

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**КВАНТОВАЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА**

*Посвящается памяти академика
Роберта Арнольдовича Суриса*

Тезисы докладов молодежной конференции
по физике полупроводников
«Зимняя школа 2025»

Санкт-Петербург (г. Зеленогорск)
26 февраля – 2 марта 2025 года

Санкт-Петербург
2025

ББК 22.379

У25

Квантовая полупроводниковая электроника: тезисы докладов Молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2025», С.-Петербург (г. Зеленогорск), **26 февраля – 2 марта 2025 г.** – СПб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2025. – 101 с.

Сборник содержит тезисы докладов-лекций ведущих специалистов и тезисы докладов молодых ученых-физиков по материалам собственных оригинальных работ, представленных на Молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2025» (**26 февраля – 2 марта 2025 г.**). ФТИ им. А.Ф. Иоффе ежегодно проводит Зимнюю школу по физике полупроводников для аспирантов, молодых ученых и студентов старших курсов. В 2025 году конференция посвящена памяти Роберта Арнольдовича Сурица, основная тематика программы – квантовая полупроводниковая электроника. Традиционно включена лекция, посвященная Нобелевской премии по физике.

Издание рассчитано на широкий круг молодых исследователей, преподавателей соответствующих специальностей вузов, научных работников и инженеров, специализирующихся в области физики полупроводников.

Издание осуществлено на основе MS Word файлов, представленных авторами докладов, в процессе верстки исправлены только ошибки стилевого оформления.

Редакторы *П.А. Дементьев, Е.В. Куницына*

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук, 2025

Спиновый магнетизм полупроводников с квазилокализованными электронами

Н.А. Поклонский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Гипотезе о наличии у электрона собственного момента импульса (спина) в этом году исполняется сто лет (см. эссе [1, 2]). Экспериментально и теоретически установлено, что спиновый магнитный момент находящегося в вакууме электрона антипараллелен моменту импульса и пропорционален ему.

В начале лекции дается краткий очерк истории открытия и исследования обусловленных спином электрона резонансных явлений: от попыток наблюдения электронного спинового резонанса (ЭСР), иначе парамагнитного резонанса [3–6], до экспериментальной регистрации Е.К. Завойским сигнала ЭСР в конденсированных системах [7, 8] и прецизионного измерения [9, 10] фактора спектроскопического расщепления (g -фактора [11]) одиночного электрона в вакууме $g_e \approx -2.0023193$ [12]. В физике конденсированного состояния вещества для электрона используется обратный выбор знака g -фактора, т. е. $g > 0$, когда вектор спинового магнитного момента электрона параллелен вектору напряженности внешнего магнитного поля. Обсуждается практическое применение ЭСР-спектроскопии [13–15]. Отмечается роль спинового резонанса электронов в становлении и развитии квантовой электроники [16].

Далее излагаются три аспекта проявления магнитной активности нескомпенсированных спиновых магнитных моментов электронов, квазилокализованных на одиночных атомах примеси и консолидированных атомных дефектах в немагнитных матрицах с ионно-ковалентными и ковалентными химическими связями между атомами.

1. Исходя из теоремы вириала [17, 18], в квазиклассическом приближении квантовой механики [19, 20] проведен расчет увеличения термической энергии ионизации водородоподобных доноров в прямозонных кристаллических полупроводниках n -InSb:Te и n -GaAs:Se при увеличении напряженности внешнего квантующего магнитного поля [21]. В этих полупроводниковых материалах спиновый магнитный момент электрона s -зоны (иначе «кристаллического» электрона) в основном состоянии антипараллелен напряженности внешнего магнитного поля, т. е. $g < 0$. Фактор спектроскопического расщепления и для оптического электрона электрически нейтрального донора (Te) в антимониде индия $g < 0$, и для оптического электрона донора (Se) в арсениде галлия $g < 0$. (Оптический электрон донора не образует химической связи с атомами кристаллической матрицы.) В расчете учитывалось уменьшение энергии ионизации электронейтральных доноров вследствие формирования из их возбужденных состояний квазинепрерывной полосы разрешенных значений энергии для электронов s -зоны [22].

2. В спектре стационарного (CW) электронного спинового резонанса свободных поликристаллических пленок CVD-алмаза, облученных быстрыми реакторными нейтронами флюенсом $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, выделены сигналы [23, 24] от ассоциатов радикалов (нескомпенсированных электронных спиновых магнитных моментов радиационных дефектов). В рамках модели уединенных скоплений радикалов объяснено появление в спектре ЭСР трех новых линий (g -факторы: $g_h \approx 1.7$, $g_l \approx 2.7$ и $g_f \approx 4.3$) парамагнитного поглощения микроволнового электромагнитного излучения во внешнем магнитном поле. При этом наблюдался также сигнал ($g_{rd} \approx 2.0026$) от уединенных точечных радиационных дефектов (оборванных C–C химических связей). Исходные (не облученные нейтронами) пленки не содержали атомов магнитных примесей (Co, Fe, Ni), и в них ферромагнетизм на фоне диамагнетизма углеродной матрицы не проявлялся (см. также [25]). В работе [26] сигнал ($g_{mc} \approx 4.3$) электронного парамагнитного (спинового) резонанса ассоциируется с одиночными магнитными гранулами (Fe, Co и CoFeB) нанометровых размеров в диэлектрической матрице из оксидов алюминия и кремния.

3. При измерении вибрационным магнетометром облученных нейтронами флюенсом $\approx 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ образцов природного алмаза типа Па (всего 113 штук со средним диаметром одного образца $\approx 0.5 \text{ мм}$) в интервале температур 2–100 К выявлено ферромагнитное упорядочение нескомпенсированных электронных спинов радиационных дефектов [27]. При перемагничивании образцов в интервале температур 2–4 К проявляется немонотонная зависимость дифференциальной магнитной восприимчивости от индукции внешнего магнитного поля, обусловленная магнитокалорическим эффектом. Обсуждается проявление в спиновом магнетизме прыжковой миграции электронов по дефектам структуры разупорядоченных радиацией углеродных материалов.

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Ф23РНФ-049) и ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» (задание 1.8.2).

Литература

- [1] С. Гаудсмит. УФН, **93**(1), 151–158 (1967).
- [2] П. Каш. УФН, **93**(1), 159–175 (1967).
- [3] К.Я. Гортер. УФН, **53**(4), 545–576 (1954).
- [4] М.А. Ельяшевич. УФН, **54**(4), 513–549 (1954).
- [5] А. Кастлер. В сб. Парамагнитный резонанс (Наука, М., 1971) С. 9–15.
- [6] С.А. Альшулер, Б.М. Козырев. В сб. Парамагнитный резонанс (Наука, М., 1971) С. 25–31.
- [7] Е.К. Завойский. Природа, **8**, 2–14 (1967).
- [8] А.В. Кессених. УФН, **179**(7), 737–764 (2009).
- [9] Г. Крейн. УФН, **96**(1), 153–167 (1968).
- [10] Ф. Экстром, Д. Вайнлэнд. УФН, **134**(4), 711–730 (1981).
- [11] Ю.Н. Демков, Т.К. Ребане. Оптика и спектроскопия, **71**(5), 714–716 (1991).
- [12] CODATA Internationally recommended 2022 values of the Fundamental Physical Constants, <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/>.

- [13] А.Л. Бучаченко. УФН, **189**(1), 47–54 (2019).
- [14] Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, О.Н. Поклонская, Н.М. Лапчук, С. Мунхцэцэг. ЖПС, **80**(3), 379–384 (2013).
- [15] G.R. Eaton, S.S. Eaton, D.P. Barr, R.T. Weber. Quantitative EPR (Springer, Wien, 2010).
- [16] А.А. Маненков. УФН, **176**(6), 669–673 (2006).
- [17] Б.В. Васильев, В.Л. Любошиц. УФН, **164**(4), 367–374 (1994).
- [18] В.Л. Любошиц. Сообщения Объединенного института ядерных исследований, **P4-96-221**, 1–18 (1996).
- [19] Э.В. Шпольский. Атомная физика: в 2 т. (Лань, СПб., 2010).
- [20] Е.А. Краснопецев. Квантовая механика в приложениях к физике твердого тела. (НГТУ, Новосибирск, 2017).
- [21] Н.А. Поклонский, А.Н. Деревяго, С.А. Вырко. Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук, **56**(2), 239–252 (2020).
- [22] Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.Н. Деревяго. Журнал БГУ. Физика, **2**, 28–41 (2020).
- [23] О.Н. Поклонская. Докл. НАН Беларуси, **57**(5), 49–54 (2013).
- [24] О.Н. Поклонская. Вестник БГУ. Сер. 1: Физ. Мат. Информ., **2**, 60–65 (2013).
- [25] A.N. Taldenkov, A.V. Inyushkin, E.A. Chistotina, V.G. Ralchenko, A.P. Bolshakov, E.N. Mokhov. EPJ Web of Conferences (MISM 2017), **185**, 04007 (2018).
- [26] А.Б. Дровосеков, Н.М. Крейнс, Д.А. Зигануров, А.В. Ситников, С.Н. Николаев, В.В. Рыльков. ЖЭТФ, **164**, (4(10)), 650–661 (2023).
- [27] N.A. Poklonski, A.A. Khomich, I.A. Svito, S.A. Vyrko, O.N. Poklonskaya, A.I. Kovalev, M.V. Kozlova, R.A. Khmel'nitskii, A.V. Khomich. Appl. Sci., **13**(10), 6221 (2023).

Оптические резонансы в современной фотонике

Н.А. Гиппиус

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Фотонно-кристаллические слои представляют собой слоистые структуры с периодической модуляцией диэлектрической проницаемости в плоскости слоёв и могут быть изготовлены с использованием хорошо развитых микро- и нанотехнологий. Возможность управления дисперсионными свойствами этих структур за счёт модификации архитектуры элементарной ячейки открывает широкие возможности для применения этих систем в качестве базовых элементов фотоники.

Модальный метод Фурье (ФММ) (или метод матрицы рассеяния) является очень эффективным инструментом для изучения оптических свойств многослойных вертикально-инвариантных периодических структур [1–6]. Однако для задач, требующих интегрирования по волновым векторам в плоскости структуры, необходимость многочисленных однотипных расчётов снижает эффективность этого метода.

В этой работе рассматривается возможность существенного ускорения расчётов оптических свойств фотонных структур за счёт использования резонансного прибли-