

Стабилизация уровня Ферми и отрицательное магнитосопротивление в $\text{PbTe}(\text{Mn}, \text{Cr})$

© А.В. Морозов, А.Е. Кожанов, А.И. Артамкин, Е.И. Слынько*,
В.Е. Слынько*, W.D. Dobrowolski†, Т. Story†, Д.Р. Хохлов¶

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Физический факультет),
119899 Москва, Россия

* Черновицкое отделение института проблем материаловедения Национальной академии наук Украины,
274001 Черновцы, Украина

† Институт физики Польской академии наук,
02-668 Warsaw, Poland

(Получена 24 марта 2003 г. Принята к печати 1 апреля 2003 г.)

Обнаружен эффект стабилизации уровня Ферми и замороженная фотопроводимость при $T < 35$ К в $\text{PbTe}(\text{Mn}, \text{Cr})$. Примесный уровень, стабилизирующий уровень химического потенциала, смещается по направлению ко дну зоны проводимости по мере увеличения концентрации марганца. Обнаружен эффект отрицательного магнитосопротивления при низких температурах $T < 15$ К. Амплитуда эффекта составляет около 30% при $T = 4.2$ К. Природа эффекта связана с особенностями электронного транспорта по примесной полосе в магнитном поле.

Направленная модификация свойств полупроводниковых материалов с помощью их легирования различными примесями или путем создания дефектов кристаллической решетки является одной из важнейших фундаментальных проблем физики конденсированного состояния. Особое место в существующей проблематике занимает легирование полупроводников магнитными примесями. Наличие собственного магнитного момента примеси, как правило, приводит к возможности существенного изменения свойств материала в магнитном поле, в частности ширины запрещенной зоны, эффективного g -фактора и других. Относительные изменения указанных параметров оказываются особенно сильными в узкозонных полупроводниках. Помимо влияния на параметры энергетического спектра, магнитные примеси могут формировать локальные и квазилокальные состояния, которые оказывают значительное влияние на концентрацию и на характер рассеяния носителей заряда.

Узкозонные полупроводники $A^{IV}B^{VI}$ являются одним из основных базовых материалов инфракрасной оптоэлектроники и активно используются для производства полупроводниковых лазеров и фотоприемных матриц среднего и дальнего инфракрасного диапазонов. Возможности такого использования во многом определяются необычностью примесных состояний, возникающих при легировании узкозонных полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ некоторыми элементами, в частности In и Ga [1]. Особенности этих примесных состояний приводят к появлению ряда качественно новых эффектов, не характерных для нелегированного материала, в частности к стабилизации уровня Ферми и к замороженной фотопроводимости при низких температурах.

Ранее сообщалось об обнаружении аналогичных примесных состояний при легировании PbTe хромом [2] и иттербием [3]. В $\text{PbTe}(\text{Cr})$ уровень Ферми оказывается стабилизированным в зоне проводимости, а в $\text{PbTe}(\text{Yb})$ — в валентной зоне.

Легирование теллурида свинца марганцем увеличивает ширину запрещенной зоны со скоростью $\partial E_g / \partial x \approx 40$ мэВ / (мол% MnTe), но не приводит к формированию локальных или квазилокальных примесных состояний вблизи запрещенной зоны [4].

В $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{Yb})$ наблюдалось гигантское отрицательное магнитосопротивление, когда проводимость сплава возрастала на 3 порядка величины в магнитном поле [5]. Эффект, наблюдавшийся в работе [5], объяснялся особенностями проводимости по примесной полосе иттербия в магнитном поле. Представлялось интересным каким образом данный эффект будет трансформироваться для случая полуизолирующего состояния n -типа, формирование которого ожидалось в $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{Cr})$.

1. Исследованные образцы

Кристаллы $\text{PbTe}(\text{Mn}, \text{Cr})$ выращивались методом Бриджмена. Концентрация легирующих примесей изменялась вдоль оси слитка: в то время как концентрация марганца N_{Mn} увеличивалась от начала слитка к его концу, концентрация хрома N_{Cr} , напротив, падала. Поэтому хром входил в кристалл в количестве, достаточном для стабилизации уровня Ферми, только в начальной части слитка.

Эта часть разрезалась на шайбы толщиной около 1 мм перпендикулярно к оси роста. Концентрация примесей в каждой шайбе определялась с помощью энергодисперсионного рентгеновского флуоресцентного анализа. Распределение примесей внутри каждой шайбы было однородным в пределах точности метода, составляющей несколько процентов от концентрации примеси. Из шайб вырезались образцы размером $5 \times 1 \times 1$ мм³, к которым подпаивались индиевые контакты. Гальваномагнитные измерения производились на постоянном токе в стандартной холловской геометрии 4-контактным методом.

¶ E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

2. Экспериментальные результаты

Температурные зависимости удельного сопротивления образцов, измеренные в условиях темноты и инфракрасной подсветки, представлены на рис. 1. В температурном диапазоне 30–100 К наблюдается активационный процесс, сменяющийся насыщением сопротивления при более низких температурах. Энергия активации уменьшается с ростом концентрации марганца. Инфракрасная подсветка приводит к появлению эффекта замороженной фотопроводимости при температурах ниже 35 К.

Приложение магнитного поля приводит к появлению отрицательного магнитосопротивления при температурах $T < 15$ К (рис. 2). Амплитуда эффекта составляет около 30%, что гораздо меньше, чем в случае PbTe(Mn,Yb) [5], однако существенно больше, чем амплитуда отрицательного магнитосопротивления, связанного с квантовыми поправками к проводимости и обычно наблюдающегося в неупорядоченных системах. Спад сопротивления в магнитном поле уменьшается с ростом температуры и исчезает при $T > 15$ К.

Из рис. 2 видно, что в магнитных полях $H < 5$ Тл и $H > 7$ Тл удельное сопротивление возрастает при понижении температуры, однако в промежутке полей $5 < H < 7$ Тл оно практически не зависит от температуры при $T < 10$ К. Этот эффект наиболее четко регистрируется на температурных зависимостях удельного сопротивления, измеренных в различных магнитных полях (рис. 3). Важно отметить, что в диапазоне магнитных полей $H < 5$ Тл температурная зависимость удельного сопротивления состоит из двух активационных участков. Энергия активации, соответствующая области относительно высоких температур $T > 15$ К, составляет 5–6 мэВ и слабо растет при повышении H . В то же время энергия низкотемпературной активации

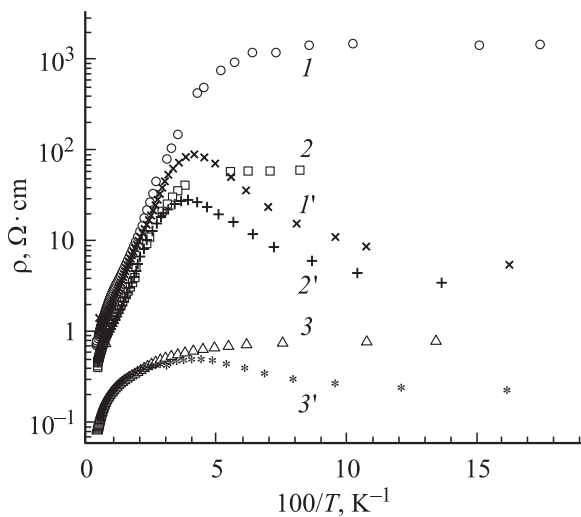


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления, измеренные в темноте (1–3) и при инфракрасной подсветке (1'–3'). Концентрация марганца N_{Mn} , мол%: 1, 1' — 5.6; 2, 2' — 7.1; 3, 3' — 9.1.

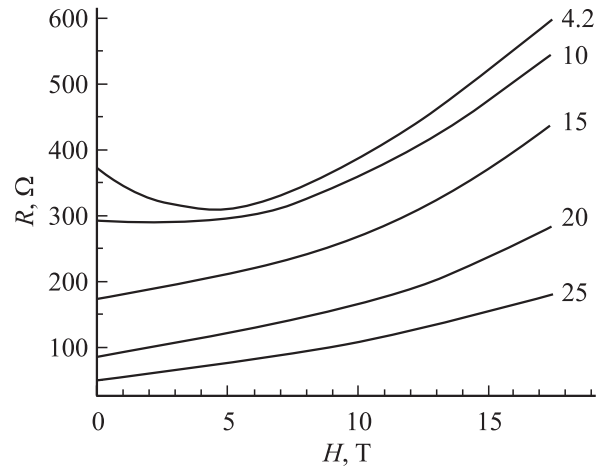


Рис. 2. Полевые зависимости удельного сопротивления при различных температурах. Цифры у кривых — температура в К. $N_{Mn} = 9.1$ мол%.

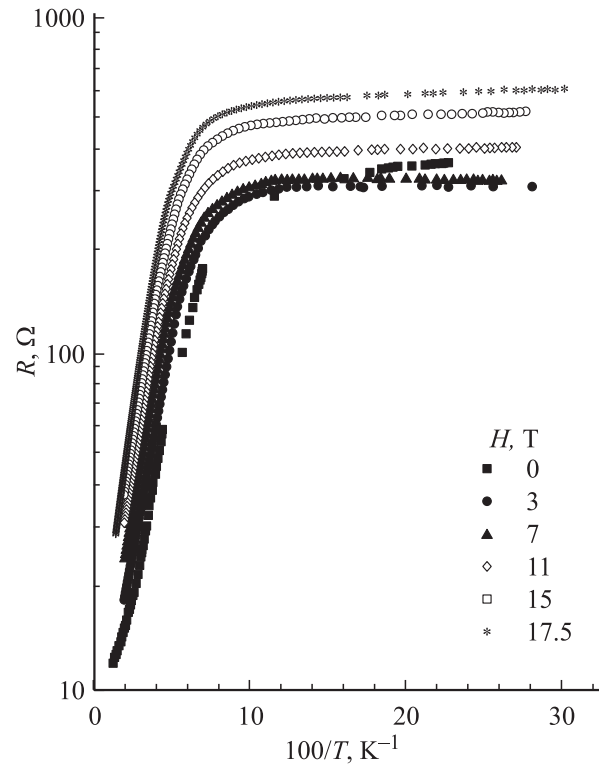


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления в различных магнитных полях. $N_{Mn} = 9.1$ мол%.

уменьшается с ростом поля и обращается в нуль при $H \approx 5$ Тл. В диапазоне полей $H > 7$ Тл рост удельного сопротивления при понижении температуры возобновляется для низкотемпературной области $T < 15$ К.

Температурная зависимость холловской подвижности представлена на рис. 4. Подвижность растет при понижении температуры, достигает максимума при $T \approx 35$ К и затем резко падает. Такое резкое снижение холловской подвижности в области низких температур обычно

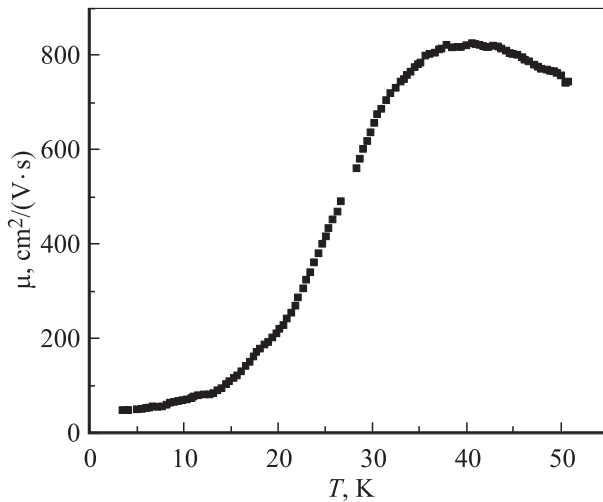


Рис. 4. Температурная зависимость холловской подвижности для образца с $N_{Mn} = 9.1$ мол%.

наблюдается в неупорядоченных системах, или в ситуациях, когда проводимость определяется эффектами протекания [6]. Величина подвижности в максимуме $\mu \approx 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ типична для свободных электронов в зоне проводимости при температурах 30–40 К.

Данные измерений для других образцов аналогичны.

3. Обсуждение результатов

В описанных экспериментах наблюдается целый ряд необычных эффектов. Прежде всего рост энергии активации сопротивления при увеличении концентрации марганца N_{Mn} противоречит ожидавшейся тенденции. Действительно, известно, что в $\text{PbTe}(\text{Cr})$ уровень Ферми стабилизирован в зоне проводимости на расстоянии около 100 мэВ выше ее дна [2]. Рост содержания марганца приводит к увеличению ширины запрещенной зоны. Предполагалось, что положение примесного уровня, стабилизирующего уровень Ферми, „привязано“ к середине запрещенной зоны, как в случае легирования PbTe индием [1]. В такой ситуации рост N_{Mn} должен приводить к сближению примесного уровня с дном зоны проводимости и к вхождению этого уровня, стабилизирующего уровень химического потенциала, в запрещенную зону. Как видно из эксперимента, примесный уровень действительно входит в запрещенную зону при определенном значении N_{Mn} , однако не углубляется в нее при дальнейшем росте содержания марганца, а, напротив, движется в противоположную сторону, вследствие чего энергия активации сопротивления уменьшается. Такое поведение может являться следствием наличия зависимости ширины запрещенной зоны от количества введенного хрома. В то же время в $\text{PbTe}(\text{Cr})$ такой зависимости не наблюдалось.

Вторым интересным эффектом является отрицательное магнитосопротивление, наблюдающееся при тем-

пературах $T < 15$ К. При более высоких температурах магнитосопротивление является положительным, поэтому естественно предположить, что такое изменение в характере поведения сопротивления в магнитном поле обусловлено изменением основного механизма, определяющего проводимость. По всей вероятности, основной вклад в проводимость при температурах выше 15 К дают свободные электроны в зоне проводимости, и высокотемпературный активационный процесс обусловлен термическим возбуждением электронов с примесного уровня, стабилизирующего уровень химического потенциала, в зону проводимости. Это предположение подтверждается высокими значениями холловской подвижности носителей заряда в указанной области температур. Следовательно, электроны зоны проводимости дают вклад только в положительное магнитосопротивление.

Энергия активации, соответствующая процессу, наблюдающемуся при низких температурах $T < 15$ К в малых магнитных полях $H < 5$ Тл, гораздо меньше, чем разница в энергиях между примесным уровнем, стабилизирующим положение химического потенциала, и дном зоны проводимости. Кроме того, данные холловских измерений указывают на то, что носители заряда, ответственные за эту низкотемпературную активацию, имеют гораздо меньшую подвижность, чем электроны зоны проводимости. Поэтому естественно предположить, что механизм низкотемпературной активации проводимости следующий. В отличие от случая легирования индием, для которого примесные состояния очень хорошо локализованы [7] и ширина соответствующего примесного уровня очень мала — менее 1 мэВ, в случае $\text{PbTe}(\text{Mn}, \text{Cr})$ может реализоваться значительное уширение примесного уровня, как и для $\text{PbTe}(\text{Ge}, \text{Yb})$ [8]. Если уровень химического потенциала попадает в среднюю часть примесной полосы, то может реализоваться перколяционная проводимость, если же он попадает в „хвосты“ плотности состояний этой полосы, то проводимость будет определяться термической активацией с уровня Ферми на уровень протекания. В таком случае отрицательное магнитосопротивление может быть обусловлено сдвигом уровня химического потенциала относительно уровня протекания в магнитном поле.

Причина такого сдвига может заключаться в следующем. Введение магнитного поля приводит к заметному расщеплению примесных состояний с различным направлением спина. В этих условиях полное заполнение примесной полосы не изменяется, однако заполнение каждой из спин-поляризованных примесных полос может сильно измениться, что в свою очередь приведет к сдвигу положения уровня Ферми относительно уровня протекания для каждой из этих полос. Другие возможности, в частности, обусловленные магнитным взаимодействием электронов в d -оболочках Mn и Cr, тоже нельзя исключить. В любом случае ясно, что отрицательное магнитосопротивление связано с особенностями транспорта по примесной полосе, а не с электронами в зоне проводимости, как в полупроводниках $A^{IV}B^{VI}$ [9].

Работа выполнена при частичной поддержке дополнительного гранта к основному гранту NSF в Национальной лаборатории по сильным магнитным полям (Таллахасси, США) № DMR 0084173, а также грантов РФФИ №№ 01-02-16356, 02-02-17057, 02-02-08083 и ИНТАС № 2001-0184.

Список литературы

- [1] Б.А. Волков, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. УФН, **172**, 875 (2002).
- [2] Л.М. Каширская, Л.И. Рябова, О.И. Тананасва, Н.А. Широкова. ФТП, **24**, 1349 (1990).
- [3] I.I. Ivanchik, D.R. Khokhlov, S.V. Ponomarev, E.I. Slyn'ko, A.A. Terekhov, A. de Visser, Yu.K. Vygranenko. *Proc. 24 Int. Conf. Phys. Semicond.* (Jerusalem, Israel, 1998) CD-ROM, VIII B-8.
- [4] J. Niewodniczańska-Zawadzka, J.G. Elsinger, L. Palmetshofer, A. Lopez-Otero, E.J. Fantner, G. Bauer, W. Zawadzki. *Physica B + C*, **117–118B**, 458 (1983).
- [5] I.I. Ivanchik, D.R. Khokhlov, A.V. Morozov, A.A. Terekhov, E.I. Slyn'ko, V.I. Slyn'ko, A. de Visser, W.D. Dobrovolski. *Phys. Rev. B*, **61**, R14889 (2000).
- [6] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 208 (1976).
- [7] В.Г. Голубев, Н.И. Гречко, С.Н. Лыков, Е.П. Сабо, И.А. Черник. ФТП, **11**, 1704 (1977).
- [8] E.P. Skipetrov, N.A. Chernova, E.I. Slynko, Yu.K. Vygranenko. *Phys. Rev. B*, **59**, 12928 (1999).
- [9] A. Mucielsky, J. Mysielski. *J. Phys. Soc. Jap.*, **49A**, 807 (1980).

Редактор Т.А. Полянская

Fermi level pinning and negative magnetoresistance effect in PbTe(Mn,Cr)

A.V. Morozov, A.E. Kozhanov, A.I. Artamkin,
E.I. Slyn'ko*, V.E. Slyn'ko*, W.D. Dobrowolski†,
T. Story†, D.R. Khokhlov

M.V. Lomonosov Moscow State University
(Physics Department),
119899 Moscow, Russia

* Chernovtsy Branch of Institute
of Materials Science Problems,
National Academy of Sciences of Ukraine,
274001 Chernovtsy, Ukraine

† Institute of Physics, Polish Academy of Sciences,
02-668 Warsaw, Poland

Abstract The Fermi level pinning effect and the delayed photoconductivity at $T < 35$ K have been observed in PbTe(Mn,Cr). The impurity level that pins the chemical potential approaches the conduction band bottom as the Mn concentration increases. The negative magnetoresistance effect at low temperatures $T < 15$ K has been observed. The effect amplitude is about 30% at $T = 4.2$ K. The effect results from the peculiarities of electron transport through the impurity band in magnetic field.