

Конкуренция зонного и прыжкового механизмов переноса носителей заряда в тонких пленках Ge:Mn с перколяционным магнитным упорядочением

Г.Г. Зиборов¹, А.И. Дмитриев²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт проблем химической физики РАН

Исследованы закономерности дырочного транспорта в его взаимосвязи с перколяционным магнетизмом, обусловленным локализованными носителями заряда, одновременно участвующими в формировании магнитных и электрических свойств ионно-имплантированных тонких пленок Ge:Mn (2 ат.% Mn). Целью настоящей работы являлось установление механизма переноса носителей заряда и закономерностей дырочного транспорта в перколяционно намагниченных образцах Ge:Mn.

Температурная зависимость намагниченности $M(T)$ образцов Ge:Mn с перколяционным магнитным упорядочением описывалась формулой, полученной в рамках теории протекания [1-3]:

$$M(T) = M(0) \left[1 - \exp \left(-L^3 n_h \ln^3 \frac{SJ}{T} \right) \right], \quad (1)$$

здесь $M(0)$ – намагниченность при 0 К, L – радиус локализации дырок, $n_h = 2.4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ – концентрация дырок [2, 3], $S = 5/2$ – спин ионов Mn^{2+} , J – обменный интеграл, T – температура. Из аппроксимации зависимости $M(T)$ были определены значения обменного интеграла $J = 66$ К и радиус локализации дырок $L = 6 \text{ \AA}$ [2, 3].

В основе перколяционной модели лежит предположение о том, что обменное взаимодействие обусловлено локализованными носителями заряда. Локализация носителей заряда, на которую косвенно указывают магнитные данные, должна приводить к особому виду температурной зависимости электрического сопротивления исследуемых образцов.

На рис. 1 приведена температурная зависимость электрического сопротивления $R(T)$ образца Ge:Mn, нормированного на его значение при 300 К. При температурах $T > 22$ К зависимость $R(T)$ носит металлический характер, т.к. в этой области температур $dR/dT > 0$. Напротив, при температурах ниже 22 К производная $dR/dT < 0$, что соответствует полупроводящему состоянию образца. Высокотемпературный участок кривой $R(T)$ аппроксимирован степенной функцией $R \sim T^\alpha$, $\alpha = 1.56$ (рис. 1). Значение показателя степени α , определенное из аппроксимации, близко к значению $3/2$, соответствующему рассеянию дырок на акустических фононах [4].

Низкотемпературный участок кривой $R(T)$ (врезки на рис. 1) не описывался моделями активационного переноса термически делокализованных носителей заряда и прыжковой проводимости локализованных носителей на ближайшие центры. Нами было показано, что при низких температурах имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по Мотту (2) или по Эфросу-Шкловскому (3).

$$R = R_0 \exp \left(\frac{T_M}{T} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

где R_0 – предэкспоненциальный фактор независимый от температуры; эффективная температура T_M – характерная величина с размерностью температуры, зависящая от плотности состояний в окрестности уровня Ферми и радиуса локализации дырок L [5].

$$R = R_0 \exp\left(\frac{T_{ES}}{T}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где R_0 – независимый от температуры коэффициент; T_{ES} – величина с размерностью температуры, определяемая диэлектрической проницаемостью образца и радиусом локализации дырок L [5].

Значения радиуса локализации дырок, определенные из аппроксимации (врезки на рис 1.) температурной зависимости $R(T)$ формулами Мотта (2) и Эфроса-Шкловского (3), $L = 2 \text{ \AA}$ и 8 \AA , соответственно, оказались близки к значению, полученному из анализа магнитных данных. Что является подтверждением перколяционного сценария ферромагнитного упорядочения в тонких пленках Ge:Mn.

Таким образом, установлено, что электронно-транспортные свойства тонких пленок Ge:Mn с перколяционным магнитным упорядочением обусловлены конкуренцией зонного и прыжкового механизмов переноса носителей заряда. При высоких температурах ($T > 22 \text{ K}$) доминирующим механизмом является безактивационный зонный перенос дырок с рассеянием на акустических фононах. При низких температурах имеет место прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-5754.2016.3.

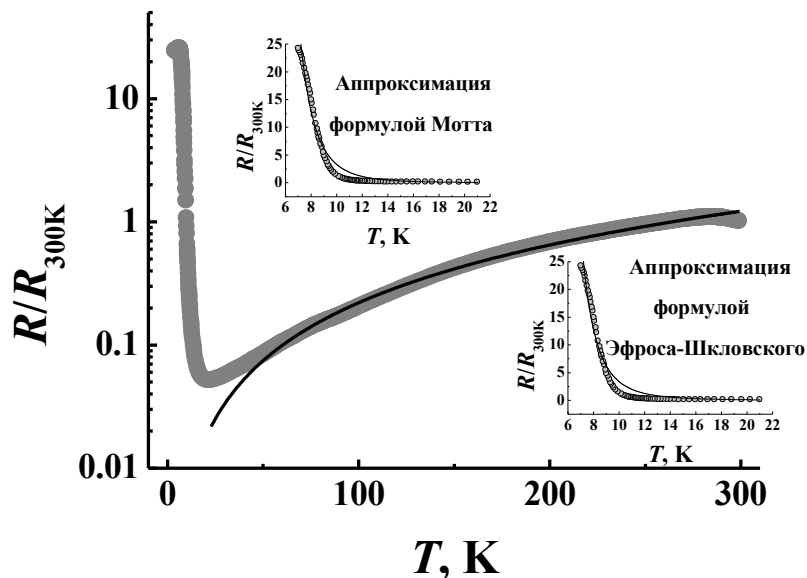


Рис. 1. Температурная зависимость электрического сопротивления $R(T)$ образца, нормированного на его значение при 300 К. Сплошной линией показана аппроксимация высокотемпературной части ($T > 22 \text{ K}$) кривой $R(T)$ степенной функцией. На врезках изображены низкотемпературные фрагменты зависимости $R(T)$ и их аппроксимации формулами Мотта (слева сверху) и Эфроса-Шкловского (справа внизу).

Литература

1. Коренблит И.Я., Шендер Е.Ф. Ферромагнетизм неупорядоченных систем // УФН. 1978. Т. 126. С. 233.
2. Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Kazakova O.L. Percolation ferromagnetism and spin waves in Ge: Mn thin films // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. P. 085205.
3. Дмитриев А.И., Моргунов Р.Б., Казакова О.Л., Танимото Й. Спин-волновой резонанс в пленках $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$, обладающих перколяционным ферромагнетизмом // ЖЭТФ. 2009. Т. 135. С. 1134.
4. Jamet M., Barski A. et al. High-Curie-temperature ferromagnetism in self-organized $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ nanocolumns // Nature Mater. 2006. V. 5. P. 653.
5. Liu H., Pourret A., Guyot-Sionnest P. Mott and Efros-Shklovskii Variable Range Hopping in CdSe Quantum Dots Films // ACS Nano. 2010. V. 4. P. 5211.