

Магнитооптические исследования висмута при температуре 80–280 К

© В.М. Грабов, К.Г. Иванов*, А.А. Зайцев†

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
191186 Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна,
191186 Санкт-Петербург, Россия

† Елецкий государственный педагогический институт,
399740 Елец, Россия

(Получена 17 мая 2000 г. Принята к печати 17 мая 2000 г.)

В образцах, представляющих собой две разделенные зазором симметричные половинки монокристалла висмута, измерен коэффициент пропускания инфракрасного излучения ($\lambda = 10.6 \mu\text{м}$) в зависимости от индукции импульсного магнитного поля. Осцилляции, связанные с межзонными переходами на уровнях Ландау, наблюдались в интервале температур от 80 до 280 К. Определены температурные зависимости ширины запрещенной зоны, эффективных масс и времени релаксации носителей заряда.

Исследовано пропускание излучения инфракрасного (ИК) лазера ($\lambda = 10.6 \mu\text{м}$) симметричной полосковой линией, представляющей собой две половинки монокристалла висмута, разделенные зазором порядка длины волны [1,2]. Измерения проводились в импульсных магнитных полях с индукцией до 25 Тл, в температурном интервале $T = 80\text{--}280 \text{ К}$.

Осцилляции коэффициента пропускания обусловлены межзонными оптическими переходами на уровнях Ландау [3]. Полевое положение резонансов анализировалось в рамках модели Лэкса [3]. Определены значения эффективных масс носителей заряда и ширины запрещенной зоны в висмуте. Результаты удовлетворительно согласуются с данными [4], полученными, однако, лишь при 3 фиксированных значениях температуры. Моделирование коэффициента пропускания симметричной полосковой линии позволило определить зависимость магнитооптического времени релаксации носителей от температуры.

Магнитопропускание симметричной полосковой линии из висмута исследовалось на экспериментальной установке, описанной ранее [1]. Источником ИК излучения служил лазер непрерывного действия. Свет от лазера направлялся в зазор симметричной полосковой линии в течение короткого промежутка времени, синхронизированного с импульсом магнитного поля. Максимальное значение индукции магнитного поля составляло 25 Тл при $T = 80 \text{ К}$ и ограничивалось 4.5 Тл при $T = 280 \text{ К}$.

Измерения производились при направлениях магнитного поля, параллельных бинарной или биссекторной осям монокристалла, а также в ряде промежуточных ориентаций. Образцы изготавливались электроэрозионной резкой, рабочие поверхности подвергались химической полировке.

На рис. 1 представлены спектры, полученные для бинарного направления вектора магнитной индукции при $T = 80$ и 140 К . Указано полевое положение осцилляций, вызванных оптическими межзонными переходами. Цифры соответствуют номерам уровней Ландау, с которых наблюдается переход. Поскольку максимальное значение

поля для данных спектров ограничено 3.5 Тл, межзонный переход с уровня $j = 1$ при $T = 140 \text{ К}$ не показан. Сравнение спектров свидетельствует о значительном смещении переходов в область более высоких полей при повышении температуры.

На рис. 2 приведены спектры, полученные в результате дальнейшего нагревания образца до 230 и 280 К. Отметим при этом значительное уменьшение амплитуды осцилляций. Отношение сигнал/шум для этих спектров порядка единицы. В результате резко уменьшается количество наблюдаемых осцилляций.

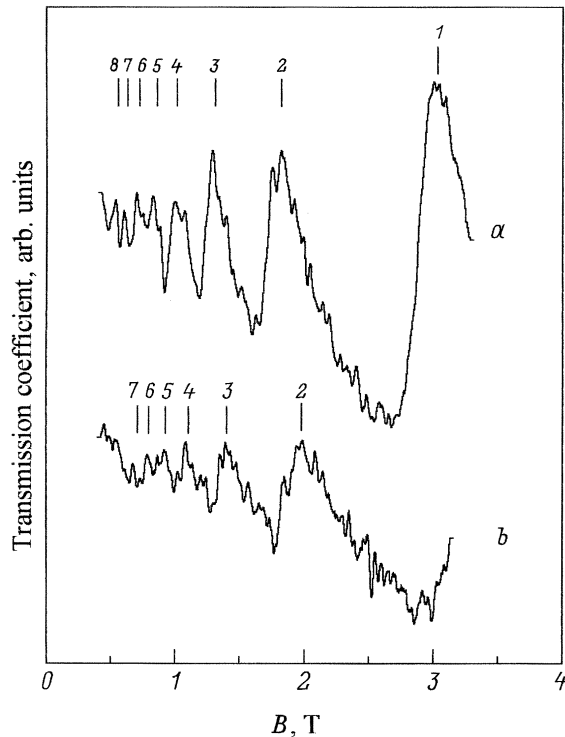


Рис. 1. Осцилляции магнитопропускания, вызванные межзонными переходами в висмуте при температуре 80 (а) и 140 К (б). Вектор индукции магнитного поля параллелен бинарной оси.

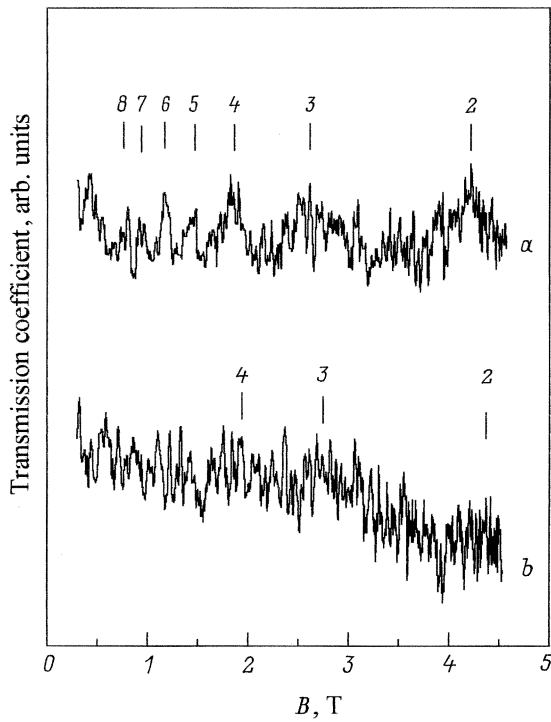


Рис. 2. Осцилляции магнитопропускания, вызванные межзонными переходами в висмуте при температуре 230 (а) и 280 К (б). Вектор индукции магнитного поля параллелен бинарной оси.

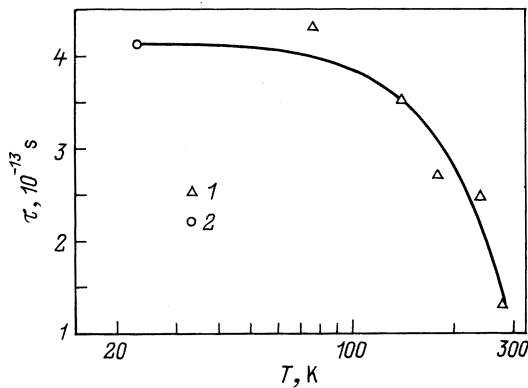


Рис. 3. Зависимость времени релаксации для межзонных переходов на уровнях Ландау в висмуте от температуры: 1 — настоящая работа, 2 — [5].

Согласно [3], межзонные оптические переходы на уровнях Ландау периодичны по обратному магнитному полю, и этот период равен

$$\Delta \left(\frac{1}{H} \right) = \left(4E_G \frac{e\hbar}{m_c c} \right) / (E_{PH}^2 - E_G^2). \quad (1)$$

При фиксированной энергии кванта излучения E_{PH} период осцилляций пропорционален отношению ширины запрещенной зоны к величине циклотронной массы на дне зоны: E_G/m_c .

Для спектров, полученных для различных ориентаций и при различных температурах, определялось значение периода осцилляций по обратному полю. Таким образом, для легкой бинарной $(E_G/m_c)_1$, легкой $(E_G/m_c)_2$ и тяжелой $(E_G/m_c)_3$ бисекторной массы L -электронов в висмуте соответственно получены зависимости

$$(E_G/m_c)_1 = 7.329 - (9.5 \cdot 10^{-3})T - (5.0 \cdot 10^{-6})T^2,$$

$$(E_G/m_c)_2 = 8.199 - (8.4 \cdot 10^{-3})T - (1.7 \cdot 10^{-5})T^2, \quad (2)$$

$$(E_G/m_c)_3 = 4.237 - (2.9 \cdot 10^{-3})T - (1.7 \cdot 10^{-5})T^2,$$

где ширина запрещенной зоны E_G измеряется в мэВ, циклотронная масса m_c — в массах свободного электрона. Уменьшение отношения E_G/m_c с ростом температуры удовлетворительно согласуется с результатами [4].

Из анализа переходов с участием уровней Ландау $j = 0$ для температуры 140 К получено значение ширины запрещенной зоны в L -точке: $E_G = 20 \pm 2$ мэВ. Для $T = 80$ К ранее [2,5] найдена величина $E_G = 17 \pm 2$ мэВ. Представляет интерес возрастание E_G с температурой. Зависимость $E_G(T)$ складывается из двух составляющих:

$$\frac{\partial E_G}{\partial T} = \left(\frac{\partial E_G}{\partial T} \right)_P + \left(\frac{\partial E_G}{\partial T} \right)_V. \quad (3)$$

Первое слагаемое характеризует тепловое расширение при постоянном давлении, второе — влияние колебаний решетки при фиксированном объеме. С привлечением данных барических измерений [6] для первого слагаемого в (3) получено

$$\left(\frac{\partial E_G}{\partial T} \right)_P \approx -3 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}, \quad (4)$$

а найденная в представленном эксперименте производная

$$\left(\frac{\partial E_G}{\partial T} \right) \Big|_{80 \text{ К}} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}. \quad (5)$$

Таким образом, наблюдается возрастание ширины запрещенной зоны при повышении температуры, несмотря на отрицательный вклад барической составляющей. Следовательно, в висмуте при температуре жидкого азота фононный вклад в изменение E_G превалирует над слагаемым, связанным с тепловым расширением решетки. В целом рост E_G с температурой является нетипичным для классических полупроводников и наблюдается лишь в полуметаллах и узкозонных полупроводниках [7].

Моделирование коэффициента пропускания симметричной полосковой линии [2] позволило определить значение времени релаксации τ носителей заряда в интервале температур 80–280 К. Полученная зависимость представлена на рис. 3, здесь же показано значение τ для температуры $T = 22$ К, полученное авторами [5]. Отметим, что в интервале температур от 22 до 80 К время релаксации практически не изменяется и составляет $\sim 4 \cdot 10^{-13}$ с.

На рис. 3 показано значительное уменьшение τ для температур, превышающих 100 К. Согласно [8], характеристические температуры для акустических и оптических фононов в висмуте равны соответственно 43 и 130 К. Таким образом, в наблюдаемых магнитооптических явлениях в висмуте рассеяние на оптических фононах является наиболее эффективным.

Приведенные результаты указывают на высокую эффективность применения магнитооптических методов для исследования параметров носителей заряда в полуметаллах и узкозонных полупроводниках в широком интервале температур.

Список литературы

- [1] К.Г. Иванов, О.В. Кондаков, С.В. Бровко, А.А. Зайцев. ФТП, **30**, 1585 (1996).
- [2] С.В. Бровко, А.А. Зайцев, К.Г. Иванов, О.В. Кондаков. ФТП, **31**, 416 (1997).
- [3] R.N. Brown, J.G. Mavroides, B. Lax. Phys. Rev., **129**, 2051 (1963).
- [4] M.P. Vecchi, M.S. Dresselhaus. Phys. Rev. B, **10**, 771 (1974).
- [5] M.P. Vecchi, J.R. Pereira, M.S. Dresselhaus. Phys. Rev. B, **14**, 298 (1976).
- [6] E.E. Mendez, A. Misu, M.S. Dresselhaus. Phys. Rev. B, **24**, 639 (1981).
- [7] Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. *Методы исследования полупроводниковых материалов в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS* (М., Наука, 1968).
- [8] F.E. Macfarlane. J. Phys. Chem. Sol., **32**, Suppl. N1, 989 (1971).

Редактор В.В. Чалдышев

Magneto-optical study of bismuth within 80–280 K range

V.M. Grabov¹, K.G. Ivanov², A.A. Zaitsev³

Russian State Pedagogical University,
191186 St.Petersburg, Russia

² St.Petersburg State University
of Technology and Design,
191186, St.Petersburg, Russia

³ Elets State Pedagogical Institute,
399740 Elets, Russia

Abstract Transmission of infrared radiation ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) in a pulsed magnetic field has been measured in samples of Bi single crystal consisting of two plane-parallel slabs separated by a clearance. Oscillations associated with interband optical transitions at Landau levels have been observed within 80 to 280 K temperature range. Temperature dependences of the energy gap, effective masses and the relaxation time of charge carriers are determined.