеры ЛПМ-11 ($\lambda = 442 \text{ nm}$, $P_{out} \approx 1 \text{ mW}$) и Liconix-4240NB ($\lambda = 325 \text{ nm}$, $P_{out} \approx 6 \text{ mW}$). Свет от лазера разделялся на два луча, которые затем формировали интерференционную картину на поверхности исследуемых кристаллов. Один из лучей модулировался

по фазе с частотой ω и амплитудой Δ , что приводило к соответствующим пространственным колебаниям интерференционной картины. Измерения нестационарного фототока производились с помощью lock-in нановольтметров Unipan-233-7 и EG&G-7260. Кристаллы SnS_2 были выращены газотранспортным методом и имели характерные размеры $5 \times 5 \times 0.04 \text{ mm}$. На переднюю поверхность кристалла с помощью мелкодисперсной серебряной пасты были нанесены электроды на расстоянии $\sim 1 \text{ mm}$ друг от друга.

2. Экспериментальные результаты

Для всех использовавшихся длин волн света (633, 442 и 325 nm) не было обнаружено характерных признаков биполярной фотопроводимости, а именно смены знака фототока при изменении частоты фазовой модуляции [12] или пространственной частоты [13]. Для всех указанных длин волн света знак фототока соответствовал электронной составляющей.

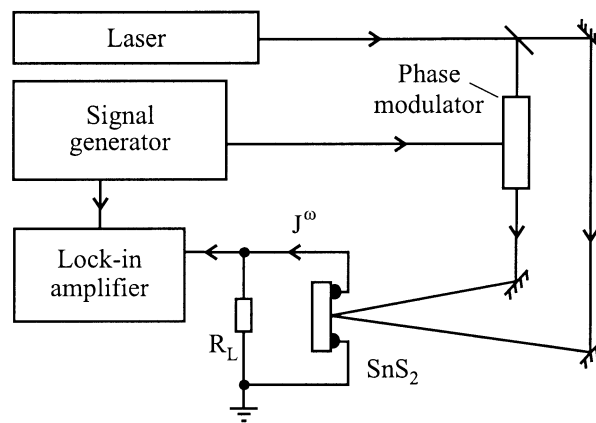


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования эффекта нестационарной фотоэдс в кристаллах SnS_2 .

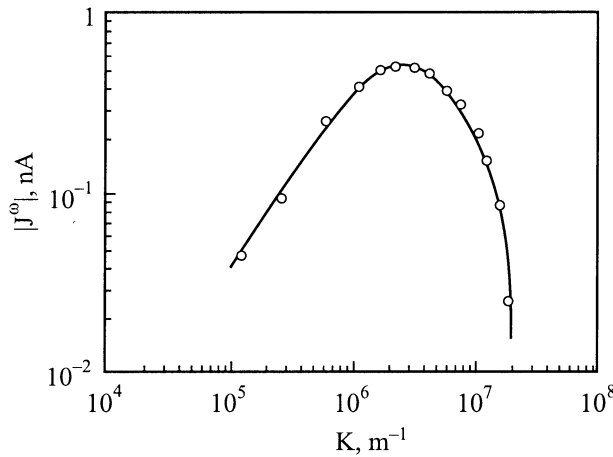


Рис. 2. Зависимость амплитуды нестационарного фототока от пространственной частоты интерференционной картины для длины волны света $\lambda = 633$ nm ($P_0 = 33$ mW, $\omega/2\pi = 100$ kHz). Сплошной линией показана зависимость (1).

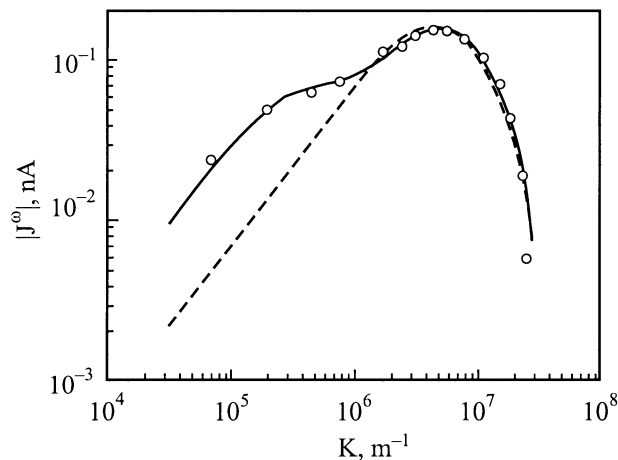


Рис. 3. Зависимость амплитуды нестационарного фототока от пространственной частоты K для длины волны света $\lambda = 442$ nm ($P_0 = 0.29$ mW, $\omega/2\pi = 140$ kHz). Сплошной линией показана зависимость (2), штриховой линией — стандартная зависимость (1).

На рис. 2 представлена зависимость нестационарной фотоздс от пространственной частоты, снятая для длины волны света $\lambda = 633$ nm. Экспериментальная кривая достаточно хорошо аппроксимируется стандартной зависимостью вида

$$J^\omega \propto \frac{\sigma_0 K}{1 + K^2 L_d^2}. \quad (1)$$

Здесь σ_0 — удельная фотопроводимость кристалла, K — пространственная частота, L_d — диффузионная длина переноса носителей. Линейный рост на начальном участке связан с увеличением диффузионного поля $E_D = (k_B T/e)K$, а спад обратно пропорционально K в области высоких пространственных частот объясняется уменьшением амплитуды решетки фотопроводимо-

сти [11]. Максимум фототока достигается при выполнении условия $KL_d = 1$, т.е. по положению максимума можно оценить величину диффузионной длины электронов. В исследуемом кристалле SnS_2 она составила $L_d = 0.38$ μm .

Аналогичная зависимость, снятая для длины волны $\lambda = 442$ nm, показана на рис. 3. Аппроксимация экспериментальной кривой стандартным выражением (1) дает значительные ошибки в области малых пространственных частот (штриховая линия). Указанное расхождение исчезает, если предположить, что перенос заряда в кристалле происходит по двум каналам, т.е. с участием „легких“ и „тяжелых“ носителей заряда одного знака [14]. В таком случае зависимость фототока от пространственной частоты принимает следующий вид:

$$J^\omega \propto \frac{\sigma_1 K}{1 + K^2 L_{d1}^2} + \frac{\sigma_2 K}{1 + K^2 L_{d2}^2}, \quad (2)$$

где L_{d1} и L_{d2} — диффузионные длины „легких“ и „тяжелых“ электронов, σ_1 и σ_2 — вклады соответствующих каналов переноса заряда в полную фотопроводимость материала. Экспериментальная зависимость аппроксимируется выражением (2) наилучшим образом для $L_{d1} = 0.15$ μm , $L_{d2} = 2.0$ μm и $\sigma_2/\sigma_1 = 4.3$.

Зависимость нестационарного фототока, измеренная для $\lambda = 325$ nm, еще более уширена (рис. 4) по сравнению с кривой, снятой для $\lambda = 442$ nm. Аппроксимация экспериментальной зависимости выражением (2), полученным для двух типов носителей, не оказывается вполне точной для всех пространственных частот. Сравняя (1) и (2), можно очевидным образом модифицировать выражение для амплитуды фототока для случая

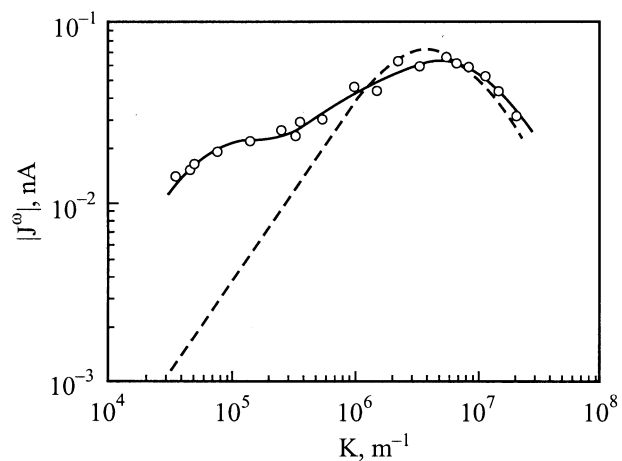


Рис. 4. Зависимость амплитуды нестационарного фототока от пространственной частоты K для длины волны света $\lambda = 325$ nm ($P_0 = 3.8$ mW, $\omega/2\pi = 94$ kHz). Сплошной линией показана зависимость (3), штриховой линией — стандартная зависимость (1).

трех типов носителей заряда одного знака

$$J^{\omega} \propto \sum_{m=1}^3 \frac{\sigma_m K}{1 + K^2 L_{dm}^2}. \quad (3)$$

Аппроксимация экспериментальных данных приведенным выражением позволяет оценить следующие параметры: $L_{d1} = 0.16 \mu\text{m}$, $L_{d2} = 0.85 \mu\text{m}$, $L_{d3} = 0.11 \mu\text{m}$, $\sigma_2/\sigma_1 = 2.1$ и $\sigma_3/\sigma_1 = 20$.

Возможность возбуждения падающим светом нескольких типов носителей, характеризующихся разными диффузионными длинами переноса, может быть обусловлена двумя особенностями зонной структуры кристалла SnS_2 . Во-первых, зона проводимости кристалла имеет два минимума, энергетический зазор между которыми составляет $\sim 0.8 \text{ eV}$ [3,15]. Таким образом, освещение кристалла красным светом ($\lambda = 633 \text{ nm}$, $h\nu = 1.96 \text{ eV}$) приводит к преимущественной генерации носителей с примесных уровней в долину с меньшей энергией, тогда как освещение синим и в особенности ультрафиолетовым светом ($\lambda = 442 \text{ nm}$, $h\nu = 2.81 \text{ eV}$ и $\lambda = 325 \text{ nm}$, $h\nu = 3.82 \text{ eV}$) приводит к межзонной и примесной генерации электронов в обе долины и, возможно, в третью, еще более высокую зону. Во-вторых, реальные образцы кристалла дисульфида олова имеют слоистую структуру, в которой возможно чередование слоев различных политипных структур. Ширина запрещенной зоны наиболее распространенной политипной модификации $1H$ кристалла SnS_2 составляет $E_g = 2.18 \text{ eV}$ [1,16]. Большей шириной запрещенной зоны обладает только структура $9R$, для которой $E_g = 3.38 \text{ eV}$ [16]. Следовательно, общий фототок может определяться генерацией носителей с разными транспортными параметрами в соответствующих чередующихся слоях кристалла с разной политипной структурой. Очевидно, что носители, генерируемые в высокоэнергетических зонах, могут иметь большие диффузионные длины из-за снижения для них ван-дер-ваальсовского зазора.

Список литературы

- [1] Г.Б. Дубровский. ФТТ **40**, 9, 1712 (1998).
- [2] P. Greenaway, R. Nitsche. J. Phys. Chem. Solid. **26**, 1445 (1965).
- [3] G. Domingo, R. Itoga, C. Kannewurf. Phys. Rev. **143**, 536 (1966).
- [4] P. Lee, G. Said. J. Phys. D: Appl. Phys. **1**, 837 (1968).
- [5] M.Au. Yang, M. Cohen. Phys. Rev. **178**, 1279 (1969).
- [6] S. Patil, R. Tredgold. J. Phys. **D4**, 718 (1971).
- [7] R. Nakata, M. Yamaguchi, S. Zembutsu, M. Sumita. J. Phys. Soc. Jap. **32**, 1153 (1972).
- [8] T. Shibata, Y. Makanushi, T. Miura, T. Kishi, J. Phys. Chem. Solid. **51**, 1297 (1990).
- [9] J.M. Lanzafame, R.J.D. Miller, A.A. Muentzer, B.A. Parkinson. J. Phys. Chem. **96**, 2820 (1992).
- [10] S. Xu, C.C. Miller, S.J. Diol, Y. Gao, D.A. Mantell, M.G. Mason, A.A. Muentzer, L.I. Sharp, B.A. Parkinson, R.J.D. Miller. Chem. Phys. Lett. **272**, 209 (1997).
- [11] M.P. Petrov, I.A. Sokolov, S.I. Stepanov, G.S. Trofimov. J. Appl. Phys. **68**, 5, 2216 (1990).
- [12] N. Korneev, S. Mansurova, P. Rodriguez, S. Stepanov. J. Opt. Soc. Am. **B14**, 2, 396 (1997).
- [13] С.И. Степанов, Г.С. Трофимов. ФТТ **31**, 1, 89 (1989).
- [14] M.A. Bryushinin, G.B. Dubrovsky, I.A. Sokolov. Appl. Phys. **B68**, 5, 871 (1999).
- [15] Landolt-Börnstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology / Ed. by O. Madelung. Springer, Berlin-Heidelberg (1983). Vol. 17. Subvol. f.
- [16] S. Acharya, O.N. Srivastava. Phys. Stat. Sol. (a) **65**, 2, 717 (1981).