

ОСЦИЛЛЯЦИИ ШУБНИКОВА—ДЕ-ГААЗА В $Pb_{1-x}Mn_xTe$ Анрианов Д. Г., Белокопъ С. А., Климонский С. О.,
Лакеенков В. М.

В твердых растворах $Pb_{1-x}Mn_xTe$ p -типа проводимости ($x=0.0037, 0.010$) исследованы осцилляции Шубникова—де-Гааза поперечного магнитосопротивления в магнитном поле, параллельном оси [001]. Для образцов с $x=0.010$ обнаружены биения осцилляций. Период биений зависит от величины магнитного поля и температуры, что связывается с обменным взаимодействием свободных дырок с локализованными магнитными моментами (ЛММ). При этом он оказывается тем больше, чем больше дифференциальная магнитная восприимчивость материала. Обсуждаются возможные причины существования биений. Отмечается, что для понимания механизма их возникновения наряду с диагональными членами обменного взаимодействия необходимо учитывать также недиагональные. Установлено, что на период биений оказывает влияние процесс старения твердых растворов, заключающийся в усилении их ближнего расслоения. При длительном хранении образцов это приводит к увеличению периода биений и усилению его зависимости от температуры.

По сравнению с хорошо известными соединениями $A_{1-x}Mn_xB^{VI}$ твердые растворы $Pb_{1-x}Mn_xTe$, также являющиеся полумангнитными полупроводниками, исследованы значительно слабее. Характерные свойства, связанные с обменным взаимодействием свободных носителей заряда с ЛММ, изучались для n - $Pb_{1-x}Mn_xTe$ магнитотранспортными и магнитооптическими методами в работах [1-3]. В работе [1] для некоторых из исследованных образцов было обнаружено смещение с температурой экстремумов осцилляций Шубникова—де-Гааза (ШГ). В настоящей работе выполнены исследования осцилляций ШГ поперечного магнитосопротивления для монокристаллических образцов p -типа проводимости в магнитном поле $H \parallel [001]$. Монокристаллы выращивались по методу Чохральского. Характеристики образцов приведены в таблице.

Параметры исследованных образцов

№ образца	x	t	$\rho \cdot 10^5, \text{ Ом} \cdot \text{ см}$		$p \cdot 10^{-18}, \text{ см}^{-3}$		$\mu \cdot 10^{-4}, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{ с}$
1	0.010	3 месяца	6.4	6.0	4.35	4.44	2.3
2	0.010	17 месяцев	6.0	6.0	4.35	4.28	2.4
3	0.010	6 лет	7.1	8.0	4.20	4.25	2.0
4	0.0037	10 лет	3.2	2.9	4.78	5.01	4.2

Примечание. t — время хранения образцов после выращивания монокристаллов; ρ — их удельное сопротивление при $T=4.2 \text{ К}$; p и μ — холловские концентрация и подвижность свободных дырок при $T=4.2 \text{ К}$ соответственно. Для ρ и p приведены по два значения, соответствующих двум парам контактов, для μ — средние значения.

На рис. 1 показаны осцилляции ШГ для образца 3 ($x=0.010$), записанные при разных температурах. Осцилляции имеют биения, которые, насколько нам известно, ранее не наблюдались в твердых растворах на основе $PbTe$. Положение узлов биений, отмеченных на рисунке стрелками, контролировалось на фазе осцилляций. На рис. 2, где представлено положение экстремумов осцилляций ШГ в обратном поле, в местах существования узлов, отмеченных стрелками, хорошо видны ступеньки, соответствующие изменению фазы осцил-

ляций на 180° . Появление по крайней мере одного узла на кривых осцилляций может быть, в принципе, связано с нечеткой ориентацией образца в магнитном поле, однако повторные измерения с его перемонтажом подтвердили отсутствие такого рода ошибки. Период биений, определяемый как расстояние между соседними узлами в обратном поле, был при этом воспроизведен с точностью 3 %.

Как видно из рис. 1, период биений немонотонно зависит от температуры: уменьшается как при повышении температуры выше 5 К, так и при понижении ее ниже 4 К. Зависимость картины осцилляций ШГ от температуры является одним из отличительных признаков полумангнитных полупроводников и объясняется обменным взаимодействием свободных носителей заряда с ЛММ [1]. Из-за обменного взаимодействия уровни Ландау нелинейно смещаются с ростом напряженности магнитного поля и может происходить взаимное пересечение уровней с различным направлением спинов, приводящее к биениям осцилляций.

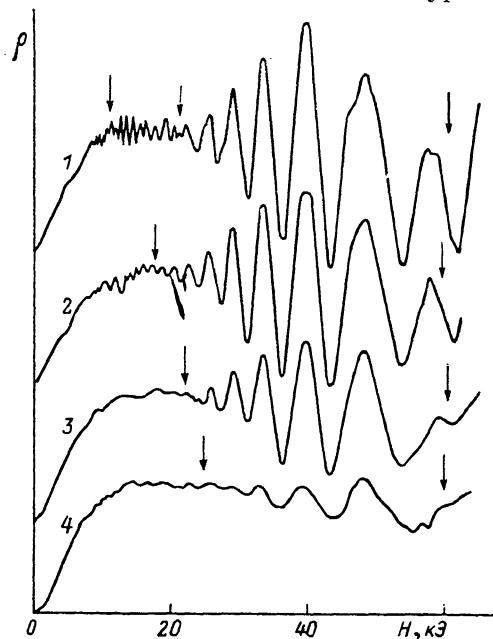


Рис. 1. Осцилляции ШГ на кривых поперечного магнитосопротивления $\rho(H)$ для образца 3.

T , К: 1 — 1.9, 2 — 4.2, 3 — 8.0, 4 — 15.0.

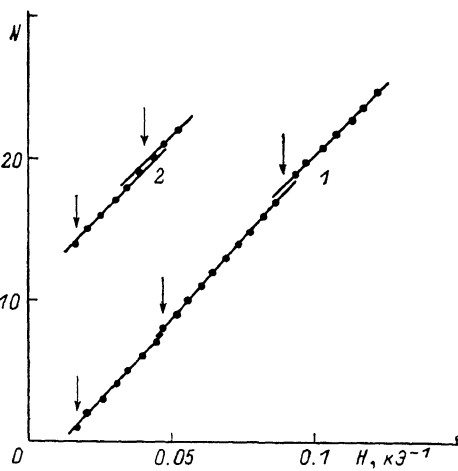


Рис. 2. Положение максимумов осцилляций ШГ в обратном магнитном поле для образца 3.

N — номер максимума, 1, 2 произвольно сдвинуты по вертикали. T , К: 1 — 1.9, 2 — 15.0.

Однако сопоставление периода наблюдавшихся нами биений с намагниченностью $Pb_{1-x}Mn_xTe$ [4] показывает, что связанная с ней часть обменного взаимодействия не является причиной биений, а, напротив, препятствует им, увеличивая период биений при понижении температуры до 5 К тем больше, чем больше дифференциальная магнитная восприимчивость. При $T < 4$ К дифференциальная магнитная восприимчивость в магнитном поле $H > 30$ кЭ начинает убывать вследствие насыщения намагниченности [4] и соответственно период биений также убывает. При этом в более слабых магнитных полях он должен быть больше, что справедливо для кривой 1 (рис. 1), имеющей три узла: в сильных полях период биений ≈ 0.030 кЭ $^{-1}$, а в слабых ≈ 0.042 кЭ $^{-1}$.

Мы полагаем, что увеличение периода биений осцилляций ШГ под влиянием связанных с намагниченностью членов обменного взаимодействия в $Pb_{1-x}Mn_xTe$ происходит аналогично тому, как это наблюдалось ранее в $Hg_{1-x}Fe_xSe$ [5]. В работе [5] дано качественное объяснение этого явления. Различие, однако, состоит в том, что причина биений в $Hg_{1-x}Te_xSe$ не связана с присутствием магнитной примеси [5]. Они наблюдаются также и при $x=0$ и возникают из-за отсутствия центра инверсии у кристаллической решетки, что приводит к существованию двух близких по площади экстремальных сечений поверхности Ферми. В $Pb_{1-x}Mn_xTe$ биения могли бы возникнуть из-за неэквивалентности

четырёх экстремумов валентной зоны, расположенных в L -точках зоны Бриллюэна. Это было бы возможно, если бы при введении марганца симметрия кристаллической решетки понижалась по сравнению с PbTe (структура NaCl). Однако в литературе отсутствуют данные, которые свидетельствовали бы о более низкой, чем в PbTe , симметрии решетки в $\text{Pb}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{Te}$. Желая проверить, не испытывает ли исследуемый материал структурный фазовый переход при понижении температуры, мы записали для образца 3 зависимость сопротивления от температуры $\rho(T)$ (рис. 3), но не нашли никаких аномалий. Мы считаем поэтому маловероятным, чтобы биения осцилляций ШГ в $\text{Pb}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{Te}$ были связаны с особенностями кристаллической структуры материала.

Для понимания причин возникновения биений наряду с диагональными, связанными с намагниченностью членами обменного взаимодействия дырок с ЛММ необходимо учитывать также недиагональные члены, описывающие взаи-

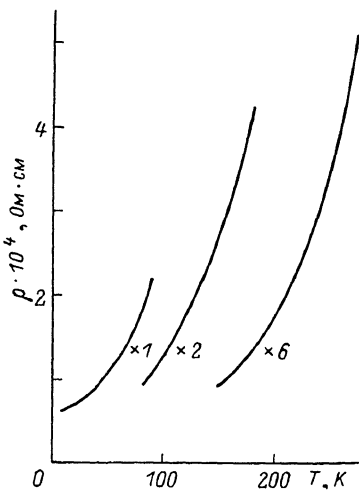


Рис. 3. Зависимость $\rho(T)$ для образца 3.

Цифрами обозначено, во сколько раз масштаб кривых по вертикали уменьшен по сравнению с указанным на оси ординат.

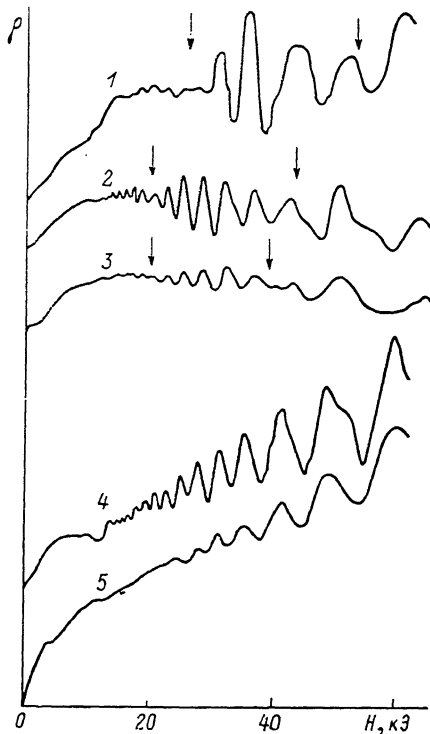


Рис. 4. Осцилляции ШГ для образцов 1 (1), 2 (2, 3) и 4 (4, 5).

По сравнению с рис. 1 масштаб кривых 1, 4, 5 уменьшен по вертикали в 2.5, кривых 2, 3 — в 1.5 раза. T, K : 1, 2, 4 — 4.2; 3, 5 — 8.0.

модействие с переворотом спина. В работах [6] было показано, что их учет приводит к расщеплению валентной зоны $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ при $H=0$, а в больших магнитных полях спиновое расщепление оказывается больше обычного (того, которое было бы при отсутствии обменного взаимодействия) на величину ΔE_s , не зависящую от H при $H > 20$ кЭ. Существование расщепления ΔE_s дает характерные эффекты «свободных магнитных поляронов» [3] и может быть достаточной причиной для возникновения биений осцилляций ШГ. В самом деле, для двух проекций спина мы получим тогда два различных периода осцилляций ШГ

$$\left(\Delta \frac{1}{H}\right)_{\pm} = \frac{e\hbar}{m_c c (E_F \pm \frac{1}{2}\Delta E_s)} \quad (1)$$

(m_c — циклотронная масса, E_F — уровень Ферми). Это приведет к биениям, период которых будет примерно в $E_F/\Delta E_s$ раз больше периода осцилляций. Однако и в данном подходе возникают трудности при объяснении температурной зависимости периода биений: по расчетам [6], с ростом температуры ΔE_s убывает, что должно было бы приводить к увеличению, а не к уменьшению периода биений. Возможно, противоречие связано с тем, что автор работ [6]

допустил неточность, предполагая более резкое насыщение намагниченности при $H > 20$ кЭ, чем оно есть на самом деле [4]. Соответствующая поправка, вероятно, приведет к тому, что результат о постоянстве величины ΔE_c при $H > 20$ кЭ окажется ошибочным. Для описания биений в этом случае необходим расчет движения в магнитном поле отдельных квантовых уровней.

На рис. 4 кривые 1—3 также получены для образцов с $x=0.010$, но взятых из другого слитка. Оба слитка содержали одинаковое количество марганца по закладке в шихту и по данным химического анализа. Однако если первый слиток (рис. 1) был выращен за 6 лет до настоящих исследований, то для второго кривая 1 на рис. 4 была записана через 3 месяца, а кривые 2, 3 — через 17 месяцев после его выращивания (см. образцы 1, 2 в таблице). Периоды биений для кривых 1, 2 на рис. 4 и кривой 2 на рис. 1, записанных при $T=4.2$ К, составили соответственно 0.019, 0.028 и 0.041 кЭ⁻¹, т. е. имеется тенденция к увеличению периода биений с течением времени. Заметим также, что для образцов 1, 2 зависимость периода биений от температуры (рис. 4, кривые 2, 3) была более слабой, чем для образца 3 (рис. 1). Ниже $T=4$ К эта зависимость не наблюдалась совсем. Существование в исследованных монокристаллах процессов старения при комнатной температуре было установлено ранее в работе [7] при измерениях парамагнитной температуры Кюри. Согласно [7], в твердых растворах $Pb_{1-x}Mn_xTe$ наблюдается близкое расслоение, которое усиливается со временем при хранении образцов. Другими словами, происходит увеличение размеров кластеров марганца. Этот процесс, видимо, оказывает влияние и на осцилляции ШГ. Необходимо поэтому дальнейшее развитие теории осцилляций, которая учитывала бы близкое расслоение твердых растворов. При этом следует рассмотреть возможность частичной локализации свободных носителей на кластерах марганца.

Кривые 4, 5 на рис. 4 приведены для образца 4 с $x=0.0037$. Период осцилляций для этого образца, как и для всех предыдущих, примерно соответствовал холловской концентрации дырок. Биения для образца 4 обнаружены не были. Если они обусловлены обменным взаимодействием, то этот результат естественно было ожидать, так как с уменьшением концентрации марганца период биений должен был бы возрасти и ни одного узла могло бы не оказаться в пределах записи осцилляций. Из-за ослабления влияния обменного взаимодействия с ЛММ сколько-нибудь заметных изменений с температурой формы и положения пиков осцилляций для образца 4 также не было найдено.

По сравнению с образцами 1—3 для образца 4 кривые магнитосопротивления начинают приближаться к характерным для $PbTe$ зависимостям $\rho(H)$, не имеющим насыщения. Отсутствие насыщения магнитосопротивления, как известно [8], связывается с неоднородностью $PbTe$. По той же причине в нелегированном $PbTe$ не наблюдаются осцилляции ШГ. В то же время четкое насыщение магнитосопротивления, большая амплитуда осцилляций ШГ, их идентичность на разных парах контактов, а также совпадение полученных на разных парах контактов значений ρ и r (см. таблицу) свидетельствуют о высокой однородности образцов с $x=0.010$.¹ Можно поэтому заключить, что сложный вид осцилляций ШГ в $Pb_{0.99}Mn_{0.01}Te$ связан со сложностью квантования валентной зоны при наличии обменного взаимодействия с ЛММ, но не с плохим качеством исследованных образцов. На основании величины периодов биений осцилляций для образцов 1—3 можно дать оценку соответствующего расщепления валентной зоны $\Delta E_v \sim 5-10$ мэВ, что согласуется с величиной $\Delta E_v - \Delta E_c \simeq 4$ мэВ (ΔE_c — аналогичное расщепление зоны проводимости), определенной в работе [3] при $T=4.2$ К.

Л и т е р а т у р а

- [1] Niewodniczanska-Zawadzka J., Kossut J., Sandauer A., Dobrowolski W. — Lect. Not. Phys., 1982, v. 152, p. 326—329.
 [2] Niewodniczanska-Zawadzka J., Elsinger G., Palmethofer L., Lopez-Otero A., Fantner E. J., Bauer G., Zawadzki W. — Physica, 1983, v. BC117-118, pt 1, p. 458—460.

¹ Погрешности измерений ρ и r составляли примерно ± 7 и ± 3 % соответственно.

- [3] Pascher H., Fantner E. J., Bauer G., Zawadzki W., von Ortenberg M. — Sol. St. Commun., 1983, v. 48, N 5, p. 461—465.
- [4] Anderson F. R., Gorska M. — Sol. St. Commun., 1984, v. 52, N 6, p. 601—605.
- [5] Глузман Н. Г., Сабирзянова Л. Д., Цидильковский И. М., Паранчич Л. Д., Паранчич С. Ю. — ФТП, 1986, т. 20, в. 1, с. 94—98.
- [6] Von Ortenberg M. — Sol. St. Commun., 1984, v. 52, N 2, p. 111—115; Acta Phys. Polon., 1986, v. A69, N 6, p. 977—987.
- [7] Андриянов Д. Г., Кузнецов В. Д., Климонский С. О., Бурдакин А. А. — ФТП, 1987, т. 21, в. 6, с. 1106—1111.
- [8] Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS. М., 1968. 384 с.

Государственный научно-исследовательский
и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Получена 27.04.1987
Принята к печати 9.10.1987

Полупроводниковые материалы и приборы. Сб. науч. тр. / Под ред. С. И. Радауцана. Кишинев: Штиинца, 1987. 152 с.

Книга представляет собой сборник оригинальных работ, посвященных различным вопросам полупроводникового материаловедения и техники полупроводников. Освещены проблемы получения некоторых материалов, в частности эпитаксиальное выращивание GaInAsP, образование твердых растворов на границе раздела гетероперехода ZnO—ZnTe, исследование влияния стоячих акустических волн в газе на рост кристаллов халькогенидных полупроводников в процессе газотранспортных реакций. Изучены оптические свойства эпитаксиальных слоев p -InP, изопериодических с InP твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, а также фундаментальные оптические функции Sb_2Se_3 и Sb_2S_3 . Подробно проанализированы различные аспекты применения InP в микроэлектронике. Приведены данные о методах и режимах создания ряда приборных структур — барьеров Шоттки Ag— n -InP, полупроводниковых фаз $Zn_3In_2(Ga, Al)S_8$, полупроводниковых структур на основе стеклообразных полупроводников для регистрации оптических изображений, тонкопленочных солнечных элементов на основе AlGaAs. Рассмотрены некоторые свойства приборных структур, в том числе влияние освещения на высоту барьера в Au— $ZnIn_2S_4$:Cu, эффект усиления фототока в гибридных структурах на основе InSb, природа $1/f$ -шума в структурах Si— SiO_2 —InSb с туннельной прозрачностью диэлектрических слоев и т. д. Описан ряд конкретных приборов.

Цидильковский И. М., Харус Г. И., Шелушинина Н. Г. Примесные состояния и явления переноса в бесщелевых полупроводниках. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 152 с.

В книге освещены специфические физические особенности примесных состояний в бесщелевых и узкощелевых полупроводниках, обусловленные, в первую очередь, своеобразием их зонной структуры. Описаны электронный спектр $Hg_{1-x}Cd_xTe$, влияние многоэлектронных эффектов на электронный спектр бесщелевых полупроводников (БП), а также поведение концентрации собственных носителей заряда в БП. Дана функциональная модель БП; изложены сведения, относящиеся к примесным и собственным дефектам в халькогенидах Hg. Подробно разобран вопрос об энергии основного состояния примесей в БП (в том числе влияние экранирования, роль короткодействующего потенциала, магнитооптические методы исследования примесных уровней). Значительное место отведено переходу Мотта в БП. Изучено вымораживание электронов на акцепторы в БП (в частности, перестройка спектра БП в квантующем поле, вымораживание электронов как в отсутствие, так и при наличии давления). Обсуждается зависимость коэффициента Холла от магнитного поля и температуры. Рассмотрены низкотемпературные особенности проводимости БП p -типа. В процессе изложения выполнен детальный критический анализ целого ряда экспериментальных работ, посвященных исследованию кинетических коэффициентов БП $HgCdTe$ в зависимости от температуры, давления и магнитного поля.