

ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ—ДИЭЛЕКТРИК В КРИСТАЛЛАХ АНТИМОНИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ МАРГАНЦЕМ

Обухов С. А.

Исследованы проводимость и магнитосопротивление в кристаллах антимонида индия, легированных марганцем, при концентрациях акцепторов, близких к критической концентрации перехода металл—диэлектрик $4.5 \cdot 10^{16} < N_A, \text{ см}^{-3} < 2 \cdot 10^{17}$, в интервале температур $T = 4.2 \div 0.5 \text{ К}$ и напряженности магнитного поля $H = 0 \div 5.5 \text{ Т}$.

Обнаружено, что обменное взаимодействие между дырками примесной зоны и электронами d -оболочки иона марганца оказывает существенное влияние на явления переноса вблизи $N_{кр}$ на диэлектрической стороне перехода металл—диэлектрик.

Наблюдаются более резкий переход металл—диэлектрик по сравнению с кристаллами p -InSb, легированными немагнитной примесью — германием, возникновение гигантского отрицательного магнитосопротивления, наличие максимума в зависимости удельного сопротивления от концентрации марганца при $T < 1 \text{ К}$.

Предполагается, что проявление сильного влияния магнитных свойств марганца связано с упорядочением спинов марганца путем косвенного обмена через дырки в примесной зоне.

Отмечается, что подобные эффекты наблюдались ранее лишь в магнитных и полумагнитных полупроводниках.

Исследование явлений переноса в сильно легированных кристаллах p -InSb $\langle \text{Mn} \rangle$ ($N_A > 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) показало [1], что в зависимости магнитосопротивления и константы Холла от напряженности магнитного поля и температуры имеется ряд особенностей, которые авторы связывают с влиянием обменного взаимодействия дырок с электронами $3d^5$ -оболочки иона марганца. В работе [2] было обнаружено гигантское отрицательное магнитосопротивление (ОМС) в анизотропно деформированном кристалле p -InSb $\langle \text{Mn} \rangle$ с $N_A = 1.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а исследование эффекта Холла в этом образце показало [3], что при низких температурах ($T < 1 \text{ К}$) наблюдается сильный аномальный эффект Холла. Константа Холла при этом меняет знак и возрастает почти в 10^2 раз!

Таким образом, исследования явлений переноса в кристаллах антимонида индия, легированных марганцем, проведенные в вышеупомянутых работах [1–3], указывают на значительную роль, которую играет обменное взаимодействие дырок, участвующих в проводимости с d -электронами иона марганца, причем наблюдается тенденция к усилению этого эффекта при уменьшении концентрации примеси марганца вблизи критической концентрации перехода металл—диэлектрик ($N_{кр} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). В связи с этим представляло значительный интерес провести исследования явлений переноса в кристаллах антимонида индия при концентрациях акцепторов, меньших $N_{кр}$.

На рис. 1 показана температурная зависимость удельного сопротивления в p -InSb $\langle \text{Mn} \rangle$ в образцах на диэлектрической стороне перехода металл—диэлектрик. Как видно из рисунка, по мере уменьшения концентрации марганца увеличение удельного сопротивления в образцах в интервале температур $T = 4.2 \div 1.1 \text{ К}$ происходит в основном за счет увеличения энергии активации проводимости. При $T < 1.1 \text{ К}$ энергия активации практически не изменяется во всем интервале изменения концентрации марганца ($4 \cdot 10^{16} < N_A < 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$). В образце с $N_A = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ наблюдается необычный температур-

ный ход зависимости удельного сопротивления с возрастающей при понижении температуры энергией активации. Отчетливо видно, как при уменьшении концентрации акцепторов энергия активации на участке температуры $T=4.2 \div$

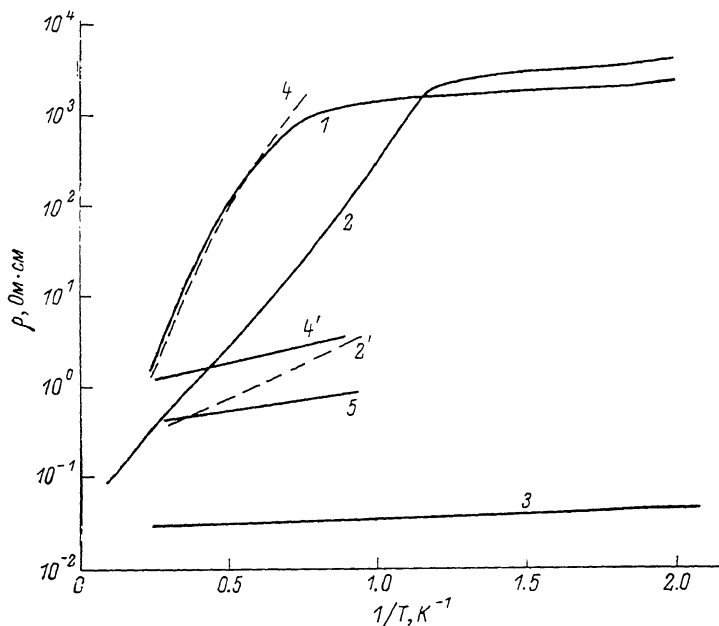


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления p -InSb от температуры.

1—3 — p -InSb(Mn), 4, 5 — p -InSb(Ge). 1—5 — $H=0$; 2', 4' — $H=5.5$ Т; 4, 4' — $\chi=1.5 \cdot 10^3$ бар. $N_A - N_D$, см^{-3} (при $T=77$ К): 1 — $4.5 \cdot 10^{16}$; 2, 2', 4, 4', 5 — $8 \cdot 10^{16}$; 3 — $2 \cdot 10^{17}$.

1.1 К возрастает и стремится к энергии активации мелкого акцепторного уровня $E_A=7$ мэВ (рис. 2). В то же время в образцах антимида индия, легированных германием, который также образует в антимида индия мелкий акцепторный уровень с энергией активации $E_A=7$ мэВ, в интервале температур

$T=4.2 \div 1.1$ К энергия активации соответствует энергии активации прыжковой проводимости и остается при уменьшении концентрации примеси почти на порядок меньше энергии активации мелкого акцептора (рис. 2, кривая 2).

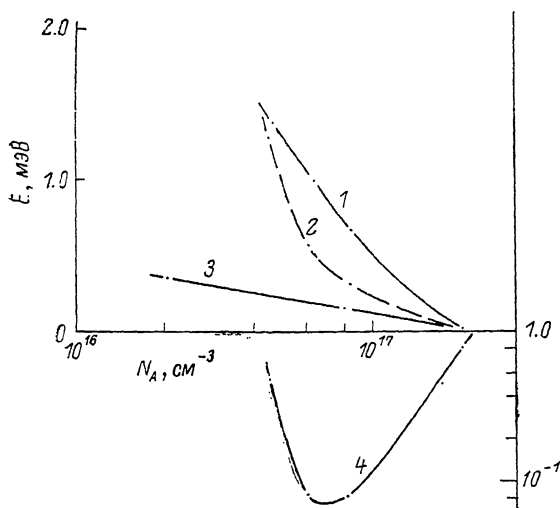


Рис. 2. Энергия активации проводимости E (1—3) и отрицательное магнитосопротивление ρ_H/ρ_0 (4) в зависимости от концентрации акцепторов.

1, 2, 4 — p -InSb(Mn), 3 — p -InSb(Ge). 1, 3 — $H=0$; 2, 4 — $H=5.5$ Т. T , К: 1—3 — $4.2+1.2$; 4 — 1.2.

При температуре $T < 1$ К удельное сопротивление при уменьшении концентрации марганца достигает максимума, после чего уменьшается (рис. 1). При дальнейшем уменьшении концентрации марганца следует ожидать увеличения удельного сопротивления в области прыжковой проводимости.

Исследование зависимости проводимости от напряженности магнитного поля показало, что магнитосопротивление, как и в сильно легированных кристаллах,

отрицательно, однако величина его намного превосходит ОМС, наблюдаемое ранее в работе [4].

Эффект ОМС при уменьшении концентрации примеси достигает максимума, после чего резко уменьшается в кристаллах с $N_A = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Уменьшение удельного сопротивления в магнитном поле обусловлено уменьшением энергии активации проводимости, как это видно из сопоставления кривых 2 и 2' на рис. 1.

На рис. 2 показано, как изменяется энергия активации в магнитном поле в образцах во всем интервале изменения концентрации марганца. Как видно из рисунка, в магнитном поле напряженностью $H = 5.5 \text{ Т}$ энергия активации уменьшается до значений, близких к энергии активации в антимиониде индия, легированном немагнитной примесью — германием.

Результаты исследования зависимости ρ_H/ρ_0 от напряженности магнитного поля представлены на рис. 3. Видно, что насыщения эффекта ОМС следует ожидать при $H > 5.5 \text{ Т}$. На этом же рисунке приведена зависимость ρ_H/ρ_0 для образца с $N_A = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, одноосно деформированного вдоль оси [110]. ОМС при $\chi = 2 \cdot 10^3 \text{ бар}$ возрастает более чем на порядок. Если при этом учесть, что ОМС определяется уменьшением энергии активации проводимости в магнитном поле, то следует ожидать, что величина ρ_H/ρ_0 в сильном магнитном поле $H \approx 8 \text{ Т}$ при $T \leq 1 \text{ К}$

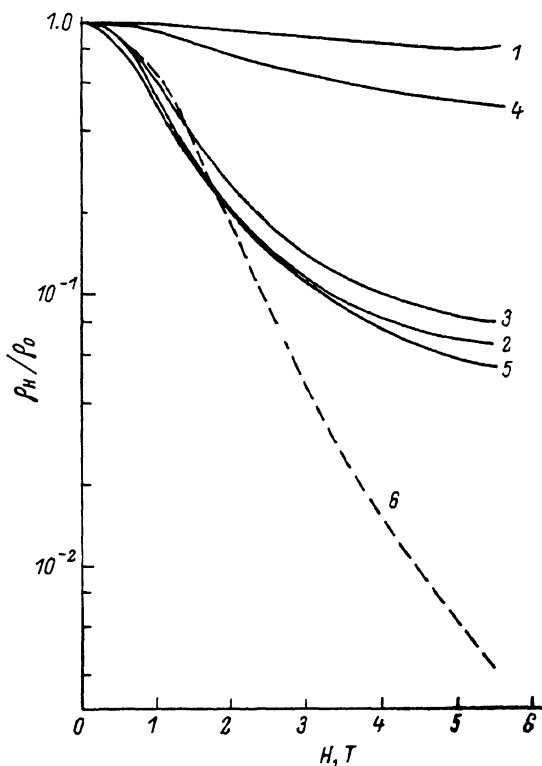


Рис. 3. Поперечное ($H \perp I$) и продольное ($H \parallel I$) магнитосопротивление в $p\text{-InSb}\langle\text{Mn}\rangle$ при $T = 1.2 \text{ К}$.

$N_A - N_D, \text{ см}^{-3}$: 1 — $2.0 \cdot 10^{17}$; 2, 5, 6 — $8 \cdot 10^{16}$; 3 — $6 \cdot 10^{16}$; 4 — $4.5 \cdot 10^{16}$. 1-4 — $H \perp I$, 5, 6 — $H \parallel I$; 6 — $\chi = 1.5 \cdot 10^3 \text{ бар}$.

будет превышать 10^6 , что сравнимо лишь с гигантским отрицательным магнитосопротивлением в магнитных редкоземельных полупроводниках типа $\text{Gd}_{3-x}\text{V}_x\text{S}_4$ [4] и $p\text{-Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ [5].

Таким образом, основные экспериментальные результаты работы сводятся к следующему: 1) легирование антимиониды индия марганцем приводит к более резкому переходу металл—диэлектрик по сравнению с материалом, легированным немагнитной примесью — германием; 2) на диэлектрической стороне перехода металл—диэлектрик в узком интервале концентрации марганца наблюдается экспоненциальное ОМС; 3) величина удельного сопротивления при $T \approx 0.5 \text{ К}$ при уменьшении концентрации марганца N_A от $2 \cdot 10^{17}$ до $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ проходит через максимум; 4) в образцах с $N_A = (6 \div 8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в которых наблюдается максимальная величина ОМС, энергия активации проводимости в интервале температур $4.2 \div 1 \text{ К}$ возрастает.

Качественно модель, описывающая наблюдаемые явления, выглядит следующим образом.

Как следует из эксперимента, проводимость в кристаллах $p\text{-InSb}$ с концентрацией $4 \cdot 10^{16} < N_A, \text{ см}^{-3} < 2 \cdot 10^{17}$ при температуре $T < 4.2 \text{ К}$ осуществляется по отделенной примесной зоне и носит малоподвижный ($R\sigma \leq 50 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) прыжковый характер.

При этом на границе перехода металл—диэлектрик (на ее диэлектрической стороне) обменное взаимодействие между дырками в примесной зоне, отделенной энергетической щелью от валентной зоны, приводит к спиновой упорядоченности дырок типа аморфного антиферромагнетика [6]. В примесной зоне может возникнуть энергетическая щель [7]. Магнитное поле, разворачивая спины носителей тока вдоль направления магнитного поля, вызывает схлопывание этой щели, что и приводит к увеличению проводимости. Обменное взаимодействие в немагнитных полупроводниках вблизи перехода металл—диэлектрик не приводит, по-видимому, к образованию значительной энергетической щели, и поэтому эффект ОМС в них не превышает величины в несколько десятков процентов [8].

В случае антимолибдита индия, легированного марганцем, помимо обмена между дырками в примесной зоне существенную роль играет обмен между дырками и электронами d -оболочки марганца. В такой системе возможно также существование косвенного обмена между ионами марганца через спиново упорядоченные дырки в примесной зоне. Возрастающая с понижением температуры энергия активации проводимости и наличие «гигантского» аномального эффекта Холла [3] в p -InSb<Mn> свидетельствуют в пользу такой модели.

При концентрации $N_A < 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ обменное взаимодействие между дырками в примесной зоне резко уменьшается и уменьшается ОМС, исчезают аномалия в температурной зависимости проводимости и аномальный эффект Холла. Исчезают эти эффекты и в сильно легированных кристаллах при $N_A > 4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, где примесная зона сливается с валентной зоной.

Анизотропная деформация, как было показано в работах [2, 9], вызывает усиление обменного взаимодействия дырок в примесной зоне, что и приводит к резкому увеличению ОМС и аномального эффекта Холла.

Автор выражает благодарность Д. В. Шамшуру за проведение измерений проводимости при $T < 1.1 \text{ К}$, Р. В. Парфеньеву за обсуждение результатов работы, А. Н. Попкову, В. С. Векшиной и Н. И. Пешик за предоставление образцов для измерений.

Л и т е р а т у р а

- [1] Андрианов Д. Г., Лазарева Г. В., Савельев А. С., Селиванов В. И., Фистуль В. И. Магнитная восприимчивость и отрицательное магнитосопротивление в InSb<Mn>. — ФТП, 1975, т. 9, в. 8, с. 1555—1560.
- [2] Аверкиев Н. С., Гай В., Обухов С. А., Рогачев А. А. Гигантское отрицательное магнитосопротивление в односно деформированном антимолибдиде индия, легированном марганцем. — Письма ЖЭТФ, 1984, т. 40, в. 2, с. 45—48.
- [3] Обухов С. А., Парфеньев Р. В., Шамшур Д. В. Аномальный эффект Холла в антимолибдиде индия, легированном марганцем. — В кн.: Тез. докл. XXIV Всес. совещ. по физике низких температур. Тбилиси, 1986, т. II, с. 132—133.
- [4] Von Molnar S., Holtzberg F. — In: AIP Conf. Magn. a. magn. mater., 1973, p. 1259—1273.
- [5] Германенко А. В., Зверев Л. Г., Кружаев В. В., Миньков Г. М., Рут О. Э., Гавалешко Н. Г., Фрасуяк В. М. Энергия акцепторного уровня в полупроводниковом p -Hg_{1-x}Mn_xTe в магнитном поле. — ФТТ, 1984, т. 26, в. 6, с. 1754—1757.
- [6] Mott N. F. Metall-insulator transitions. London, 1974. 342 p.
- [7] Ирхин Ю. П. Об электропроводности антиферромагнитных металлов. — ФММ, 1958, № 6, с. 24; 1958, № 6, с. 586.
- [8] Shmartzev Lu. V., Polyanskaya T. A., Shender E. F., Golubev L. V., Vul' A. Ya., Saidashev I. I. — In: XII Int. Conf. Phys. Semicond. Warsaw, 1973, p. 410—416.
- [9] Обухов С. А. Переход полупроводник—металл, индуцированный магнитным полем, в односно деформированном антимолибдиде индия p -типа. — ФТТ, 1979, т. 21, в. 1, с. 59—65.