

СВЧ ПОГЛОЩЕНИЕ В КОНТАКТЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК $HgCr_2Se_4$ - ПОЛУПРОВОДНИК $InSb$

B.B.Осипов, Н.А.Виглин, И.В.Кочев, А.А.Самохвалов

Исследовано СВЧ поглощение в контакте ферромагнитного полупроводника $HgCr_2Se_4$ (ФМП) и полупроводника $InSb$ (П). Обнаружено гигантское увеличение магнитоплазменного поглощения в П при пропускании тока через контакт. Сделана попытка объяснить полученные результаты поляризацией носителей заряда в П.

Известно, что в ферромагнетиках при $T < T_c$ носители заряда поляризованы по спину за счет обменного взаимодействия. Величина поляризации изменяется от $\sim 100\%$ в ФМП до $\sim 1-10\%$ в ферромагнитных металлах¹. В теоретической работе² показано, что инжекция поляризованных носителей из ферромагнетика в полупроводник при пропускании тока через их контакт должна приводить к изменению физических свойств полупроводника. В частности, показано, что при спиновой поляризации носителей возможно возникновение поляризованного люминесцентного излучения при облучении неполяризованным светом. Нами также предполагалось, что при таком "намагничивании" свободных носителей должно произойти изменение СВЧ свойств П, в частности, увеличение интенсивности ЭПР на электронах проводимости.

С помощью серийного 3-х сантиметрового ЭПР-спектрометра *ERS-230* нами было проведено исследование СВЧ поглощения в контакте ФМП ($HgCr_2Se_4$) - П ($InSb$) при пропускании через него тока во внешнем магнитном поле. Известно, что величина *g*-фактора свободных электронов в $InSb$ составляет $g =$

-50, поэтому для частоты 10 ГГц линия ЭПР носителей наблюдается при $H \approx 130$ Э, причем на фоне гораздо более интенсивной широкой магнитоплазменной линии³. Параметры магнитоплазменного поглощения зависят от концентрации носителей, их подвижности, формы образца⁴.

Контакт ФМП и П достигался механическим прижатием двух полированных и протравленных пластин HgCr_2Se_4 и InSb, вырезанных из монокристаллов. Образцы HgCr_2Se_4 отжигались в парах ртути для получения высокой проводимости $\sigma \approx 10^2 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ *n*-типа. Образцы InSb были *n*-типа, легированные Te с концентрацией $\approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Как к HgCr_2Se_4 , так и к InSb припаивались индиевые токопроводящие контакты.

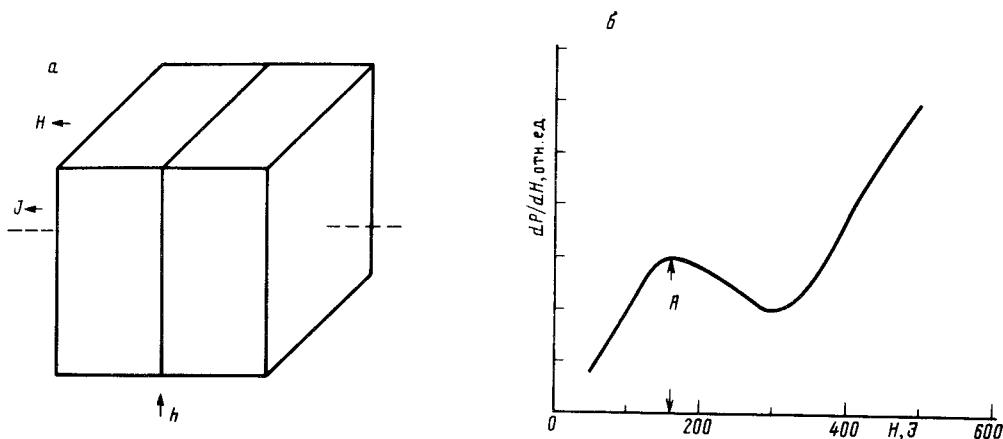


Рис. 1. *a* - Схема эксперимента; *б* - участок линии магнитоплазменного поглощения

На рис. 1*б* изображен участок магнитоплазменной линии в области резонанса на свободных носителях. Включение тока $J = 100$ мА увеличивало амплитуду магнитоплазменной линии *A* приблизительно в 100 раз. На фоне такого большого увеличения магнитоплазменной линии сигнал ЭПР на носителях обнаружен не был, вероятно, вследствие неоднородности размагничивающего поля от ФМП. На рис. 2 показана зависимость амплитуды магнитоплазменной линии от тока для контактной структуры 1. Видно, что *A* зависит от *J* линейно, увеличиваясь примерно в 100 раз по сравнению с *A* при *J* = 0. На рис. 3 приведена зависимость $A(T)/A(4,2)$ для двух контактных структур. Видно, что она приблизительно повторяет зависимость намагниченности с резким спадом в районе $T = 100$ К, хотя T_c для HgCr_2Se_4 составляет 120 К. При изменении направления тока через контакты на противоположное величина *A* не менялась. Проверено, что в образце InSb (без контакта с HgCr_2Se_4) пропускание тока не влияет на амплитуду *A*. Изменение температуры для одиночного образца InSb также слабо влияет на *A*. Заметим, что структура ФМП - П намагничивалась перпендикулярно плоскости контакта. Приложение магнитного поля параллельно плоскости контакта изменяло вид зависимости $\frac{dP}{dH}(H)$ и снижало эффект изменения *A(J)* в несколько раз. Необходимо отметить, что изучался участок магнитоплазменной линии в малых магнитных полях до 400-500 Э, то есть заведомо ниже резонансного поля ФМР в HgCr_2Se_4 на частоте 10 ГГц. Кроме этого, на отдельной пластине ФМП в диапазоне до 500 Э проверялось отсутствие линий естественного и неоднородного ферромагнитного резонанса как при пропускании через него тока так и без него.

Полученные результаты - линейная зависимость $A(J)$, возникающая только при контакте П с ФМП, исчезновение эффекта при переходе из ферромаг-

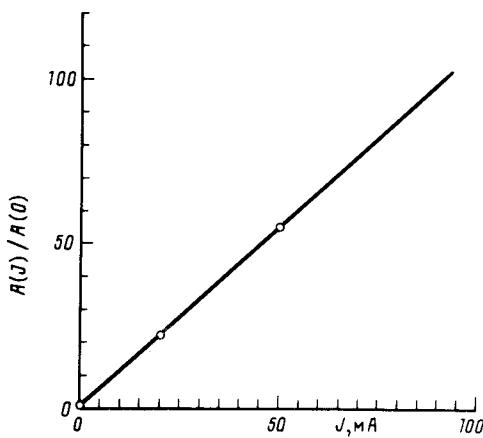


Рис. 2

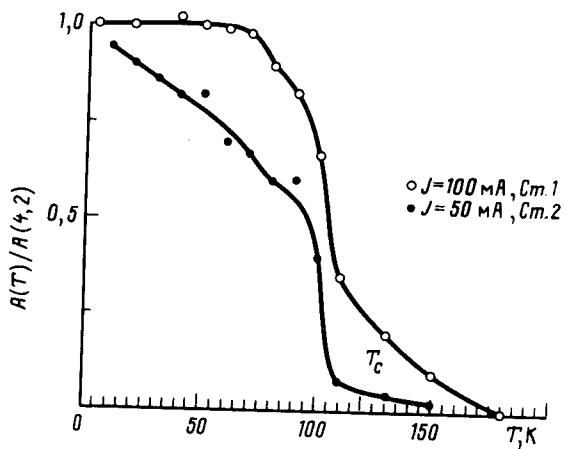


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость $A(J)/A(0)$ для $T = 4,2$ К

Рис. 3. Зависимость $A(T)/A(4,2)$ для двух значений тока

нитной области в парамагнитную могут свидетельствовать в пользу спиновой инжекции и соответствующей спиновой поляризации носителей в П при пропускании тока через контакт. Величина слоя поляризованных носителей может достигать большой толщины. Так в InSb время релаксации спиновой поляризации носителей заряда, определенное из экспериментов по ЭПР, составляет $10^{-6} - 10^{-7}$ с. Тогда при концентрации 10^{15} см $^{-3}$, подвижности 10^5 см $^2/V \cdot s$ и токе 100 мА скорость дрейфа будет $10^5 - 10^6$ см/с и носители будут поляризованы в слое толщиной ≈ 1 мм. Очевидно также, что при движении электронов из П в ФМП тоже будет происходить спиновая поляризация, но уже с обратным знаком: носители со спином, соответствующим поляризации ФМП будут проходить в него, а носители с обратной поляризацией спина отражаться от контакта и скапливаться около него, поскольку зона проводимости электронов с противоположной поляризацией спина в ФМП расположена на 1 эВ выше. Это могло бы объяснить независимость эффекта от направления тока. Одним из возможных механизмов объяснения изменения интенсивности магнитоплазменного резонанса может быть следующий: при переходе от поляризации к деполяризации при неизменной концентрации радиус поверхности энергии Ферми свободного электронного газа уменьшается в $2^{1/3}$ раз. Очевидно, что такой переход будет сопровождаться дополнительным возникновением градиента электрического потенциала в полупроводнике и, соответственно, возникновением электрического объемного заряда в П. Соответствующий электрический дипольный момент также будет пропорционален току. Очевидно, что данный эффект может сказываться на амплитуде магнитоплазменных колебаний, имеющих, как известно, электродипольную природу ⁴.

Литература

1. Кесслер И. Поляризованные электроны. М.: Мир, 1988.
2. Аронов А.Г., Пикус Г.Е. ФТП, 1976, 10, 1177.
3. Betens G. Phys. Rev. Lett., 1960, 4, 62.
4. Dresselhaus G., Kip A.P., Kittel C. Phys. Rev., 1955, 100, 618.