

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

DOI: 10.24888/2500-1957-2021-1-65-69

УДК
004.423.22

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ СИММЕТРИЧНОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ ЛИНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Гладких Ольга Борисовна
к.ф.-м.н., доцент
og1972@rambler.ru
г. Елец

Васильева Ирина Ивановна
преподаватель
irinaavsl@yandex.ru
г. Елец

Елецкий государственный университет
им. И.А. Бунина

Аннотация. Работа посвящена анализу зависимости диэлектрических свойств высокопроводящих анизотропных материалов от величины и направления магнитного поля. Рассматривается нелинейная модель распространения поверхностной электромагнитной волны в плоском волноводе из висмута, расположенном в квантующем магнитном поле. В результате моделирования формы линии магнитооптического эксперимента представлен программный комплекс на языке JavaScript для расчета диэлектрической проницаемости и тензора электропроводности висмута для каждого направления (бинарного, биссекторного и тригонального).

Ключевые слова: планарный волновод, электромагнитные волны в квантующем магнитном поле, алгоритм численного решения, магнитооптический эффект, коэффициент пропускания.

Кристаллическая структура висмута представляет собой решетку типа мышьяка с двумя атомами на элементарную ячейку. Из-за симметрии инверсии кристалла и симметрии относительно обращения времени все полосы двукратно вырождены по всей зоне Бриллюэна для нулевого магнитного поля. Каждая из трех электронных поверхностей Ферми по форме близка к эллипсоиду с отношением большой оси к малой примерно 15:1. Главные оси электронной поверхности Ферми повернуты вокруг двойной оси примерно на $+6^\circ$ от системы bbt , то есть k_x параллельна двойной оси, k_y составляет угол около 6° к оси биссектрисы, а k_z составляет угол 6° к тригональному направлению.

Несмотря на то, что электронные свойства висмута изучались достаточно много, теоретическое понимание не совсем соответствует реальности. Только недавно была прояснена путаница относительно соотношений между основными моделями энергетических зон. Хотя форма поверхностей Ферми и их положение в зоне Бриллюэна были определены, общее численное согласие между теорией и экспериментом довольно плохое.

В настоящей работе проводили моделирование решетки диэлектрической проницаемости для электронов и дырок (рис. 1). Анализ результатов показал, что лучше подбор значений диэлектрической проницаемости решетки для электронов, хуже – для дырок.

Поведение времени релаксации от магнитного поля аналогично зависимости диэлектрической проницаемости решетки от магнитного поля.

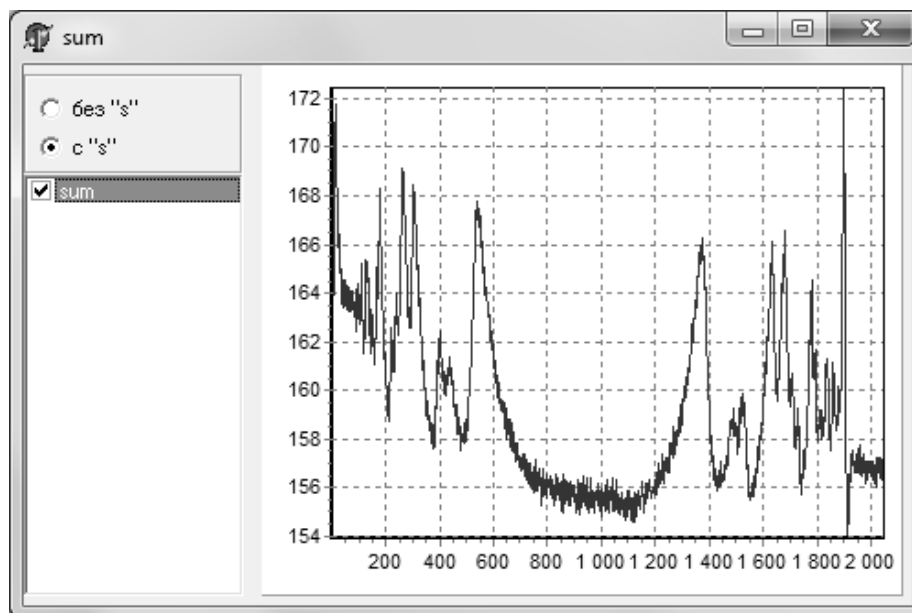


Рис. 1. Результаты моделирования формы магнитооптического эксперимента при ориентации магнитного поля вдоль бинарной оси

Численные расчеты могут привести к ошибкам или ошибкам в определении корней дисперсионного уравнения. Чувствительность результатов численных расчетов к первоначальному предположению решения позволяет сформировать мнение об устойчивости решения и косвенно о правильности нашей численной процедуры (2).

Program for calculating the characteristics of a strip line in the binary direction

```
60.00000001609416
100.00000002232873
100.00000002224773
5.683470156360677e-10
1.1890295557849245e-9
```

Рис. 2. Программа для расчета характеристик полосковой линии в бинарном направлении

В данной работе моделирование формы линии магнитооптического эксперимента заключалось в численном расчете коэффициента пропускания симметричной полосковой линии. Алгоритм расчета представлял собой решение системы уравнений Максвелла (1) с граничными условиями:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}, \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho, \quad (1)$$

где $\vec{E}, \vec{B}, \vec{D}, \vec{H}$ – векторы напряженности и индукции электрического и магнитного полей, $\vec{\nabla}$ – оператор градиента.

При решении секулярного уравнения, получающегося в результате подстановки предполагаемого решения в систему уравнений Максвелла, получим алгебраическое уравнение четвертой степени. Два из четырех корней этого уравнения соответствуют физически реальной ситуации, когда электромагнитная волна затухает, проникая в вещество. Эти корни и являются искомыми решениями. На рисунке 3 приведен график соответствующего решения.

В результате была получена формула для расчета коэффициента пропускания симметричной полосковой линии численными методами:

$$T = 2,27 \cdot e^{2L \cdot [Im(q_y(B)) - Im(q_y(0))]} \quad (2)$$

Таким образом, в работе рассматривалась нелинейная модель распространения поверхностной электромагнитной волны в планарном волноводе из висмута, находящемся в квантующем магнитном поле при температуре жидкого гелия. Решалось дисперсионное уравнение волны для каждого направления (бинарного, бисекторного и тригонального). В итоге, получена формула для расчета прохождения субмиллиметрового излучения через симметричную полосковую линию в зависимости от величины магнитного поля (2). По результатам исследования предложен алгоритм численного решения с помощью скриптового языка программирования JavaScript, разработаны сопутствующие приложения для оцифровки экспериментальных данных в графической форме (рис. 4).

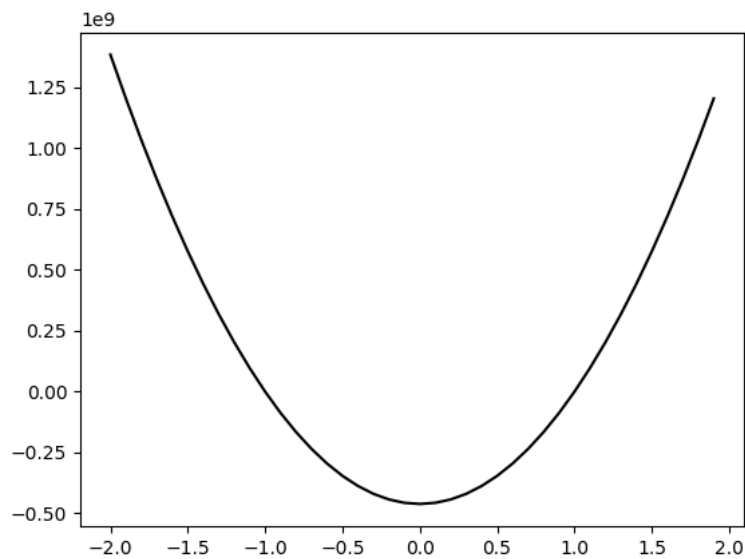


Рис. 3. График решения системы уравнений Максвелла

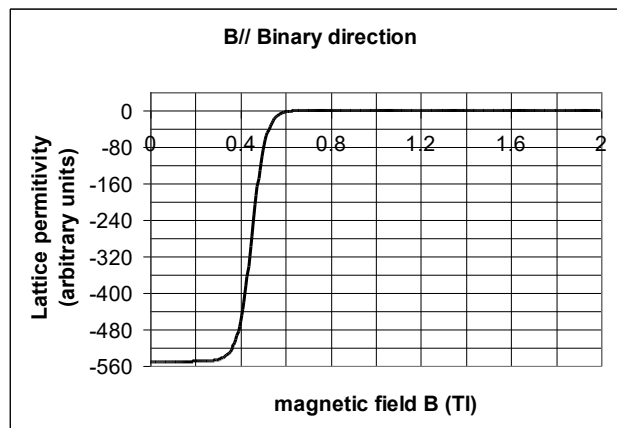


Рис. 4. Моделирование тензора диэлектрической проницаемости для электронов и дырок

Полученные результаты позволяют применить эту методику к широкому классу исследовательских задач и могут быть использованы для создания активных волноводных сред на основе сбалансированной полосковой линии, управляемой магнитным полем.

Построенная в настоящей работе нелинейная модель распространения поверхностной электромагнитной волны в планарном волноводе из висмута может быть использована для создания активных волноводных сред на основе симметричной полосковой линии, управляемой магнитным полем, а также для математического моделирования высокотехнологичных систем.

Список литературы

1. Васильева И.И., Гладких О.Б. Подход к нахождению параметров распространения поверхностной электромагнитной волны на основе численных методов моделирования // Научные технологии. 2018. №5. С. 49-55.
2. Васильева И.И., Масина О.Н. Особенности исследования зонной структуры висмута // Международный академический вестник. 2014. № 1. С. 45–51.
3. Васильева И.И. Моделирование физического процесса в висмуте с помощью языка программирования PYTHON // Материалы международной научно-практической конференции «Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования». Елец, 24 апреля 2019 г. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2019. С.134-138.
4. Choi K.H. Calculation of Landau levels and electronic properties of bismuth. Diss. doct. of phil. 1978. 128 p.
5. Lax V., Mavroides J.G., Zeiger H.J., Keyes R.I. Infrared magnetoreflexion in bismuth // Phys. Rev. Lett. 1960, 6 (5), 241-243.
6. McClure J.W., Choi K.H. Energy band model and properties of electrons in bismuth // Solid State Communications. 1977, 21, 1015-1018.
7. McClure J.W. The Energy Band Model for Bismuth: Resolution of a Theoretical Discrepancy // J. Low Temp. Phys. 1976, 5/6(25), 527-540.

CALCULATING THE TRANSMISSION COEFFICIENT OF A SYMMETRIC STRIP LINE AND MODELING THE DISTRIBUTION LINE FORM OF SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVE

O.B. Gladkikh

Ph.D., associate professor
og1972@rambler.ru

I.I. Vasilyeva

Lecturer
irinavsl@yandex.ru
Yelets

Bunin Yelets State University

Abstract. The work is devoted to the analysis of the dependence of the dielectric properties of highly conducting anisotropic materials from the magnitude and the direction of the magnetic field. A nonlinear model of propagation of a surface electromagnetic wave in a planar bismuth waveguide located in a quantizing magnetic field is considered. As a result of the simulation of the shape of the magneto-optical experiment line, a software package in the JavaScript language for calculating the dielectric constant and the bismuth conductivity tensor for each direction (binary, bisector and trigonal) is presented.

Keywords: planar waveguide, electromagnetic waves in a quantizing magnetic field, the numerical solution algorithm, a magneto-optical effect, transmission coefficient.

References

1. Choi, K.H. (1978). Calculation of Landau levels and electronic properties of bismuth // Diss. doct. of phil. 128 p.

2. Lax, B., Mavroides, J.G., Zeiger, H.J., Keyes, R.I. (1960) Infrared magnetoreflexion in bismuth // *Phys. Rev. Lett.* V. 5. № 6. 241-243.
3. McClure, J.W. (1976). The Energy Band Model for Bismuth: Resolution of a Theoretical Discrepancy. *J. Low Temp. Phys.*, 25. № 5/6 (25). 527-540.
4. McClure, J.W., Choi, K. H. (1977). Energy band model and properties of electrons in bismuth. *Solid State Communications*, 21, 1015-1018.
5. Vasilyeva, I.I. (2019). Modelirovanie fizicheskogo processa v vismute s pomoshch'yu yazyka programmirovaniya PYTHON [Modeling the physical process in bismuth using the PYTHON programming language]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sistemy upravleniya, tekhnicheskie sistemy: ustojchivost', stabilizaciya, puti i metody issledovaniya (24 aprelya 2019 g., Yelets)»* [Proceedings of international scientific-practical conference Control systems, technical systems: stability, stabilization, ways and methods of research (April 24, 2019, Yelets)], 134-138. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Vasilyeva, I. I., Gladkikh, O. B. (2018). Podhod k nahozhdeniyu parametrov rasprostraneniya poverhnostnoj elektromagnitnoj volny na osnove chislennyh metodov modelirovaniya [An Approach to Finding The Parameters of Propagation of a Surface Electromagnetic Wave Based on Numerical Modeling Methods] *Naukoemkie tekhnologii* [Science-intensive technologies], 5(19), 49-55. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Vasilyeva, I. I., Masina, O. N. (2014). Osobennosti issledovaniya zonnoj struktury vismuta [The Features of Investigation of Bismuth Band Structure] *Mezhdunarodnyj akademicheskij vestnik* [International Academic Bulletin], 1, 45–51. (In Russ., abstract in Eng.)

DOI: 10.24888/2500-1957-2021-1-69-80

УДК
004.89,
37.022

**ПОСТРОЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ
РАЗРАБОТКЕ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
ОБУЧАЮЩЕЙ СРЕДЫ, С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ И
УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Дружинина Ольга Валентиновна
д.ф.-м.н., профессор
ovdruzh@mail.ru
г. Москва

Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской
академии наук, Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук

Масина Ольга Николаевна
д.ф.-м.н., доцент
olga121@inbox.ru
г. Елец

Елецкий государственный университет
им. И.А. Бунина

Петров Алексей Алексеевич
к.т.н., ст. преподаватель
xeal91@yandex.ru
г. Елец

Аннотация. Направление, связанное с применением математического моделирования и интеллектуальных технологий в разработке методов и средств поддержки образовательных процессов, относится к числу актуальных научных направлений. Рассматриваются вопросы построения и анализа математических моделей, используемых при разработке гибридной