

ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В ПОЛУМАГНИТНОМ ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$

Р. И. Баширов, В. А. Елизаров, Н. Ю. Матвеева

Институт физики им. Х. И. Амирханова Российской академии наук, 367003, Махачкала, Россия

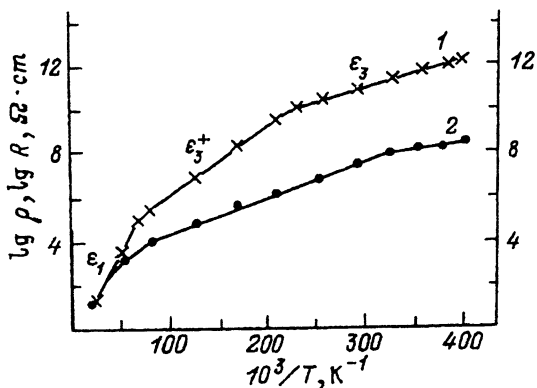
(Получено 21 июня 1993 г. Принято к печати 1 ноября 1993 г.)

Кристаллы $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ относятся к магнитосмешанным или, как их еще называют, полумагнитным полупроводникам. Особенности гальваномагнитных свойств этих материалов связаны с наличием нескомпенсированного магнитного момента у $3d$ -электронов марганца. Намагниченность полумагнитных полупроводников влияет на их электрические свойства через спин-спиновое обменное взаимодействие между локализованными магнитными моментами и зонными электронами. Дырка, связанная на акцепторе, поляризует спины ионов марганца на расстоянии боровского радиуса. Вследствие флуктуации состава и спиновых флуктуаций в полумагнитных полупроводниках при низких температурах наблюдаются особенности в прыжковой проводимости.

В настоящей работе исследовались образцы $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ с $x = 0.235$ дырочного типа проводимости в области температур ($2.5 \div 500$) К. Разность концентраций акцепторов и доноров $N_A - N_D$, определенная в области истощения примесей, составляла $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Образцы вырезались из слитка, полученного из смесей бинарных компонент в однородных тепловых полях. Металлографическим анализом и по окрашивающему травлению было установлено, что слиток представлял собой единый однородный монокристалл с постоянным составом $x = 0.235$.

Основные результаты исследований состоят в следующем. Примесная проводимость ($\epsilon_1 = 14$ мэВ) наблюдается в районе ($14 \div 400$) К. Подвижность дырок возрастает с понижением температуры по закону $\mu_p \sim T^{-0.8}$, достигая максимальной величины ($300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) при $T \approx 50$ К. При дальнейшем охлаждении образца подвижность дырок резко уменьшается из-за перехода при $T = 14$ К от зонной проводимости к прыжковой. Подвижность дырок ниже 15 К не удается измерить.

В области прыжковой проводимости наблюдается (см. рисунок) двухэкспоненциальная температурная зависимость $\lg \rho (T^{-1})$ с энергиями активации на участке ($5 \div 14$) К $\Delta + E \equiv \epsilon_3^+ \approx 7$ мэВ и на участке ($2.5 \div 5$) К $\Delta \equiv \epsilon_3 \approx 2.5$ мэВ, где Δ — различие в энергии основного занятого акцептора и свободного от дырки акцептора без учета спиновых взаимодействий, E — величина расщепления между состояниями $3/2$ и $1/2$ в энергетических единицах. Известно, что в полумагнитных растворах $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ дырки на акцепторе выстраивают спины магнитных ионов Mn^{2+} вдоль направления «своего» спина. Когда энергия обменного взаимодействия ионов Mn^{2+} с дыркой



Температурная зависимость сопротивления для $p\text{-Hg}_{0.765}\text{Mn}_{0.235}\text{Te}$: 1 — удельного сопротивления объема образца, 2 — сопротивления поверхностного слоя.

превышает энергию взаимодействия ионов Mn^{2+} друг с другом, образуется связанный магнитный полярон. Прыжковая проводимость, обусловленная двумя активационными процессами, обнаружена в $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ для состава $x = 0.16$ [1]. Эффект объясняется спиновыми флуктуациями в спектре связанного магнитного полярона на акцепторе и обусловленными ими флуктуациями радиуса состояния. Согласно предложенной модели, дырку, локализованную на акцепторе, можно рассматривать как частицу, которая имеет спин $J = 3/2$. Обменное взаимодействие дырки и ионов Mn^{2+} вызывает локальную намагниченность в направлении z . Проекциям спина дырки на направление z соответствуют два возможных поляронных состояния. Для основного состояния полярона ($m_b = 3/2$) эффективный радиус состояния полярона минимальный. Проводимость на участке ϵ_3 определяется прыжками между основными состояниями акцепторов с вероятностью $\exp(-\Delta/T)$. Возбужденному состоянию полярона ($m_b = 1/2$) соответствует больший радиус состояния. При температурах (5÷14) К (участок ϵ_3^+) вероятность прыжка, связанная с перекрытием волновых функций возбужденных состояний полярона с $m_b = 1/2$, может существенно превысить вероятность прыжка с $m_b = 3/2$. Полярон флуктуирует в возбужденное состояние с $m_b = 1/2$ и совершает прыжки между свободными от дырки акцепторами в такое же спиновое состояние, вероятность такого процесса $\sim \exp[-(\Delta + E)/T]$. Проводимость в предложенной модели определяется формулой типа (1) из работы [1].

На рисунке представлена зависимость $\lg R(T^{-1})$ для образца, который после травления был выдержан на воздухе несколько суток. Как известно [2], поверхность образца окисляется, в результате возникает слой, обедненный марганцем. Этот поверхностный слой имеет более высокую проводимость, чем материал объема (подложки). При 4.2 К проводимость поверхностного слоя на 4 порядка превышает проводимость подложки. Прыжковая проводимость $2d$ -дырок также обусловлена двумя активационными процессами. При этом вероятность прыжка, связанная с перекрытием волновых функций возбужденных состояний полярона ($m_b = 1/2$), затягивается в область более низких температур, что, естественно, связано с меньшим значением ϵ_3^+ для слоя, чем в случае подложки. Качественно кривые $\lg R(T^{-1})$ для $2d$ -дырок и для дырок объема хорошо коррелируют, если учесть повышенную проводимость поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. Е. Беляев, Ю. Г. Семенов, Н. В. Шевченко. Письма ЖЭТФ, 48, 623 (1988).
- [2] D. R. Rhiger, R. E. Kvaas, J. Vac. Sci. Techn., 21, 168 (1982).

Редактор Т. А. Полянская
