

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПРОПУСКАНИЯ ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА

Б.Е. Винтайкин¹

vintaikb@mail.ru

О.В. Кондаков²

kondakov61@gmail.com

К.Г. Иванов³

kivanov@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ЕГУ им. И.А. Бунина, Елец, Липецкая обл., Российская Федерация

³ СПбГУПТД, Санкт Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены результаты исследования магнитооптического эффекта в висмуте в далекой инфракрасной области, основанном на регистрации пропускания планарного волновода, помещенного в изменяющееся магнитное поле. Численным расчетом проведено моделирование формы магнитооптических спектров в приближении времени релаксации и определен набор параметров электронного энергетического спектра висмута в приближении тензора эффективных масс. Обнаружена ступенчатая зависимость времени релаксации и концентрации носителей заряда от величины магнитного поля. Эта зависимость является следствием наличия электронов с различными эффективными массами, сосредоточенных в трех эквивалентных L -точках зоны Бриллюэна и дырок в T -точке зоны Бриллюэна и имеющих топологически несвязанные анизотропные поверхности постоянной энергии

Ключевые слова

Висмут, биссекторная ось, планарный волновод, магнитооптические эффекты, анизотропия

Поступила 17.01.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Планарный волновод со стенками из анизотропного материала, помещенный в магнитное поле, представляет собой физическую и техническую систему с большим числом легко контролируемых степеней свободы. Изменение внешних параметров (температуры и величины магнитного поля, частоты лазера накачки) позволяет создавать разнообразные условия для проведения исследований как классических, так и квантовых и предельно ультраквантовых в технически достижимых режимах работы. Анизотропия свойств материала стенок волновода обеспечивает разнообразие электромагнитных волн, распространяющихся в такой системе. Создание эффек-

тивных оптических клапанов [1–3] однопроходных перестраиваемых лазеров в инфракрасном и субмиллиметровом диапазоне представляет несомненную перспективу данного исследования.

Цель работы — расчет свойств анизотропного материала исходя из результатов магнитооптического эксперимента, проведенного в дальней инфракрасной области спектра.

Методические особенности работы. Плоский волновод, изготовленный из висмута, помещен в магнитное поле до 1,6 Тл в геометрии Фарадея. Эксперимент [4] проводился при температуре образца $T = 4,2$ К.

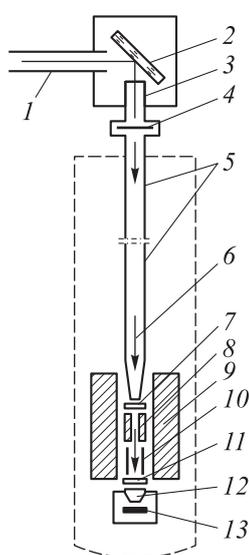


Рис. 1. Схема взаимного расположения составляющих оптической системы экспериментальной установки

Электромагнитная волна распространяется в волноводе, стенки которого состоят из анизотропного монокристалла. Источник электромагнитной волны — излучение HCN-лазера с длиной волны $\lambda = 337$ мкм. Оптическая система экспериментальной установки приведена на рис. 1. Субмиллиметровое излучение HCN-лазера вводится в световод 1 и попадает на поворотное зеркало 2, которое отражает падающее на него излучение под углом 90° в световод 3. После прохождения герметичного окна 4 из черного полиэтилена (толщина ≈ 150 мкм) субмиллиметровое излучение фокусируется на планарный волновод 8 с помощью световода 5 с конусом 6 на конце. Планарный волновод размещается в держателе, который вводится внутрь сверхпроводящего соленоида 9, помещенного непосредственно в жидкий гелий. Между конусом и планарным волноводом помещается охлаждаемый фильтр 7 из черного полиэтилена для предотвращения фоновой засветки. Прошедшее через планарный волновод излучение с помощью световода 10 направляется

через кварцевое стекло 11, впаянное в дно внутренней стенки гелиевого дюзара, на второй конус 12, который фокусирует излучение на субмиллиметровый приемник — глубоко охлаждаемый германиевый болометр 13. Сигнал с болометра измерялся методом синхронного детектирования.

Качество кристаллов, геометрия эксперимента и значение тепловой энергии $k_B T = 0,36$ мэВ позволяют наблюдать циклотронные, гибридные резонансы и диэлектрические аномалии электронов и дырок в L - и T -точках зоны Бриллюэна.

Экспериментальные результаты. Висмут исследован в ориентации, когда вектор индукции магнитного поля был направлен вдоль биссекторной оси кристаллической решетки висмута.

Экспериментальные результаты и результаты моделирования формы линии магнитооптического эксперимента, когда магнитное поле направлено вдоль биссекторной оси, приведены на рис. 2. Наблюдаемые особенности в магнитопрпуске планарного волновода связываются с циклотронным резонансом на наклонных орбитах, гибридным резонансом и диэлектрической аномалией носителей заряда различных типов [5].

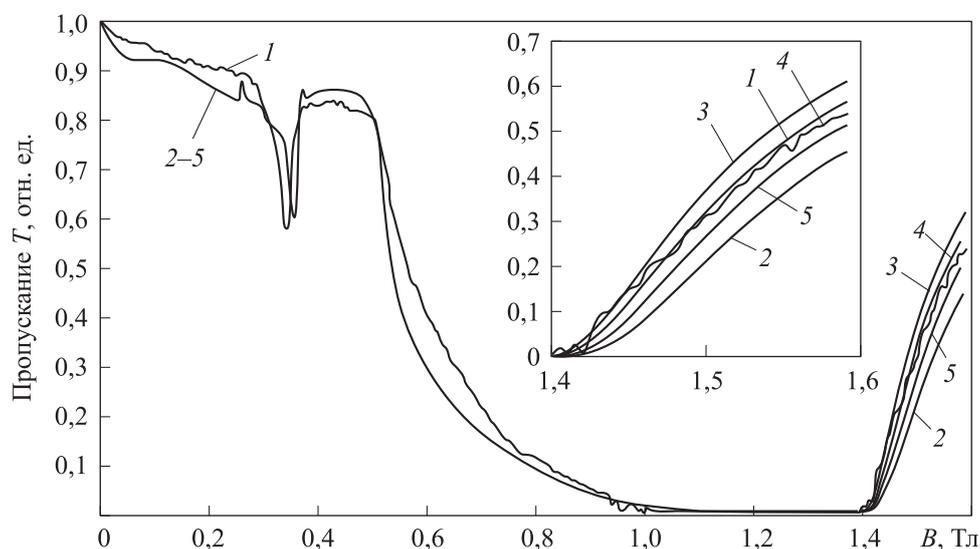


Рис. 2. Экспериментальные результаты (1) и результаты моделирования (2–5) формы линии магнитооптического эксперимента (магнитное поле направлено вдоль биссекторной оси) при $\tau = 0,6 \cdot 10^{-11}$ (2), $0,9 \cdot 10^{-11}$ (3), $0,8 \cdot 10^{-11}$ (4) и $0,7 \cdot 10^{-11}$ (5)

Обсуждение результатов. В ориентации, когда вектор индукции магнитного поля направлен вдоль биссекторной оси кристаллической решетки висмута, имеется три типа носителей заряда [6].

Выражения для циклотронных масс в биссекторном направлении получаются применением выражения [7]

$$m_c^* = \left(\frac{\det \hat{m}^*}{m_B^*} \right)^{1/2} m_0^{3/2} \quad (1)$$

для тензора эффективных масс электронов, записанного в кристаллических осях висмута:

$$\hat{m}^* = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_4 \\ 0 & m_4 & m_3 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $m_B^* = (\vec{h} \cdot \hat{m}^* \cdot \vec{h}) m_0$ — эффективная масса носителей заряда вдоль направления вектора магнитной индукции; m_0 — масса свободного электрона, ось 1 направлена вдоль бинарной оси кристаллической решетки висмута, ось 2 — вдоль биссекторной, ось 3 — вдоль тригональной, \vec{h} — единичный вектор вдоль направления вектора индукции магнитного поля.

Для направления, когда вектор индукции магнитного поля параллелен биссекторной оси:

$$m_{bis}^{light} = m_0 \left(\frac{m_1 (m_2 m_3 - m_4^2)}{m_2} \right)^{1/2}; \quad (3)$$

$$m_{bis}^{heavy} = 2m_0 \left(\frac{m_1 (m_2 m_3 - m_4^2)}{3m_1 + m_2} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где m_{bis}^{light} — легкая биссекторная циклотронная масса; m_{bis}^{heavy} — тяжелая биссекторная циклотронная масса.

Эффективная масса T -дырок определяется как

$$M_{bis} = m_0 (M_1 M_3)^{1/2}. \quad (5)$$

Компоненты тензора эффективных электронных масс на поверхности Ферми, которые использовались как исходные: $m_1 = 0,00606$, $m_2 = 1,26$, $m_3 = 0,0267$, $m_4 = 0,140$, $M_1 = 0,0639$, $M_3 = 0,703$ в единицах массы свободного электрона [4, 5]. Поскольку масса $m_2 \gg m_1$, в первом приближении можно пренебречь членом $3m_1$ в знаменателе (4). Тогда $m_{bis}^{heavy} = 2m_{bis}^{light}$. В соответствии с общими соображениями вправе ожидать, что особенности, связанные с тяжелыми биссекторными циклотронными массами, должны располагаться в полях вдвое больших по сравнению с полями, в которых располагаются особенности, связанные с легкими биссекторными циклотронными массами.

Расчет коэффициента пропускания планарного волновода проводился следующим образом [5].

Решалась система уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\partial \vec{B} / \partial t; \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \partial \vec{D} / \partial t + \vec{j}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\vec{\nabla}\vec{B} &= 0; \\ \vec{\nabla}\vec{D} &= \rho\end{aligned}\quad (6)$$

с материальными соотношениями

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \hat{\varepsilon}\varepsilon_0\vec{E}; \\ \vec{B} &= \mu\mu_0\vec{H}.\end{aligned}\quad (7)$$

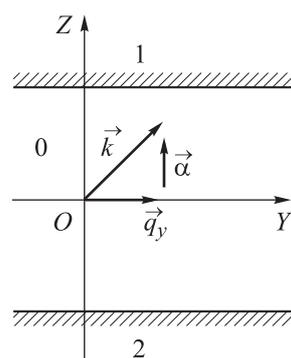
Здесь $\vec{\nabla}$ — оператор градиента; \vec{E} , \vec{B} , \vec{D} , \vec{H} — зависящие от времени векторы напряженности и индукции электрического и магнитного полей.

Решение системы уравнений Максвелла (6) искали для среды 1 (рис. 3) в виде

$$\vec{E} = \vec{E}^{(1)} \exp(-\alpha z) \exp(i(\omega t - q_y y)), \quad (8)$$

где \vec{E} — напряженность электрического поля электромагнитной волны; α — поперечное волновое число; ω — круговая частота электромагнитной волны; q_y — продольное волновое число; индекс «1» означает, что комплексная амплитуда относится к среде 1 (см. рис. 3).

Рис. 3. Взаимное расположение компонент волнового вектора электромагнитной волны (индекс «0» обозначает среду между трансляционно симметричными монокристаллами 1 и 2, составляющими стенки планарного волновода)



Условия на границах сред 0–1 и 0–2 (см. рис. 3) и соотношения симметрии позволили классифицировать электромагнитные волны, распространяющиеся в планарном волноводе, и рассчитать коэффициент пропускания. Численные оценки параметров электромагнитной волны дали возможность упростить конечное выражение для коэффициента пропускания.

В результате получено простое выражение для коэффициента пропускания планарного волновода (с погрешностью 6 %)

$$T(B) = \exp\{2L[q_y''(B) - q_y''(0)]\}, \quad (9)$$

где L — длина планарного волновода; $q_y''(B)$, $q_y''(0)$ — мнимые части волнового вектора в направлении распространения волны в волноводе при магнитном поле B и когда магнитное поле равно нулю соответственно.

Моделирование магнитооптических спектров, полученных для висмута при длине волны электромагнитного излучения 337 мкм, проведено в работах [8–14], где получено удовлетворительное согласие результатов моделирования с экспериментом. Однако успешное моделирование одного участка экспериментальной кривой приводило к проблемам моделирования в другом диапазоне магнитных полей.

Задача является многопараметрической, поэтому в настоящей работе рассмотрено влияние на форму линии двух параметров: 1) времени релаксации зарядового возбуждения τ ; 2) концентрации свободных носителей заряда (электронов и дырок).

Оказалось, что подстановка тех или иных констант для перечисленных выше физических величин во всем исследуемом диапазоне магнитных полей приводит к тому, что при успешном моделировании одного участка кривой другой показывает менее хорошие результаты. Это связано с тем, что в случае, когда вектор внешнего магнитного поля направлен в биссекторном направлении, имеются три типа носителей заряда. Это — электроны с эффективными циклотронными массами, различающиеся примерно в 2 раза друг от друга (0,008 и 0,016 массы свободного электрона), и дырки (0,2 массы свободного электрона). Таким образом, особенности в магнитооптическом спектре, зависящие от носителей заряда с различными свойствами, могут проявляться в различных диапазонах магнитных полей. Если рассматриваемые группы носителей заряда не связаны друг с другом либо связь не является превалирующим явлением, время релаксации зарядового возбуждения τ носителей заряда, сосредоточенных в различных областях зоны Бриллюэна, и концентрация свободных носителей заряда (электронов и дырок) будут иметь различные значения для выделенных диапазонов магнитных полей. Действительно, численный эксперимент показал, что рассматриваемый диапазон магнитных полей 0...1,6 Тл делится на два участка: 1) 0...0,45 Тл; 2) 0,45...1,6 Тл. В первом из них главную роль играют легкие биссекторные электроны, а во втором — тяжелые биссекторные электроны и дырки.

Согласия между экспериментальными и теоретическими результатами удалось достичь для зависимости времени релаксации оптического возбуждения от магнитного поля, представленной на рис. 4, а, где совместно с полевой зависимостью времени релаксации приведена расчетная кривая коэффициента пропускания. Отчетливо видно, что для электронов меньших циклотронных масс время релаксации составляет $\tau = 2 \cdot 10^{-11}$ с, а для электронов больших циклотронных масс — $\tau = 0,7 \cdot 10^{-11}$ с. Предположения

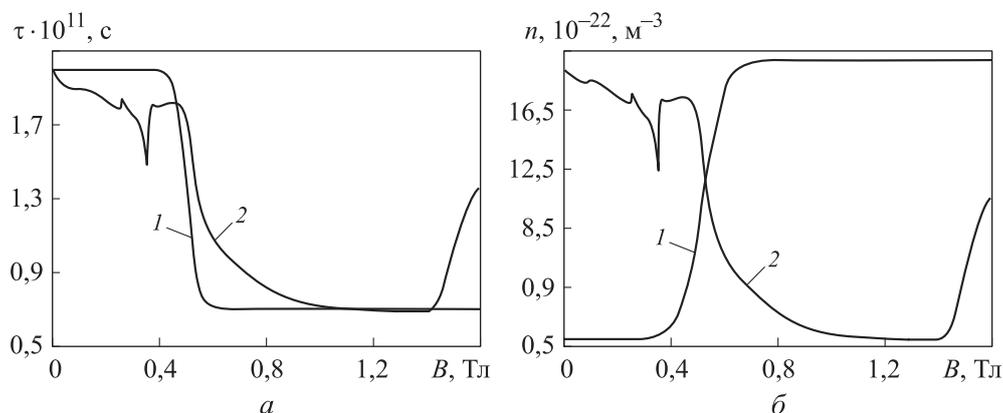


Рис. 4. Экспериментальные (1) и расчетные (2) зависимости времени релаксации оптического возбуждения (а) и зависимость концентрации электронов (б) от магнитного поля, направленного вдоль биссекторной оси висмута

о слабой связи различных экстремумов постоянной энергии подтвердились. В выделенном фрагменте на рис. 2 показан результат наиболее сильного влияния варьирования времени релаксации на форму расчетной линии коэффициента пропускания. Несмотря на то что полевой диапазон изменения времени релаксации простирался в диапазоне магнитного поля $0,5 \dots 1,6 \text{ Тл}$, видимое влияние сказалось только в узком участке магнитного поля — $1,4 \dots 1,6 \text{ Тл}$, в области резкого роста коэффициента пропускания. Следует обратить внимание на высокую чувствительность спектра к изменению этого параметра. При уменьшении времени релаксации кривая становится более полой, что и ожидалось. Наиболее достоверное значение времени релаксации $\tau = 0,8 \cdot 10^{-11} \text{ с}$.

В целом время релаксации для электронов меньшей циклотронной массы более чем в 2 раза превосходит время релаксации для электронов с большей циклотронной массой.

Форма линии расчетной зависимости коэффициента пропускания от магнитного поля оказалась сильно зависимой от концентрации электронов в L -точке зоны Бриллюэна висмута. Висмут является компенсированным полуметаллом: концентрация дырок равна концентрации электронов и составляет $n = 3,0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Это значение установлено в результате гальваномагнитных измерений [15]. Однако в рассматриваемом эксперименте циклотронное поглощение испытывают далеко не все электроны в зоне проводимости. Фактически, эффективно поглощать энергию и переходить на более высокие квантовые уровни могут лишь электроны в тонком слое, определяемом значением тепловой энергии $k_B T = 0,36 \text{ мэВ}$. Поэтому кон-

центрация электронов в данном эксперименте представляет собой эффективное число электронов в единичном объеме, задействованных в процессе поглощения электромагнитной энергии.

Таким образом, сделан вывод о возможности варьирования этого параметра, причем отличие его от истинного значения может составлять большую величину. Естественно, эта концентрация должна быть меньше найденной [15], исходя из гальваномагнитных экспериментов. Результаты моделирования зависимости концентрации электронов от магнитного поля приведены на рис. 4, б.

Зависимость концентрации электронов от магнитного поля в ориентации, когда вектор индукции магнитного поля направлен вдоль биссекторной оси висмута, также имеет ступенчатую структуру. Как и в предыдущем случае, это связано с относительной изолированностью свойств висмута, определяемых различными поверхностями постоянной энергии. Различия концентраций для разных эллипсоидов постоянной энергии отличаются в десятки раз.

Результаты варьирования концентрации легких биссекторных электронов приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание факт, что увеличение концентрации приводит к большей интенсивности особенности в пропускании легких биссекторных электронов. Оказалось, варьирование

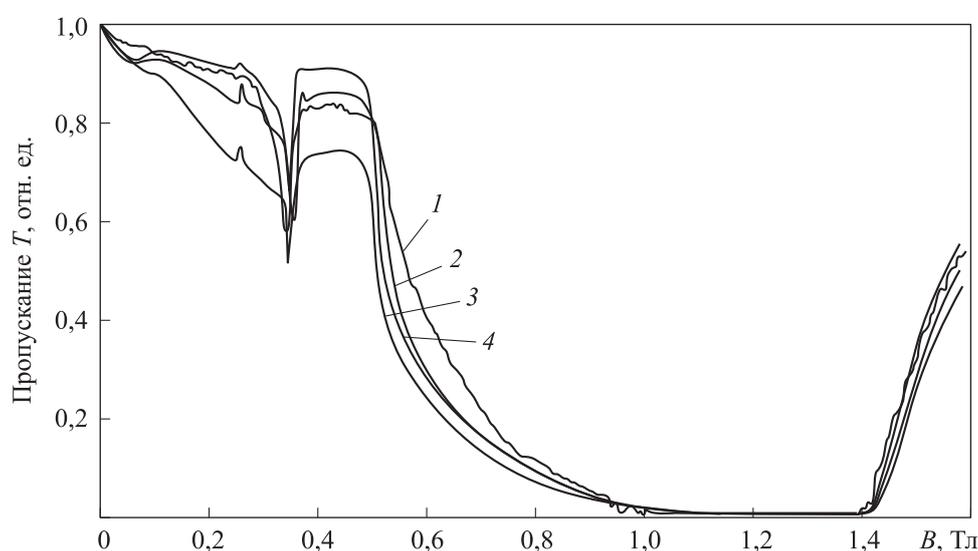


Рис. 5. Результаты моделирования формы линии магнитооптического эксперимента при направлении магнитного поля вдоль биссекторной оси:

1 — экспериментальные результаты; 2, 3, 4 — аппроксимация при значениях $n = 0,1 \cdot 10^{23}$, $0,08 \cdot 10^{23}$, $0,11 \cdot 10^{23}$ соответственно

концентрации носителей заряда в диапазоне малых магнитных полей скажется на результатах моделирования, где концентрация имеет другое значение. Это связано с особенностью численной процедуры, когда рассчитанное численным методом последующее значение зависит от предыдущего. Данное явление иллюстрирует точность проведенного расчета и устойчивость решения по отношению к входным параметрам.

Заключение. Моделированием зависимости коэффициента пропускания планарного волновода от магнитного поля установлены ступенчатые зависимости времени релаксации зарядового возбуждения и концентрации носителей заряда, которые являются следствием наличия трех групп носителей заряда расположенных в L - и T -точках первой зоны Бриллюэна.

Доказано, что в условиях сильной анизотропии свойств и наличия топологически изолированных поверхностей Ферми моделирование экспериментальных магнитооптических спектров является успешным при учете параметров каждого экстремума носителей заряда отдельно.

Следует отметить, что в результате моделирования формы экспериментальной кривой получена новая информация о свойствах исследуемого материала, параметрах энергетического спектра висмута и динамике процессов, происходящих в условиях магнитного квантования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jain A. Magneto optic current transformer technology (МОСТ). *IOSR-JEEE*, 2017, vol. 12, iss. 1, ver. IV, pp. 46–50. DOI: 10.9790/1676-1201044650
- [2] Kondakov O., Ndahayo F. Quantum frequency transformer of radiation. *ИЖМС*, 2009, vol. 9, no. D10, pp. 26–38.
- [3] Falkovsky L. Quantum magneto-optics in graphene. *Photonics*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 13–20. DOI: 10.3390/photonics2010013
- [4] Голубев В.Г., Евсеев В.Н., Иванов К.Г. и др. Субмиллиметровая полосковая линия из висмута в магнитном поле. *ЖТФ*, 1980, т. 50, с. 1992–1997.
- [5] Голубев В.Г., Евсеев В.Н., Иванов К.Г. и др. Распространение субмиллиметровых плазменных волн в висмуте в магнитном поле. *Плазма и неустойчивости в полупроводниках. Мат. IV Всесоюз. симп.* Вильнюс, 1980, с. 4–5.
- [6] Эдельман В.С. Свойства электронов в висмуте. *УФН*, 1977, т. 123, № 10, с. 257–287. DOI: 10.3367/UFNr.0123.197710d.0257
- [7] Vecchi M.P., Mendez E., Dresselhaus M.S. Temperature dependence of the band parameters in Bi and Bi₁-XSbX alloys. *Proc. Int. Conf. Phys. Semiconductors*. Rome, 1976, pp. 459–462.

- [8] Голубев В.Г., Евсеев В.Н., Иванов К.Г. и др. Циклотронная масса электронов в сплавах висмут–олово. *Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы. Мат. V Всесоюз. симп. Ч. 1.* Львов, 1980, с. 220–222.
- [9] Голубев В.Г., Евсеев В.Н., Иванов К.Г. и др. Циклотронная масса электронов в сплавах висмут–олово. *ФТТ*, 1980, т. 22, № 11, с. 3433–3435.
- [10] Голубев В.Г., Евсеев В.Н., Иванов-Омский В.И. и др. Исследование диэлектрических свойств висмута в субмиллиметровой области спектра. *Известия вузов. Физика*, 1990, № 3, с. 90–93.
- [11] Васильева И.И., Гладких О.Б. Разработка алгоритмов моделирования распространения поверхностной электромагнитной волны в планарном волноводе. *Нелинейный мир*, 2016, т. 14, № 5, с. 28–36.
- [12] Васильева И.И., Гладких О.Б. Расчет прохождения субмиллиметрового излучения через симметричную полосковую линию в зависимости от величины магнитного поля. *Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования. Мат. междунар. науч.-практ. конф. Елец, ЕГУ им. И.А. Бунина*, 2016, с. 107–111.
- [13] Васильева И.И., Гладких О.Б. Моделирование формы линии распространения поверхностной электромагнитной волны в планарном волноводе. *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Мат. 19 междунар. науч. конф. М., РУДН*, 2016, с. 272–279.
- [14] Васильева И.И. Моделирование магнитооптического эксперимента в висмуте на основе расчета коэффициента пропускания. *Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Мат. Всерос. конф. с междунар. участием. М., РУДН*, 2014, с. 205–208.
- [15] Bhargava R.N. de Haas-van Alphen and galvanomagnetic effect in Bi and Bi–Pb alloys. *Phys. Rev.*, 1967, vol. 156, iss. 3, pp. 785–789. DOI: 10.1103/PhysRev.156.785

Винтайкин Борис Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Кондаков Олег Викторович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики, радиотехники и электроники ЕГУ им. И.А. Бунина (Российская Федерация, Липецкая обл., 399770, Елец, ул. Коммунаров, д. 38).

Иванов Константин Георгиевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики СПбГУПТД (Российская Федерация, 191186, Санкт Петербург, Большая Морская ул., д. 18).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Винтайкин Б.Е., Кондаков О.В., Иванов К.Г. Определение свойств анизотропного материала моделированием пропускания планарного волновода. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 2, с. 51–63.

DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-51-63

DETERMINING ANISOTROPIC MATERIAL PROPERTIES BY MEANS OF SIMULATING TRANSMISSION IN A PLANAR WAVEGUIDE

B.E. Vintaykin¹

vintaikb@mail.ru

O.V. Kondakov²

kondakov61@gmail.com

K.G. Ivanov³

kivanov@mail.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Bunin Yelets State University, Yelets, Lipetsk Region, Russian Federation

³ St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design,

St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

The paper presents investigation results concerning a magneto-optic effect occurring in the far infrared range in bismuth. The investigation involves recording transmission in a planar waveguide located in a variable magnetic field. We ran a numerical simulation of the magneto-optic spectrum shapes in the relaxation-time approximation and determined a set of parameters for the electron energy spectrum in bismuth in the effective mass tensor approximation. We found that there is a discrete function describing how relaxation time and charge carrier concentration depend on the magnetic field magnitude. The function stems from the presence of electrons with different effective masses, which are concentrated in the three equivalent L points of the Brillouin zone, and holes in the T point of the Brillouin zone, which have topologically unconnected anisotropic constant energy surfaces

Keywords

Bismuth, bisector axis, planar waveguide, magneto-optic effect, anisotropy

Received 17.01.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Jain A. Magneto optic current transformer technology (MOCT). *IOSR-JEEE*, 2017, vol. 12, iss. 1, ver. IV, pp. 46–50. DOI: 10.9790/1676-1201044650
- [2] Kondakov O., Ndahayo F. Quantum frequency transformer of radiation. *IJMC*, 2009, vol. 9, no. D10, pp. 26–38.
- [3] Falkovsky L. Quantum magneto-optics in graphene. *Photonics*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 13–20. DOI: 10.3390/photonics2010013
- [4] Golubev V.G., Evseev V.N., Ivanov K.G., et al. Submillimeter line of bismuth in a magnetic field. *ZhTF*, 1980, vol. 50, pp. 1992–1997 (in Russ.).
- [5] Golubev V.G., Evseev V.N., Ivanov K.G., et al. [Propagation of submillimeter plasma waves in bismuth in a magnetic field]. *Plazma i neustoychivosti v poluprovodnikakh. Mat. IV Vsesoyuz. simp.* [Plasma and Instabilities in Semiconductors. Proc. IV All-Union Symp.]. Vil'nyus, 1980, pp. 4–5 (in Russ.).

- [6] Edel'man V.S. Properties of electrons in bismuth. *Sov. Phys. Usp.*, 1977, vol. 20, no. 10, pp. 819–835. DOI: 10.1070/PU1977v020n10ABEH005467
- [7] Vecchi M.P., Mendez E., Dresselhaus M.S. Temperature dependence of the band parameters in Bi and Bi1–XSbX alloys. *Proc. Int. Conf. Phys. Semiconductors*. Rome, 1976, pp. 459–462.
- [8] Golubev V.G., Evseev V.N., Ivanov K.G., et al. Cyclotron mass of electrons in bismuth–tin alloys. *Poluprovodniki s uzkoj zapreshchennoy zonoj i polumetalloy. Mat. V Vsesoyuz. simp. Ch. 1* [Semiconductors with a narrow bandgap and semimetals. Proc. V All-Union Symp.]. L'vov, 1980, pp. 220–222 (in Russ.).
- [9] Golubev V.G., Evseev V.N., Ivanov K.G., et al. Cyclotron mass of electrons in bismuth–tin alloys. *FTT*, 1980, vol. 22, no. 11, pp. 3433–3435 (in Russ.).
- [10] Golubev V.G., Evseev V.N., Ivanov-Omskiy V.I., et al. Investigation of dielectric properties of bismuth in submillimeter spectrum region. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1990, no. 3, pp. 90–93 (in Russ.).
- [11] Vasilyeva I.I., Gladkikh O.B. Development of algorithms for modeling the transmission of surface electromagnetic waves in planar waveguide. *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2016, vol. 14, no. 5, pp. 28–36 (in Russ.).
- [12] Vasilyeva I.I., Gladkikh O.B. [Calculation of submillimeter radiation transmission through symmetrical strip line depending on the magnitude of magnetic field]. *Sistemy upravleniya, tekhnicheskie sistemy: ustoychivost', stabilizatsiya, puti i metody issledovaniya. Mat. mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Control systems, technical systems: stability, stabilization, ways and methods of research. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Elets, Bunin Yelets State Univ. Publ., 2016, pp. 107–111 (in Russ.).
- [13] Vasilyeva I.I., Gladkikh O.B. [Shape modeling of propagation line of a surface electromagnetic wave in a planar waveguide]. *Raspredelemnnye komp'yuternye i telekommunikatsionnye seti: upravlenie, vychislenie, svyaz'. Mat. 19 mezhdunar. nauch. konf.* [Distributed computer and telecommunication networks: control, calculation, communication. Proc. 19 Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, RUDN Univ. Publ., 2016, pp. 272–279 (in Russ.).
- [14] Vasilyeva I.I. [Modeling of magneto-optical experiment in bismuth based on calculation of transmittance]. *Informatsionno-telekommunikatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie vysokotekhnologichnykh sistem. Mat. Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems. Proc. Russ. Conf. with Int. Participation]. Moscow, RUDN Univ. Publ., 2014, pp. 205–208 (in Russ.).
- [15] Bhargava R.N. de Haas-van Alphen and galvanomagnetic effect in Bi and Bi–Pb alloys. *Phys. Rev.*, 1967, vol. 156, iss. 3, pp. 785–789. DOI: 10.1103/PhysRev.156.785

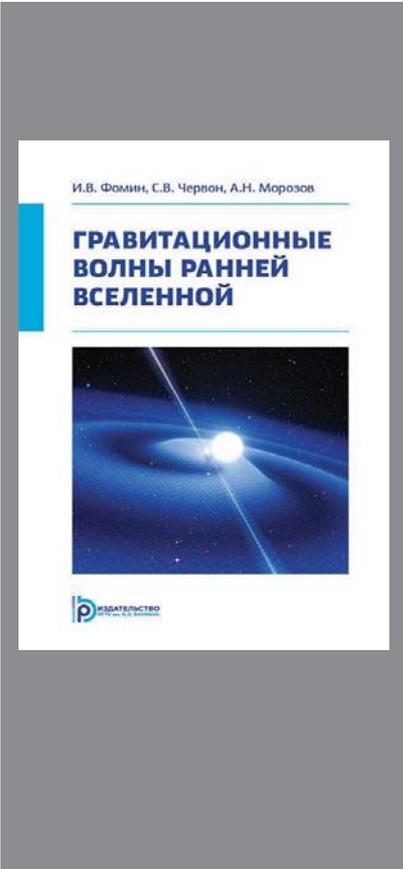
Vintaykin B.E. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kondakov O.V. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Radio Engineering and Electronics, Bunin Yelets State University (Kommunarov ul. 38, Yelets, Lipetsk Region, 399770 Russian Federation).

Ivanov K.G. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of Department of Physics, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (Bolshaya Morskaya ul. 18, St. Petersburg, 191186 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Vintaykin B.E., Kondakov O.V., Ivanov K.G. Determining anisotropic material properties by means of simulating transmission in a planar waveguide. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 2, pp. 51–63 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-51-63

	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография авторов И.В. Фомина, С.В. Червона, А.Н. Морозова</p> <p>«Гравитационные волны ранней Вселенной»</p> <p>Рассмотрены применение скалярных полей в космологии и методы построения моделей ранней Вселенной на основе их динамики. Выполнен анализ динамики Вселенной на различных стадиях ее эволюции. Проведен расчет параметров космологических возмущений. Представлены методы верификации инфляционных моделей и новые методы детектирования гравитационных волн. Для специалистов, интересующихся проблемами нелинейной теории поля, теории гравитации, космологии и гравитационно-волновыми исследованиями, а также студентов старших курсов, магистров и аспирантов.</p> <p>По вопросам приобретения обращайтесь: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru http://baumanpress.ru</p>