

# Влияние гибридизации примесных электронных состояний на квантовые магнитоосцилляционные явления в селениде ртути с примесями железа

Г.А. Альшанский<sup>1</sup>, Т.Е. Говоркова<sup>1</sup>, В.И. Окулов<sup>1</sup>, А.В. Королев<sup>1</sup>,  
С.Ю. Паранчич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620041, Россия

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет, ул. Коцюбинского, 2, г. Черновцы, 58012  
E-mail: okulov@imp.uran.ru

Статья поступила в редакцию 30 декабря 2007 г.

Проведено экспериментальное исследование концентрационных зависимостей параметров квантовых осцилляций Шубникова–де Гааза и де Гааза–ван Альфена в кристаллах селенида ртути с примесями железа в условиях, когда донорный резонансный уровень энергии примесей попадает в полосу проводимости и происходит гибридизация электронных состояний. В полученных концентрационных зависимостях температуры Дингла и  $g$ -фактора электронов обнаружены минимумы, коррелирующие по своему положению с максимумом электронной подвижности. Показано, что наблюдаемые аномалии можно объяснить на основе развитой ранее теории эффектов гибридизации.

Проведено експериментальне дослідження концентраційних залежностей параметрів квантових осциляцій Шубнікова–де Гааза і де Гааза–ван Альфена в кристалах селеніда ртуті з домішками заліза в умовах, коли донорний резонансний рівень енергії домішок потрапляє в смугу провідності та відбувається гібридизація електронних станів. У отриманих концентраційних залежностях температури Дінгла і  $g$ -фактора електронів виявлено мінімуми, що корелюють по своєму положенню з максимумом електронної рухливості. Показано, що аномалії, які спостерігаються, можна пояснити на основі розвинутої раніше теорії ефектів гібридизації.

PACS: 72.10.Fk Рассеяние точечными дефектами, дислокациями, поверхностями и другими несовершенствами (в том числе эффект Кондо);  
72.20.Dр Общая теория, механизмы рассеяния;  
72.80.Еу Полупроводники III–V и II–VI групп.

Ключевые слова: температура Дингла,  $g$ -фактор, квантовые осцилляции, гибридизация электронных состояний, резонансное рассеяние электронов.

## Введение

Проведенные в последнее время исследования роли гибридизации электронных состояний на примесях переходных элементов в полосе проводимости селенида ртути привели к разработке последовательного количественного описания ряда наблюдавшихся эффектов и обнаружению новых закономерностей [1–3]. Особенно большой объем данных получен на селениде ртути с примесями железа – объекте, который оказался особенно подходящим для проверки теорети-

ческих представлений физики гибридизированных состояний. Благодаря этому появились предпосылки для достоверного определения параметров резонансного вклада в электронную плотность состояний от донорного  $d$ -уровня примесей железа. Значительную роль в решении такой проблемы может сыграть интерпретация экспериментальных данных по квантовым осцилляциям Шубникова–де Гааза и де Гааза–ван Альфена. Получению такого рода данных посвящена настоящая работа. В итоге детального анализа экспериментальных осцилляционных зависимостей нами

найден надежное подтверждение существования концентрационного минимума температуры Дингла, уже исследовавшегося ранее для осцилляций проводимости [3]. Кроме того, обнаружен концентрационный минимум  $g$ -фактора, который объясняется аномалией магнитной восприимчивости локализованной части электронной плотности, исследованной в работе [4]. Полученные результаты послужат основанием для развития теории квантовых явлений в системах с гибридизованными состояниями.

### Экспериментальные результаты и их интерпретация

Квантовые осцилляции магнитосопротивления и магнитной восприимчивости исследовали в магнитных полях напряженностью до 50 кЭ в интервале температур  $1,3 \text{ K} < T < 4,2 \text{ K}$  на двух сериях образцов с различным содержанием железа, на которых ранее были проведены эксперименты по подвижности электронов проводимости. Методика эксперимента была аналогична применявшейся в работе [3]. Измерения осциллирующей в зависимости от напряженности магнитного поля магнитной восприимчивости проведены в центре магнитометрии Института физики металлов УрО РАН.

Полученные полевые зависимости сопротивления для образца с концентрацией примесей  $N_{\text{Fe}} = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  в зависимости от направления магнитного поля при  $T = 4,2 \text{ K}$  показаны на рис. 1, 2. Из зависимостей амплитуд осцилляций от магнитного поля найдены значения температуры Дингла  $T_D$ . Для определения этого параметра проводили обработку данных на таких образцах, у которых зависимость амплитуд осцилляций от поля была только монотонно возрастающей, о чем свидетельствовало отсутствие узлов биений в осцилляционной картине при выбранном направлении поля  $H \parallel [100]$  и тока через образец.

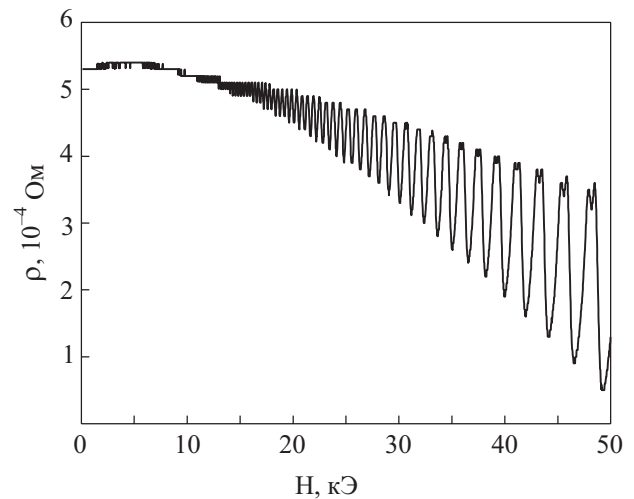


Рис. 2. Осцилляции Шубникова–де Гааза для образца HgSe:Fe с концентрацией Fe  $N_{\text{Fe}} = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 4,2 \text{ K}$  и направлении тока вдоль оси  $[110]$ ,  $H \parallel [110]$ .

литуд осцилляций от поля была только монотонно возрастающей, о чем свидетельствовало отсутствие узлов биений в осцилляционной картине при выбранном направлении поля  $H \parallel [100]$  и тока через образец. На рис. 3 приведены значения температуры Дингла, показывающие ее зависимость от концентрации примесей железа. Полностью аналогичные данные получены для осцилляций магнитной восприимчивости.

Появление дублетной структуры максимумов осцилляций магнитосопротивления при направлении магнитного поля  $H \parallel [110]$  позволило экспериментально определить спиновое расщепление уровней Ландау. По положениям осцилляционных максимумов

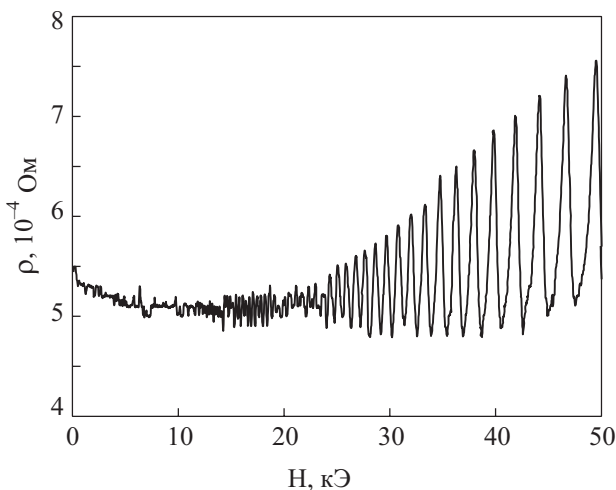


Рис. 1. Осцилляции Шубникова–де Гааза для образца HgSe:Fe с концентрацией Fe  $N_{\text{Fe}} = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 4,2 \text{ K}$  и направлении тока вдоль оси  $[100]$ ,  $H \parallel [100]$ .

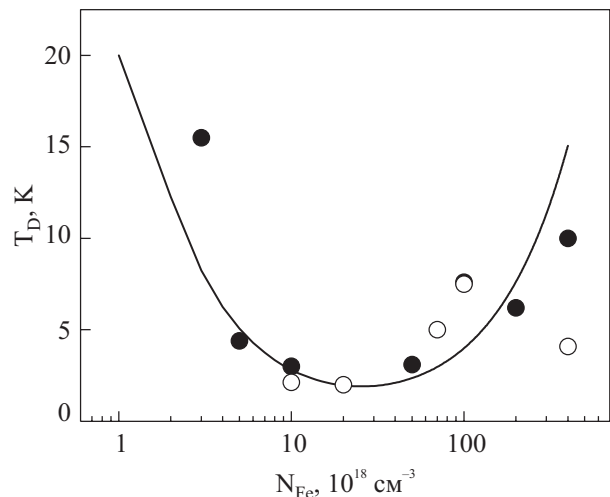


Рис. 3. Зависимость температуры Дингла  $T_D$  от концентрации примесей железа  $N_{\text{Fe}}$  для образцов HgSe:Fe. Точки — экспериментальные данные, различные символы относятся к двум сериям образцов. Сплошная линия — теоретическая кривая, полученная по формуле (1) при  $\alpha = 0,06$

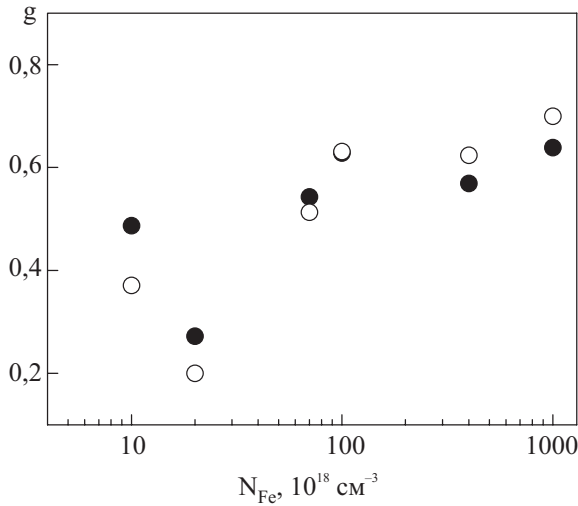


Рис. 4. Зависимость спинового расщепления ( $g$ -фактора) от концентрации железа для HgSe:Fe при  $T$ , К: 2,2 (○), 4,2 (●).

мов рассчитаны значения  $g$ -фактора электронов для различных концентраций примесей, которые представлены на рис. 4. Наблюдаемые аномалии концентрационных зависимостей  $T_D$  и  $g$ -фактора коррелируют с концентрационным максимумом подвижности и объясняются проявлением резонансного энергетического уровня примесей железа в полосе проводимости селенида ртути и существованием гибридных электронных состояний вблизи уровня Ферми.

Для количественного описания концентрационной зависимости температуры Дингла применена теория, основы которой детально изложены в статье [2]. Согласно разработанной теоретической интерпретации, формулу для температуры Дингла можно записать в следующем виде:

$$T_D(0) = T_{D0} (2n_0 / n_i) [\alpha + \sin^2(\pi n_0 / n_i)], \quad (1)$$

где  $\alpha$  — параметр, описывающий вклад нерезонансных фаз;  $n_i$  — концентрация примесей;  $n_0$  — предельная концентрация электронов проводимости.

Подгонка теоретической кривой, описываемой этим выражением, к наблюдаемому концентрационному минимуму температуры Дингла дала значение параметра  $\alpha = 0,06$ , согласующееся со значением данного параметра при количественном анализе электронной подвижности. Положение минимума концентрационной зависимости температуры Дингла совпадает с максимумом подвижности и соответствует значению концентрации примесей железа  $N_{Fe} = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Концентрационная зависимость  $g$ -фактора обусловлена обменным взаимодействием электронов в локализованных и делокализованных состояниях и от-

ражает соответствующую зависимость магнитной восприимчивости локализованных состояний, исследованную в работе [4]. Обнаружение в этой работе концентрационного максимума восприимчивости создает основу для объяснения наблюдаемой в квантовых осцилляциях аномалии  $g$ -фактора. Однако для полной количественной интерпретации такой аномалии требуется еще определенное развитие теоретического подхода в описании квантовых эффектов в системах с гибридными состояниями.

### Заключение

В итоге анализа полученных в экспериментах осцилляционных зависимостей магнитосопротивления кристаллов селенида ртути с различным содержанием примесей железа нами найдено надежное подтверждение существования концентрационного минимума температуры Дингла. Впервые был обнаружен концентрационный минимум  $g$ -фактора электронов, который объясняется аномалией магнитной восприимчивости локализованной части электронной плотности, исследованной в работе [4]. В целом изложенные результаты вместе с полученными ранее в работах [1–3] составляют совокупность экспериментальных данных, обоснованно связываемых с проявлением гибридизации электронных состояний на примесях переходных элементов в полосе проводимости селенида ртути и согласованно описываемых на основе предложенного теоретического подхода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №06-02-16919.

1. В.И. Окулов, Л.Д. Сабирзянова, Э.З. Курмаев, Л.Д. Финкельштейн, Р.Ф. Каримов, А. Мувес, С.Ю. Паранчич, *Письма в ЖЭТФ* **81**, 80 (2005).
2. В.И. Окулов, *ФНТ* **30**, 1194 (2004).
3. В.И. Окулов, Л.Д. Сабирзянова, К.С. Сазонова, С.Ю. Паранчич, *ФНТ* **30**, 441 (2004).
4. В.И. Окулов, Е.А. Памятных, А.В. Гергерт, *ФММ* **101**, 11 (2006).

### The influence of hybridization of impurity electron states on quantum magneto-oscillation phenomena in mercury selenide with iron impurities

G.A. Alshanskii, T.E. Govorkova, V.I. Okulov, A.V. Korolyov, and S.Yu. Paranchich

The concentration dependences of the parameters of Shubnikov–de Haas and de Haas–van Alphen quantum oscillations were experimentally studied under conditions, where the donor level falls within the conduction band, resulting in hybridi-

zation of electronic states. The dependences of Dingle temperature and  $g$ -factor of electrons reveal minima that correlate in their position with the maximum of electron mobility. It is shown that the anomalies observed can be explained using the theory of hybridization effects.

PACS: 72.10.Fk Scattering by point defects, dislocations, surfaces, and other imperfections (including Kondo effect);  
72.20.Dp General theory, scattering mechanisms;  
72.80.Ey III–V and II–VI semiconductors.

Keywords: Dingle temperature,  $g$ -factor, quantum oscillations, hybridization of electronic states, resonance dispersion of electrons.