

КИНЕТИЧЕСКИЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА $Y_3Fe_{5-x}Si_xO_{12}$

Бержанский В. Н., доктор физ.-мат. наук, профессор,

Власова Т. А., Горбованов А. И., аспирант,

Евстафьев И. И., канд. физ.-мат. наук, доцент, Лагунов И. М., ассистент,

Полулях С. Н., канд. физ.-мат. наук, доцент

В связи с открытием гигантских гальваномагнитных эффектов в оксидных магнитных полупроводниках (МПП) вблизи фазового перехода [1] внимание исследователей обращено к анализу физических условий, при которых в магнитных полупроводниках при их легировании реализуется переход в “металлическое” состояние. Концентрация и тип носителей заряда в МПП определяются валентностью и степенью легирования иновалентными диамагнитными примесями. При этом “а priori” нельзя сказать какой примесный ион сможет обеспечить указанный переход и может ли быть он реализован в конкретном соединении в принципе.

В данной работе исследованы магнитные, кинетические и резонансные свойства семейства железо-иттриевых гранатов (ЖИГ) $Y_3Fe_5-xSi_xO_{12}$, технология синтеза которых в настоящее время хорошо отработана. Известно, что при малой концентрации ($x \leq 0,05$) ионов Si^{4+} , которые замещают ионы Fe^{3+} в d -позициях, увеличивается проводимость (σ) кристаллов ЖИГ на 7 порядков [2]. С целью изучения возможности перехода ЖИГ в “металлическую” фазу были синтезированы пленки $Y_3Fe_{5-x}Si_xO_{12}$ в широком диапазоне концентраций до $x = 0,19$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Материалы и методы. Пленки выращены методом ЖФЭ на подложках ГГГ в плоскости (111). Толщина пленок определялась интерферометрически и находилась в пределах 2,59–6,65 мкм. Для изучения ЯМР пленки дополнительно обогащались изотопом ^{57}Fe до 50%. Температура Кюри T_C определялась по спаду начальной восприимчивости. Проводимость измерялась двухзондовым методом на автоматизированной гальваномагнитной установке в диапазоне температур 300–600 К, включающем значение T_C . Показано, что все пленки имели n -тип проводимости. ЯМР исследовался на некогерентном ЯМР-спектрометре при $T = 77 K$.

На рис.1, 2 представлены концентрационные зависимости $\sigma(T)$ и энергии активации проводимости ΔE . Видно, что существенные изменения ΔE происходят в диапазоне $0 < x < 0,044$, затем зависимость выходит на плато. Значения ΔE определялись в области $T > T_C$,

так как при $T < T_c$ наблюдалось уменьшение ΔE . T_c снижается при легировании от 550 до 390 K при $x = 0,19$, причем наиболее заметные изменения происходят при $x \geq 0,073$.

В соответствие с требованиями электронейтральности при введении иона Si^{4+} , ближайшие к нему ионы Fe^{3+} снижают свою валентность, образуя примесные донорные ионы Fe^{2+} . Область делокализации примесного электрона, включающая соседние ионы, может быть определена как примесный центр или примесная макромолекула. В соответствие с современными представлениями о кинетике носителей в легированных полупроводниках, с увеличением концентрации примесей возможны следующие типы процессов переноса носителей в $Y_3Fe_5O_{12}:Si$ [3]. При низких концентрациях примесные центры не взаимодействуют между собой и энергия активации носителя при высоких температурах определяется либо величиной $\Delta E = m^* e^4 / (2h^2 \epsilon^2)$ (водородная модель), либо $\Delta E = e^2 / (\epsilon a)$ (поляронная модель). С ростом x примесные центры перекрываются, образуется примесная зона. При снижении температуры возможен перенос по зонам, образованным либо частично ионизированными (компенсированный полупроводник), либо неионизированными донорами. Проводимость по примесной зоне в гранатах реализуется при азотных температурах.

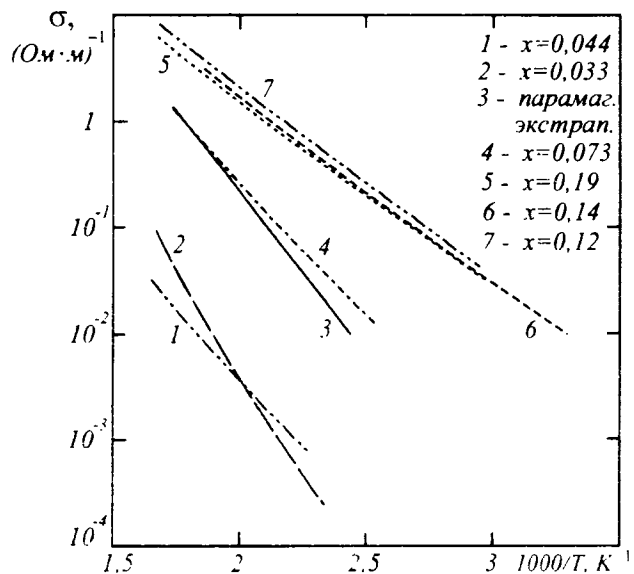


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости $Y_3Fe_{5-x}Si_xO_{12}$

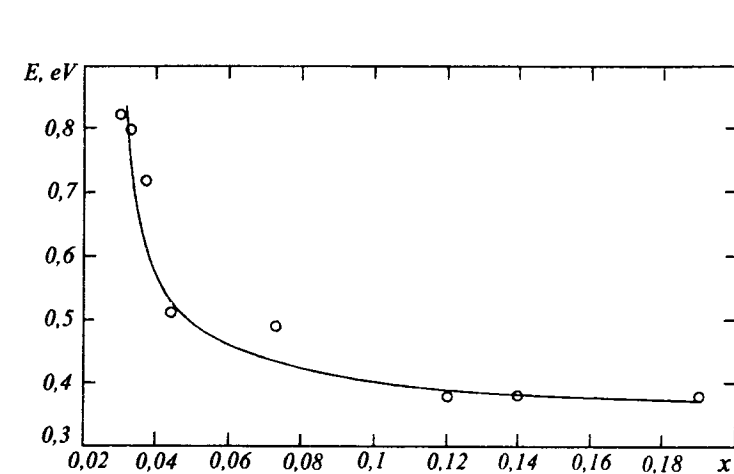


Рис. 2. Зависимость энергии активации проводимости от концентрации Si^{4+}

Уменьшение высокотемпературной энергии активации ΔE с ростом x (рис.2) связано либо с расширением примесной зоны, либо с увеличением диэлектрической проницаемости ϵ при легировании. Выход концентрационной зависимости $\Delta E(x)$ на плато при $x > 0,073$ обусловлен возможной экранировкой примесных центров свободными носителями при образовании примесной зоны. Изменение ΔE от T

при $T < T_C$ (отклонение кривой 4 от парамагнитной экстраполяции - кривая 3 на рис.1) связано со снятием вырождения энергетических зон по спину, которое обусловлено $s-d$ - обменным взаимодействием. Магнитный вклад в ΔE при этом пропорционален интегралу $s-d$ -обмена I_{sd} и приведенной намагниченности $m(T)$. В ЖИГ отсутствует аномалия $\sigma(T)$ вблизи T_C , характерная для магнитных полупроводников n -типа, что свидетельствует о том, что интеграл I_{sd} в гранатах ниже, чем в ферритах-шпинелях и халькошпинелях хрома [4]. Разбавление d позиций ионами Si^{4+} приводит к ослаблению косвенного межподрешеточного $a-d$ - обменного взаимодействия, что отражается в снижении T_C при больших x .

Примесные ионы Fe^{2+} обладают сильной спин-орбитальной связью и представляют собой эффективный канал электронно-ядерной релаксации. Поэтому дополнительная информация о формировании примесной зоны может быть получена по исследованию таких динамических параметров как времена продольной T_1 и поперечной T_2 ядерной релаксации.

Измерения показали: 1). T_1 и T_2 для ядер Fe^{3+} , участвующих в электронном обмене с ионами Fe^{2+} в рамках примесного центра существенно короче, чем ядер ионов Fe^{3+} матрицы; 2). переход от изолированных центров к примесной зоне осуществляется при пороговых концентрациях $0,037 \leq x_c \leq 0,044$, что совпадает с наиболее крутым участком падения энергии активации (рис.2); 3). на основе теории перколяции [3] произведена оценка радиуса примесных центров, который незначительно превышает размер элементарной ячейки $\sim 14 \cdot 10^{-10}$ м.

Таким образом, исследования показали, что введение примесных центров на основе $Si^{4+} - Fe^{2+}$ не способно привести к "металлическому" типу проводимости ЖИГ, что обусловлено достаточно большой глубиной их залегания $0,3$ eV, а также малым значениям интеграла $s-d$ - обменного взаимодействия. Представляет интерес исследовать центры, созданные введением иновалентных диамагнитных ионов в s - и a - позиции.

Литература.

1. Нагаев Э.Л. Успехи физических наук, Т.166, №8, 1996, С.833-858.
2. Antonini B., Paoletti A. et all. //JMMM 31-34, 1983, P. 149-150.
3. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. – М.: Наука, 1979, 416 с.
4. Мотт Н.Ф. Переходы металл-изолятор. – М.: Наука, 1979, 340 с.
5. Berzhansky V.N., Evstafjev I.I. Phys. Stat. Sol.(b) V.158, 1990, P. 643.