

МЕЖЗОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ НА УРОВНЯХ ЛАНДАУ В ВИСМУТЕ В ИК ДИАПАЗОНЕ ПРИ $T = 80$ К

© К.Г.Иванов, О.В.Кондаков, С.В.Бровко, А.А.Зайцев

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

(Получена 11 июля 1995 г. Принята к печати 2 октября 1995 г.)

На образцах монокристаллов Bi , изготовленных в виде двух плоскопараллельных пластин, разделенных зазором, в 2–3 раза превышающим длину волны вводимого в зазор излучения (10.6 мкм), в импульсных магнитных полях при $T = 80$ К были получены осцилляции, связанные с межзонными оптическими переходами на уровнях Ландау. Показаны возможности применения данного осцилляционного эффекта для получения ИК спектров процессов с длительностью менее 10^{-4} с.

В импульсное магнитное поле с длительностью полупериода 10^{-3} с при $T = 80$ К помещалась система, состоящая из двух половинок монокристалла висмута, разделенных зазором, в который направлялось излучение с длиной волны 10.6 мкм. Регулировкой зазора, обычно в пределах равных 2–3 длинам волн, устанавливалось оптимальное отношение сигнал–шум. Подобная система, но с зазором не более половины длины волны, называется симметричной полосковой линией (СПЛ) [1]. Несмотря на различие в величине зазоров, это название оставлено без изменения. На СПЛ были получены квантовые осцилляции, связанные с межзонными оптическими переходами на уровнях Ландау. Переходы между одними и теми же уровнями значения поля, в которых наблюдаются максимумы пропускания СПЛ, зависят от длины волны проходящего через зазор излучения. За время, меньше четверти периода импульсного магнитного поля, СПЛ будет работать как перестраиваемый инфракрасный (ИК) фильтр. Полученные из модели Лэкса соотношения позволили определить диапазон ИК спектра и интервал магнитного поля, в котором длина волны и значение поля связаны однозначно. Для СПЛ из висмута, ориентированного бинарной осью вдоль магнитного поля, диапазон длин волн от 12.0 до 9.3 мкм фильтруется в интервале полей $2.3 \div 3.8$ Т.

Описанный принцип позволяет анализировать ИК спектр процессов с длительностью менее четверти периода импульсного магнитного поля, определять эффективные циклотронные массы электронов при температуре 80 К и выше.

Для исследования магнитооптических свойств полуметаллов и узкозонных полупроводников была создана установка, оптическая и криогенная части которой приведены на рис. 1. Излучение лазера (1) поворотным зеркалом (2) направлялось на оптическое окно (3) из BaF_2 в вакуумном уплотнении. Затем излучение по трубке (4) подводилось к образцу (5), расположенному в центре импульсного соленоида (6). Пройдя расстояние 0.7 м, излучение фокусировалось конусом (7) на фотоприемник (8), заключенный в алюминиевый экран (9). Объем, в котором находился образец и фотоприемник, вакуумировался и затем заполнялся газообразным азотом. Температура образца контролировалась медь-константановой термопарой и составляла, как и у приемника излучения, 80 К.

СПЛ собиралась из двух зеркально-симметричных плоскопараллельных пластин. Между ними устанавливался зазор в пределах $20 \div 30$ мкм. Пластины вырезались из монокристалла висмута на электроискровой установке и химически полировались до появления зеркальной поверхности.

Для получения импульсного магнитного поля использовался источник постоянного напряжения до 5 кВ, пять конденсаторов К4ИИ-7 общей емкостью 500 мкф. Конденсаторы замыкались на импульсный соленоид с помощью разрядника, собранного из пяти тиристоров Т-320. Тиристоры приводились в контакт за счет сжатия в толстостенном стальном цилиндре, который экранировал измерительную часть установки от наводок. Для измерения импульсного магнитного поля использовалась катушка, расположенная в центре соленоида.

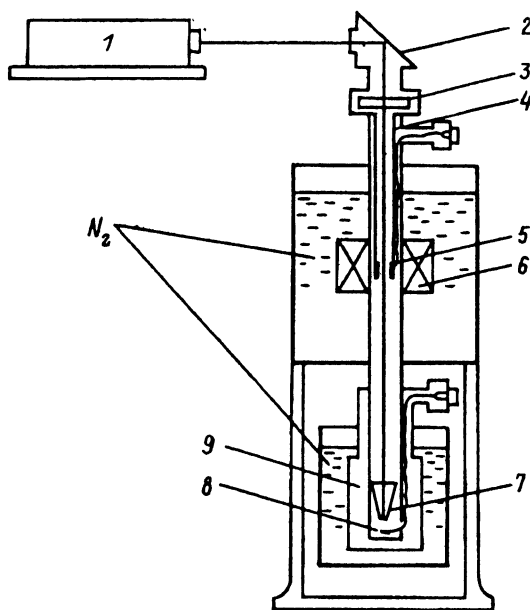


Рис. 1. Оптическая и криогенная части установки для магнитооптических измерений в импульсных полях при $T \geq 80$ К. 1 — ИК лазер, 2 — поворотное зеркало, 3 — оптическое окно, 4 — световод, 5 — СПЛ, 6 — импульсный соленоид, 7 — фокусирующий конус, 8 — фотоприемник, 9 — экран.

Сигнал с фотоприемника после пропускания поступал на цифровой запоминающий осциллограф С9-8 и далее через интерфейс на ПЭВМ типа IBM PC.

Экспериментальные результаты

На рис. 2 приведены зависимости сигнала с приемника излучения (*a*) и индукции магнитного поля (*b*) от времени. Максимумы прохождения излучения через СПЛ расположены симметрично относительно максимального значения индукции магнитного поля и их интенсивность увеличивается с ростом поля.

Осцилляционный характер пропускания связан с межзонными оптическими переходами на уровнях Ландау. Для этих переходов справедливо правило отбора $\Delta n = \pm 1$. Величина магнитного поля, соответствующая переходу с *n*-го уровня Ландау валентной зоны на *n* + 1 уровень зоны проводимости, следует из модели Лэкса [2]:

$$\frac{1}{H} = \frac{E_g e \hbar}{m_c^* c (E_p^2 - E_g^2)} \left\{ 2n + 1 + \left[4n(n + 1) + \frac{E_g^2}{E_p^2} \right]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

где E_p — энергия фотона, E_g — величина энергетического зазора между валентной зоной и зоной проводимости в точке *L*-зоны Бриллюэна, m_c^* — эффективная циклотронная масса носителей заряда на дне

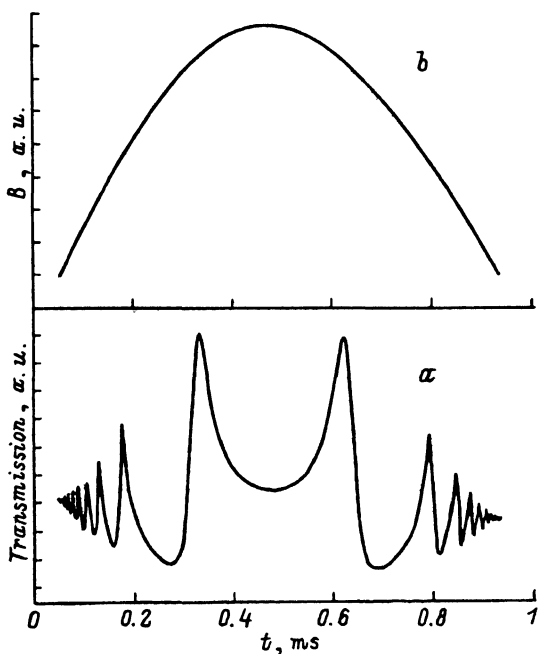


Рис. 2. Зависимость сигнала с фотоприемника, регистрирующего прошедшее через СПЛ ($B \parallel$ бинарная ось) излучение (10.6 мкм), от времени (*a*); зависимость сигнала с датчика магнитного поля от времени (*b*).

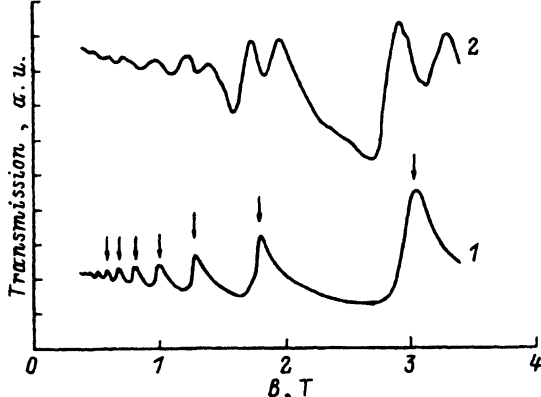


Рис. 3. Пропускание СПЛ из монокристалла Вi излучения с длиной волны 10.6 мкм. 1 — магнитное поле направлено вдоль бинарной оси, 2 — угол между направлением магнитного поля и бинарной осью равен 20°.

L -зоны, e — заряд электрона. Рассчитанные значения полей, соответствующие переходам, указаны стрелками на рис. 3 (кривая 1). Видно полное совпадение с экспериментальными результатами.

Формулу (1) можно упростить, если учесть, что величина энергетической щели у висмута ($E_g \approx 10$ мэВ) значительно меньше энергии фотона в рассматриваемом ИК диапазоне. Тогда для $n \geq 1$ имеем линейную зависимость обратного магнитного поля от n :

$$\frac{1}{H} = \frac{E_g e \hbar}{m_c^* c E_p^2} 4 \left(n + \frac{1}{2} \right). \quad (2)$$

Ошибка, связанная с подобным приближением, не превышает экспериментальную.

При длине волны, несколько большей или меньшей чем 10.6 мкм, максимумы пропускания СПЛ должны сместиться в меньшие или большие магнитные поля. Если излучение содержит несколько длин волн, то число максимумов пропускания увеличивается. Однозначная зависимость $\lambda = \lambda(H)$ для максимумов пропускания СПЛ лежит в определенном интервале длин волн и соответствующем ему диапазоне магнитных полей. Для этих интервалов зависимость пропускания СПЛ от магнитного поля будет отражать особенности спектрального состава излучения. Из равенства полей $H(n, \lambda_{\max}) = H(n+1, \lambda_{\max})$ для различных длин волн и соседних уровней Ландау, т. е. из условия наложения осцилляций, пользуясь формулой (2), получаем диапазон

$$\sqrt{\frac{2n+1}{2n+3}} \lambda_{\max} < \lambda < \lambda_{\max}. \quad (3)$$

Каждая длина волны этого диапазона пропускается СПЛ один раз в интервале полей

$$H(n, \lambda_{\max}) < H < \frac{2n+3}{2n+1} H(n, \lambda_{\max}). \quad (4)$$

В пределах этого неравенства длина волны однозначно связана со значением магнитного поля по формуле

$$\lambda = \frac{2\pi(\hbar c^3 m_c^*)^{1/2}}{[E_g e H 4(n+0.5)]^{1/2}}. \quad (5)$$

Для возможности межзонных переходов, очевидно, минимальная энергия кванта E_p рассматриваемого спектрального диапазона должна удовлетворять условию $E_p > 2E_f + E_g$, где E_f — значение уровня Ферми в данном материале. Отсюда следует ограничение на максимальную длину волны — $\lambda_{\max} < hc/(E_g + 2E_f)$. Переходы с участием уровней Ландау валентной зоны и зоны проводимости с квантовым числом $n = 1$ имеют наибольшую интенсивность (рис. 3, кривая 1). На этих переходах СПЛ из висмута, ориентированная бинарной осью вдоль направления магнитного поля, в соответствии с формулами (4) и (5) позволит получить спектр в диапазоне 12.0–9.3 мкм, в интервале полей от 2.3 до 3.8 Т.

При ориентации магнитного поля вдоль бинарного направления СПЛ одна из трех эффективных циклотронных масс электронов велика и осцилляции связаны с двумя меньшими и одинаковыми массами [3]. Если магнитное поле несколько повернуть от бинарного направления в сторону биссекторного, то меньшие массы перестанут быть равными, что приведет к увеличению числа осцилляционных максимумов. На рис. 3 (кривая 2) приведена зависимость пропускания СПЛ от магнитного поля, когда угол между направлением поля и бинарной осью составляет 20° . Видно, что осцилляционные экстремумы раздвоились. Кривая 2 является аналогом спектра, содержащего две длины волны, но полученного на СПЛ, ориентированной в поле в бинарном направлении. Время записи подобного спектра равно четверти периода импульсного магнитного поля и в нашем эксперименте составляло $5 \cdot 10^{-4}$ с. Необходимое максимальное значение поля не превышало 4 Т. Период импульсного поля легко технически снизить до значения 10^{-5} с. За время, меньшее четверти периода, можно записать ИК спектр процессов, имеющих длительность такого же порядка.

Разрешающая способность описанного выше спектрального устройства зависит от ширины осцилляционных экстремумов, которая уменьшается с понижением температуры и ростом чистоты исходного материала из которого изготовлена СПЛ. Почти 50% амплитуду осцилляций можно получить подбором ширины щели СПЛ без ухудшения отношения сигнал-шум.

Описанная методика позволяет получать ИК спектры в $10^4 \div 10^5$ раз быстрее, чем с помощью фурье-спектрометра, измерять эффективные циклотронные массы электронов в чистых и легированных материалах при температурах 80 К и выше, как это было сделано для висмута и сплавов висмут-сурьма [4].

Список литературы

- [1] В.Г. Голубев, В.И. Евсеев, К.Г. Иванов, В.И. Иванова-Омский. ЖТФ, **50**, 1992 (1980).
- [2] R.N. Brown, J.S. Mavroides, B. Lax. Phys. Rev., **129**, 2055 (1969).
- [3] В.С. Эдельман. УФН, **123**, 257 (1977).
- [4] О.В. Кондаков, К.Г. Иванов. ФТТ, **32**, 290 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

Interband optical Landau-level transitions for infrared wavelength range in bismuth at $T = 80$ K

K.G. Ivanov, O.V. Kondakov, S.V. Brovko, A.A. Zaitsev.

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

Quantum oscillations associated with interband Landau-level transitions were observed on bismuth single crystal samples inserted in pulsed magnetic fields at $T = 80$ K. The samples were prepared in the form of two plane-parallel plates separated with a gap which 2-3 times exceeded the wavelength ($10.6 \mu\text{m}$) of incident light. The opportunity to apply the oscillation effect to infrared spectra recording for processes with duration less than 10^{-4} s is revealed.
