

УДК 621.315.592

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТА  
МЕТАЛЛ—ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ В. В. Осипов, В. И. Михайлов, А. А. Самохвалов,  
Н. М. Чеботаев

Экспериментально исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта металл (М)—ферромагнитный полупроводник (ФМП). Полученные результаты объяснены туннелированием носителей заряда из М в верхнюю незаполненную подзону ФМП, образованную из зоны проводимости расщеплением за счет  $s$ - $d$ -обменного взаимодействия. Также обнаружено, что при понижении температуры имеет место переход от выпрямляющего контакта к омическому, что связано с увеличением работы выхода электронов из ФМП вследствие так называемого «красного сдвига» дна зоны проводимости.

Свойство контакта металл — полупроводник, например выпрямляющий переход Шоттки [1], используется в различных технических приложениях. Поэтому с точки зрения создания магнитоуправляемых диодов на основе ферромагнитного полупроводника несомненный интерес представляет исследование ВАХ контакта М—ФМП.

В [2] было показано, что в ряде случаев в контакте М—ФМП реализуется выпрямляющий переход Шоттки. Однако для контакта М—ФМП могут существовать и другие новые возможности, до сих пор не исследованные и состоящие в следующем. В М носители заряда деполаризованы. В ФМП при  $T < T_k$  зона проводимости расщепляется на две подзоны с различной спиновой поляризацией, причем величина расщепления  $\Delta_{sd} \gg kT$ , поэтому все носители находятся в нижней подзоне, а верхняя пуста. При приложении к контакту М—ФМП достаточно сильного электрического поля при  $T < T_k$  для электронов из М с поляризацией, соответствующей верхней подзоне, появляется возможность туннелирования в верхнюю подзону. Как известно из теоретических работ [3, 4], заброс носителей в верхнюю подзону ФМП должен приводить к обменному испусканию магнонов носителями тока и соответствующему увеличению рассеяния носителей заряда на магнонах (уменьшению их подвижности). Этот процесс должен приводить к нелинейностям ВАХ. В данной работе сообщается о результатах исследования ВАХ контакта М—ФМП  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$   $n$ -типа, объясняющихся туннелированием носителей заряда из М в верхнюю подзону ФМП.

## 1. Методика измерений и образцы

ВАХ контакта М—ФМП исследовались на несимметричных контактах. На одну из граней монокристаллического образца наносился контакт из  $\text{HgIn}$  пасты площадью во всю грань. На противоположной грани формировался игольчатый контакт. Применялись два типа подружженных игл. Первый тип игл изготовлялся электрополировкой медной проволоки диаметром 30 мкм. Далее острие контакта смачивалось  $\text{HgIn}$  пастой. Выбор этого типа контактного материала обуславливался тем, что в [5] сообщалось о наблюдении  $N$ -образной ВАХ и СВЧ генерации в приконтактной области образцов  $n$ -типа  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  с контактами из этого мате-

риала. Толщина полученной на игле пленки из пасты могла регулироваться испарением при нагреве. Иглы другого типа были вольфрамовыми из промышленно изготавливаемых СВЧ диодов. Использовались как естественные грани монокристаллов, так и сошлифованные и протравленные. Существенной разницы в результатах между естественными и сошлифованными и протравленными гранями обнаружено не было.

Исследуемые образцы отжигались в парах ртути с различным давлением и имели концентрацию носителей от  $10^{-19}$  до  $5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  при 300 К и от  $10^{19}$  до  $10^{17}$  см $^{-3}$  при 77 К.

Сопротивление игольчатых контактов составляло 1—10 кОм. Оценка размера контакта по величине удельного сопротивления монокристалла (без учета контактного сопротивления) дает величину 0.1—1 мкм.

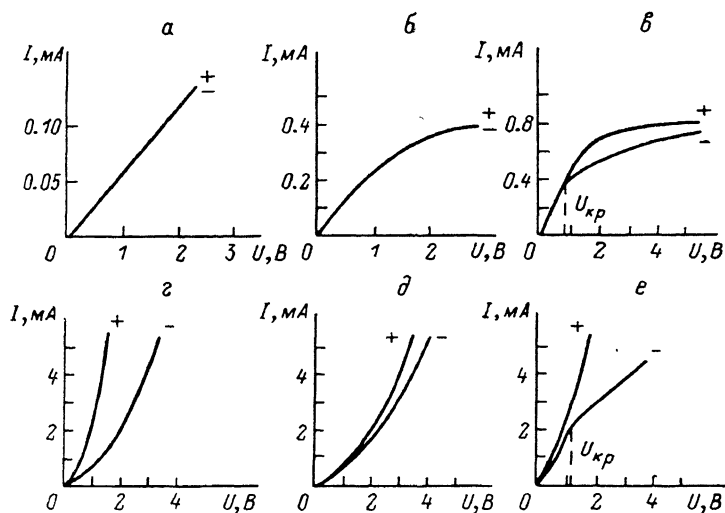


Рис. 1.

Использование импульсной методики ( $\tau_{\text{мин}} = 5$  мкс) позволяло в некоторых случаях полностью исключить нагрев ФМП под контактом. Так, прямоугольность импульсов тока и напряжения при наличии температурной зависимости сопротивления контакта свидетельствует об отсутствии джоулевого нагрева ФМП.

ВАХ записывалась по методу амперметра—вольтметра с помощью двухканальной стробоскопической приставки [6].

## 2. Результаты измерения

На рис. 1, а—в изображены ВАХ для контакта  $\text{HgIn-HgCr}_2\text{Se}_4$  ( $p = 0.5$  атм) при различных температурах. Для удобства сравнения прямая и обратная ветви ВАХ изображены в одном квадранте. Знак у кривой соответствует знаку напряжения на игле. При  $200 \leq T \leq 300$  К (рис. 1, а) ВАХ представляют собой прямые, совпадающие для обоих направлений тока. При  $T_k \sim 115 \div 120$  К  $\leq T \leq 200$  К (рис. 1, б) на ВАХ образуется нелинейность. При  $T \leq T_k \approx 120$  К и  $U > U_{\text{кр}}$  (рис. 1, в) возникает разница для различных направлений тока, т. е. у ВАХ появляются выпрямляющие свойства.

На рис. 1, г—е представлены ВАХ для контакта  $\text{HgIn-HgCr}_2\text{Se}_4$  ( $p = 10$  атм) при различных температурах. При 300 К (рис. 1, г) ВАХ контакта имеет диодные свойства. При понижении температуры  $T_k \leq T \leq 220$  К (рис. 1, д) выпрямляющие свойства контакта уменьшаются, а при  $T \leq T_k \sim 120$  К и  $U > U_{\text{кр}}$  (рис. 1, е) увеличиваются.

Можно ввести параметр диодности  $D = I^+/I^-$  — отношение токов различных направлений через контакт при одинаковых по величине, но разных по знаку напряжениях. На рис. 2 представлены зависимости  $D(T)$

для различных образцов и типов иголок. Для контакта  $\text{HgIn}-\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ ,  $p=0.5$  атм (рис. 2, 1)  $D$  не зависит от температуры при  $T > 120$  К, тогда как для контакта  $\text{W}-\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ ,  $p=0.5$  атм (рис. 2, 2)  $D$  растет с увеличением температуры. Для контакта  $\text{HgIn}-\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ ,  $p=10$  атм (рис. 2, 3) при общей тенденции к уменьшению зависимость  $D(T)$  немонотонна, а в случае  $p=1$  атм (рис. 2, 4) имеет резкий скачок в районе 240 К.

На рис. 3 представлены зависимости  $U_{\text{кр}}(T)$  для различных образцов и типов иголок: 1, 3 —  $\text{W}-\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ ,  $p=10$  (1) и 0.5 атм (3); 2, 4 —  $\text{HgIn}-\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ ,  $p=0.5$  (2) и 1 атм (4). Как видно,  $U_{\text{кр}}(T)$  для всех образцов и типов иголок приблизительно совпадают и повторяют температурную зависимость намагниченности. В частности, при  $T=0$   $U_{\text{кр}}=1, 1$  В, при  $T \approx 120$  К  $U_{\text{кр}}=0$ .

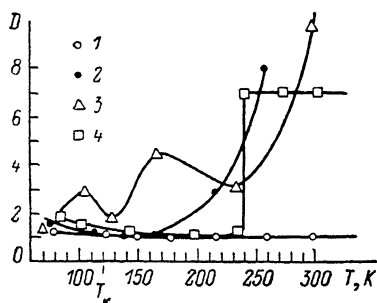


Рис. 2. Зависимость  $D(T)$  для контакта  $\text{M}-\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ .

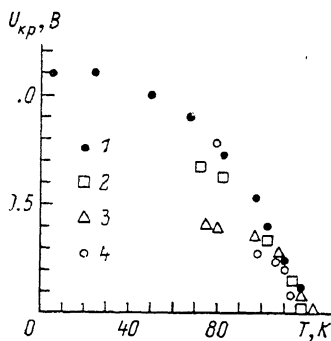


Рис. 3. Зависимости  $U_{\text{кр}}(T)$  для контакта  $\text{M}-\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ .

### 3. Обсуждение результатов

Рассмотрим коротко основные свойства контакта металл—полупроводник [1]. В зависимости от соотношения работ выхода металла и полупроводника  $n$ -типа возможны как омический, так и выпрямляющий контакты. В первом случае работа выхода электронов из металла  $\lambda_{\text{м}}$  меньше работы выхода из полупроводника  $\lambda_{\text{п}}$ . При контакте электроны из металла переходят в полупроводник, образуя у поверхности контакта полупроводника обогащенный слой с повышенной концентрацией. ВАХ такого контакта является омической. Во втором случае  $\lambda_{\text{м}} > \lambda_{\text{п}}$  электроны из полупроводника переходят в металл, образуя в полупроводнике обедненный слой. В этом случае контакт обладает выпрямляющими свойствами (диод Шоттки), причем знак запирающего напряжения соответствует минусу на металле. Именно такой знак имеет запирающее напряжение на ВАХ контактов  $\text{M}-\text{ФМП}$ .

Рассмотрим теперь некоторые дополнительные возможности, которые возникают в контакте  $\text{M}-\text{ФМП}$ . На рис. 4 изображена энергетическая схема контакта  $\text{M}-\text{ФМП}$  без разности (а) и с разностью (б) потенциалов на контакте. Концентрации носителей заряда в исследуемых образцах составляют  $10^{17}-10^{19}$   $\text{см}^{-3}$ , а зависимости  $\rho(T)$  имеют квазиметаллический характер, поэтому электронный газ во всем рассматриваемом температурном интервале можно считать близким к вырождению. При  $n=10^{19}$   $\text{см}^{-3}$   $E_F \approx 100$  К.

Величина  $s-d$ -обменного расщепления составляет

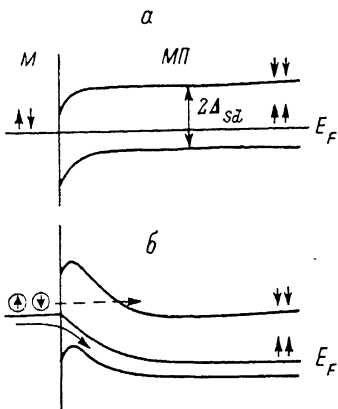
$$\Delta_{sd} = \pm \frac{1}{2} S J_{sd} \frac{M(T)}{M_0}. \quad (1)$$

Здесь  $J_{sd}$  — величина  $s-d$ -обменного интеграла;  $M(T)$  — намагниченность насыщения при температуре  $T$ ;  $M_0$  — намагниченность насыщения при  $T=0$  К. Для  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$   $n$ -типа  $\Delta_{sd}$  составляет, по данным оптических измерений по величине красного сдвига,  $\approx 0.5$  эВ при  $T=4.2$  К [7]. Как видно из (1), зависимость  $\Delta_{sd}(T)$  пропорциональна зависимости  $M(T)$ .

При подаче отрицательного напряжения на  $M$  (рис. 4, б), кроме обычного движения электронов вблизи уровня  $E_F$  (отмечено стрелкой), для половины электронов из металла с соответствующей поляризацией возможно туннелирование в верхнюю подзону (штриховая стрелка). При этом закон сохранения энергии дает

$$U_{кр} \geq 2\Delta - E_F \approx 2\Delta(T). \quad (2)$$

Наличие туннелирования в верхнюю подзону при  $U > U_{кр}$  должно приводить к уменьшению электропроводности, так как подвижность вследствие  $s-d$ -обменного испускания магнона существенно ниже [3].



Как видно из рис. 1, именно такое пороговое уменьшение электропроводности возникает при  $U > U_{кр}$  и  $T < T_k$ . Температурная зависимость  $U_{кр}(T)$  для различных типов игл и образцов с различными степенями легирования (на рис. 3) повторяет температурную зависимость намагничен-

Рис. 4. Энергетическая схема контакта  $M$ —ФМП.

ности. Величина  $U_{кр}$  приблизительно совпадает с величиной  $2\Delta_{sd}$ , определенной из вышеупомянутых оптических измерений. Так, на рис. 3 при  $T=4.2$  К  $U_{кр} \approx 1.1$  В и  $2\Delta_{sd} = 1.1$  эВ, что близко к величине  $2\Delta_{sd} = 1$  эВ из [7].

Рассмотрим теперь переход выпрямляющий—омический контакт при понижении температуры (рис. 2). По-видимому, такой переход может быть объяснен красным сдвигом. При понижении температуры вследствие красного сдвига увеличивается работа выхода для ферромагнитного полупроводника  $\chi_{мп}$ , а работа выхода для металла  $\chi_m$  остается неизменной. Поэтому такой переход (по аналогии со свойствами контакта металл—полупроводник) отражает переход от  $\chi_m > \chi_{мп}$  к  $\chi_m < \chi_{мп}$ . Согласно [7], красный сдвиг при понижении температуры от 300 до 200 К составляет 0.1 эВ. В то же время причины немонотонного поведения  $D(T)$  для контакта  $HgIn-HgCr_2Se_4$  ( $p=10$  атм) неясны.

Интересным явлением кажется также переход от омического к выпрямляющему контакту при повышении концентрации носителей заряда с увеличением степени легирования для случая  $HgIn-HgCr_2Se_4$  в районе  $T=300$  К. Вероятно, что такой переход обусловлен ростом  $E_F \sim n^{2/3}$  с ростом  $n$  и соответствующим уменьшением работы выхода.

#### Список литературы

- [1] Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 670 с.
- [2] Бужор В. П. // Тез. докл. Всес. конф. «Тройные полупроводники и их применение». Кишинев: Штиинца, 1983. С. 87.
- [3] Naas C. // IEEE Trans. Magn. 1969. V. 5. N 3. P. 487.
- [4] Roth S. // Phys. St. Sol. (a). 1972. V. 13. N 2. P. 443—473.
- [5] Осипов В. В., Самохвалов А. А., Костылев В. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 9. С. 2809—2814.
- [6] Ильин Д. А., Осипов В. В. // ПТЭ. 1982. № 6. С. 96—98.
- [7] Selmi A., Le Toulles R., Faymonville R. // Phys. St. Sol. (b). 1982. V. 114. N 2. P. K97—K99.

Поступило в Редакцию  
УрО АН СССР  
Свердловск

Институт физики металлов  
24 января 1989 г.