

УДК 621.315.592

© 1991

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТАКТА МЕТАЛЛ—ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК HgCr_2Se_4 p -ТИПА

В. В. Осипов, Н. А. Морозова, И. В. Кочев

Исследованы электрические свойства контакта металл (М)—ферромагнитный полупроводник (ФМП) HgCr_2Se_4 p -типа. Показано, что при комнатной температуре возникает выпрямление, связанное с барьером Шоттки в контакте. При понижении температуры ВАХ становится почти омической. При измерении вторых производных ВАХ выделяются особенности, связанные с шириной запрещенной зоны и p - d -обменным расщеплением валентной зоны.

В [1] при исследовании ВАХ М—ФМП HgCr_2Se_4 n -типа было показано следующее. В М носители тока деполяризованы, в ФМП при $T < T_k$ зона проводимости расщеплена на две подзоны с различной спиновой поляризацией, причем величина расщепления

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

Здесь I_{sd} — величина s - d -обменного интеграла; $M(T)$ — намагниченность насыщения при температуре T ; M_0 — намагниченность насыщения при $T=0$. Так как $\Delta_{sd} \gg kT$, то верхняя подзона пуста. При подаче отрицательного напряжения на $MU > 2$ (Δ_{sd}/e) электроны из металла с поляризацией, соответствующей поляризации верхней подзоны ФМП, начинают туннелировать в верхнюю подзону ФМП. (Здесь и далее e — заряд электрона). Как известно из теоретических работ [2, 3], заброс носителей в верхнюю подзону ФМП должен приводить к обменному испусканию магнонов носителями тока и к соответствующему увеличению рассеяния носителей на магнонах (уменьшению их подвижности). В результате при $eU_{кр} > 2\Delta$ на ВАХ возникает излом, соответствующий увеличению сопротивления. Величина увеличения сопротивления для контакта М—ФМП HgCr_2Se_4 n -типа составляет несколько десятков процентов. Таким образом, измерение $U_{кр}$ позволяет определить величину Δ_{sd} .

В данной работе проведены исследования ВАХ контакта М—ФМП p -типа, имеющего другую величину p - d -обменного расщепления валентной зоны. Отметим, что при таком туннелировании ВАХ и производные от нее несимметричны относительно знака приложенного на контакт напряжения. При малых размерах контакта электрическое поле вблизи него может быть достаточно сильным для межзонного гонизационного пробоя. Если удовлетворяется условие $l > r$, где l — длина свободного пробега носителя тока в полупроводнике, r — радиус контакта, то возможно достижение баллистического режима работы контакта: при $eU_{кр} > E_g$ на ВАХ должна появляться особенность, связанная с межзонной ионизацией. В данном случае ВАХ должна быть симметричной при перемене знака напряжения на контакте.

Для измерения использовались монокристаллы HgCr_2Se_4 p -типа нелегированные и легированные серебром. В качестве точечного (игольчатого) контакта использовались тонкие электролитически заточенные подпружиненные медные проволочки с острием, смоченным InGa пастой. Другой, массивный контакт, припаивался индием. Для лучшей воспроизводимости результатов поверхности кристаллов были очищены путем травления. ВАХ записывались на самописце с помощью пилообразного напряжения, т. е. по методике постоянного тока. Измерялись также первые и вторые производные от ВАХ. Для получения зависимостей dU/dI (U) и d^2U/dI^2

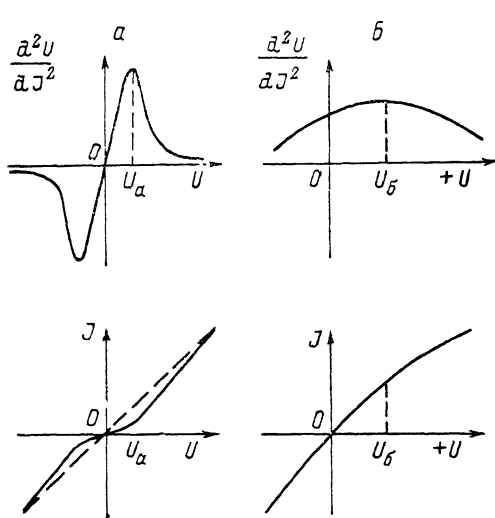


Рис. 1. Два вида зависимостей d^2U/dI^2 (U) и соответствующие ВАХ контакта М—ФМП HgCr_2Se_4 p -типа.

Для наглядности отклонения ВАХ от закона Ома сильно увеличены.

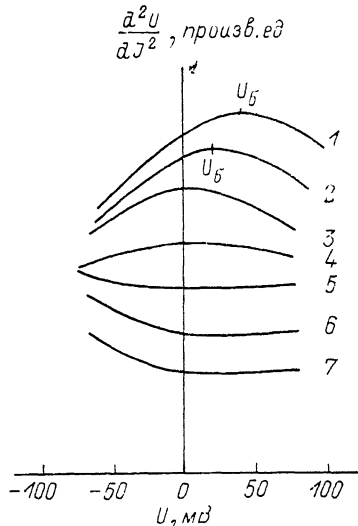


Рис. 2. Зависимости d^2U/dI^2 (U) типа δ для нелегированного образца при $T=50$ (1), 90 (2), 130 (3), 150 (4), 180 (5), 200 (6), 300 К (7).

dI^2 (U) пилообразное напряжение было промодулировано по амплитуде с частотой $f \sim 1$ кГц. Сигнал, пропорциональный dU/dI , регистрировался на частоте f , а сигнал, пропорциональный d^2U/dI^2 , на частоте $2f$. Такая методика позволяла регистрировать отклонения от закона Ома с чувствительностью $\sim 10^{-4}$ при амплитуде модуляции 10 мВ.

2. Результаты измерений и их обсуждения

В отличие от контакта М—ФМП HgCr_2Se_4 n -типа [1] запиорное напряжение для контакта М—ФМП HgCr_2Se_4 p -типа возникает при положительной полярности (+ на игле), что согласуется с простейшими качественными представлениями о свойствах контакта металл—полупроводник [4]. При переходе в ферромагнитную область выпрямление исчезает, т. е. контакт становится омическим, как и для HgCr_2Se_4 n -типа. Так как сдвиг потолка валентной зоны вследствие p — d -обменного расщепления, подобного (1), невелик и составляет ~ 0.05 эВ при $T=0$ [5], то соответствующее изменение работы выхода электронов для HgCr_2Se_4 p -типа также невелико и поэтому исчезновение выпрямления при переходе в ферромагнитную область вряд ли может быть объяснено изменением соотношения работ выхода ФМП и М на основе простейшей модели контакта металл—полупроводник. Далее никаких особенностей на ВАХ при $T < T_k$, подобных обнаруженным для контакта М—ФМП HgCr_2Se_4 n -типа, обнаружить не удалось. Поэтому с целью обнаружения малых отклонений от закона Ома были проведены измерения зависимостей dU/dI (U) и d^2U/dI^2 (U).

Были обнаружены два вида зависимости $d^2U/dI^2(U)$ (рис. 1). Здесь же схематически изображены ВАХ контакта с соответствующими особенностями. Вследствие их малости эти особенности изображены в увеличенном масштабе. Каждый из этих видов формировался приблизительно в половине случаев образования контакта. В случае переформирования контакта также наблюдался переход от одной формы зависимостей d^2U/dI^2 к другой. Величина отклонения от закона Ома, связанная с зависимостью типа *б*, составляла 10^{-3} ; величина аналогичного отклонения для зависимости типа *а* была в 20—30 раз больше. Зависимость *а* представляет собой минимум дифференциальной проводимости при $U=0$, а максимум зависимости *б* — точку максимальной кривизны. Зависимости типа *а* были центрально-симметричны относительно $U=0$ при низких температурах. Однако при повышении температуры выше температуры Кюри такая симметрия постепенно терялась и зависимость этого типа полностью исчезала при температурах выше ~ 220 К.

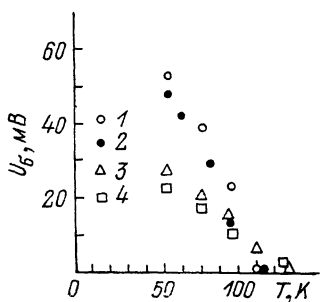


Рис. 3. Зависимости $U_6(T)$ для образцов $\text{Hg}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ с различным легированием. $x=0$ (1, 2), 0.02 (3), 0.05 (4).

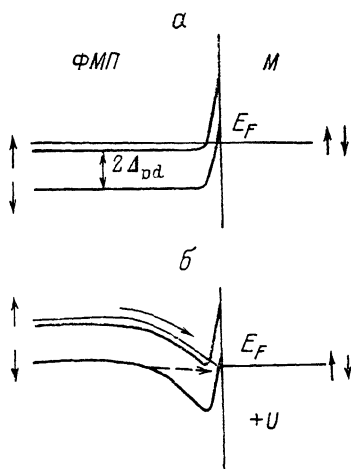


Рис. 4. Энергетическая схема контакта М—ФМП HgCr_2Se_4 *p*-типа в отсутствие электрического поля (*а*) и при приложении положительного напряжения к металлическому электроду (*б*).

Сплошной стрелкой показано обычное движение электронов в валентной зоне; штриховой — туннелирование электрона, в результате которого в обменно-расщепленной подзоне ФМП образуется дырка.

На рис. 2 схематически приведены зависимости $d^2U/dI^2(U)$ типа *б* (рис. 1) для нелегированного образца при различных температурах. Видно, что d^2U/dI^2 , соответствующая кривизне ВАХ, при $T=300$ К в заперном напряжении не меняется, в прямом напряжении кривизна возрастает. При уменьшении температуры кривая становится симметричной. Таким образом, выпрямление исчезает, ВАХ становится почти омической. При $T > T_K$ центр симметричной кривой смещается в сторону положительных напряжений. На ВАХ это соответствует уменьшению дифференциальной проводимости при $U > U_6$.

На рис. 3 представлены зависимости $U_6(T)$ для различных образцов. Видно, что зависимости $U_6(T)$ приблизительно повторяют температурные зависимости $M(T)$, а величины eU_6 численно приблизительно соответствуют величинам $2\Delta_{pd}$ для HgCr_2Se_4 *p*-типа. Зависимости $U_6(T)$ могут быть измерены только до температур $T \sim 50$ К, так как далее сопротивление контакта значительно возрастало. Следовательно, как и в [1], полученные зависимости $U_6(T)$ могут быть связаны, согласно формуле (1), с *p*-*d*-обменным расщеплением валентной зоны.

На рис. 4 изображена возможная энергетическая схема для омического контакта М—ФМП *p*-типа. Видно, что при положительной полярности на *M* для электронов в валентной подзоне со спиновой поляризацией, противоположной поляризации электронов в потолке валентной зоны

ФМП, при $eU > 2\Delta_{pd}$ появляется возможность туннелирования в металлический электрод, в результате чего в этой валентной подзоне образуется дырка. Как и для электронов в различных спиновых подзонах полупроводника n -типа, подвижность дырок в нижней подзоне вследствие $p-d$ -обменного испускания магнона также должна быть меньшей, чем в верхней подзоне. В результате при $eU_0 > 2\Delta_{pd}$ на ВАХ должна появляться особенность, что и подтверждается зависимостями $U_0(T)$, повторяющими, согласно (1), температурную зависимость намагниченности. Величины eU_0 также совпадают с определенным в [5] из экспериментов по оптическому поглощению $p-d$ -обменным расщеплением валентной зоны. Необходимо отметить, что величина нелинейности для контакта М—ФМП

HgCr_2Se_4 p -типа при таком туннелировании составляет $\sim 10^{-3}$, тогда как для n -носителей соответствующая нелинейность составляет несколько десятков процентов (1). Отсюда, в частности, можно сделать вывод, что

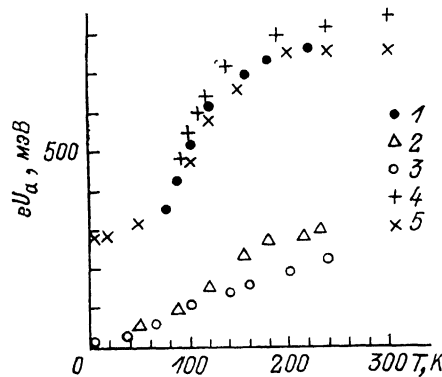


Рис. 5. Зависимости $eU_a(T)$ (1—3) для образцов $\text{Hg}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$ с различным легированием (1 — $x=0$, 2 — 0.02, 3 — 0.1). Зависимости края оптического поглощения из [5, 6] для нелегированных образцов HgCr_2Se_4 (4, 5).

рассеяние с переворотом спина в 10^2 — 10^3 раз более эффективно ограничивает подвижность для HgCr_2Se_4 n -типа, чем для HgCr_2Se_4 p -типа, что, вероятно, объясняет наличие пиков на зависимостях $\rho(\tau)$ для HgCr_2Se_4 n -типа при $T=T_X$ и отсутствие таких пиков для HgCr_2Se_4 p -типа.

На рис. 5 представлены зависимости $U_a(T)$, определенные из зависимостей типа a (рис. 1) для образцов с разным легированием. Здесь же приведены зависимости края оптического поглощения из [5, 6], определенные разными авторами для нелегированных образцов при разных значениях величин оптического поглощения. Видно, что для нелегированных образцов эти зависимости приблизительно совпадают. Это дает основание предполагать, что зависимости типа a (рис. 1) определяются вкладом баллистических носителей в ток контакта: при $r < l$ носитель приобретает энергию, равную разности потенциалов, приложенной к контакту. Здесь r — радиус контакта, l — длина свободного пробега носителя заряда в полупроводнике. Если энергия носителя заряда больше ширины запрещенной зоны E_g , то он может выбивать другие носители из валентной зоны в зону проводимости при $eU > E_g$. В частности, из рис. 5 видно, что из измерения зависимостей U_a можно определить красный сдвиг края оптического поглощения.

Определим, насколько вероятно выполнение условия $r > l$. По-видимому, трудно рассчитывать, что это условие будет буквально выполняться для всей области контакта прежде всего вследствие сминания острия металлического электрода. Однако, вероятно, оно может выполняться на части площади контакта, когда на большой площади контакта вследствие неидеальности обработки поверхности полупроводника могут иметь место микронеровности, удовлетворяющие условию $r > l$. В этом случае, естественно, баллистические электроны могут давать только малый вклад в ток всего контакта, что и определяет малую величину эффекта, наблюдаемую в эксперименте. По соотношению подвижности носителей заряда в n - и p -зонах $\sim 10^2$ и наблюдаемой величине эффекта можно оценить, что вклад баллистических носителей в ток контакта для случая a составляет $\sim 10^{-4}$.

Из рис. 5 видно также, что величина красного сдвига по мере увеличения легирования уменьшается. Такое уменьшение величины красного сдвига с увеличением концентрации носителей заряда наблюдается и в оптических измерениях [7]. Остается непонятным, почему численно $U_a(T)$ близки к нулю при уменьшении температуры для легированных образцов. Возможно, что на величину U_a в этом случае влияют поверхностные эффекты.

Возможно также, что переход от одного вида зависимостей (рис. 1) к другому определяется количеством микронеровностей, для которых выполняется условие возникновения баллистических носителей $r < l$ в контакте М—ФМП. При большом числе таких неровностей вид зависимости $d^2U/dI^2(U)$ определяется ионизацией баллистическими носителями валентных электронов в зону проводимости, а при малом их числе вид зависимости d^2U/dI^2 определяется возникновением дырок, имеющих меньшую подвижность вследствие рассеяния с испусканием магнонов.

Таким образом, несмотря на отсутствие каких-либо особенностей на ВАХ контакта М—ФМП HgCr_2Se_4 p -типа, исследование $dU/dI(U)$ и d^2U/dI^2 позволяет определить основные зонные особенности ФМП, такие как p — d -обменное расщепление валентной зоны, а также зависимость ширины запрещенной зоны от температуры.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Осипов В. В., Михайлов В. И., Самохвалов А. А., Чеботаев Н. М. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 9. С. 37—40.
- [2] Haas G. // IEEE Trans. Magn. 1969. V. 5. N 3. P. 487.
- [3] Roth S. // Phys. St. Sol. (a). 1972. V. 13. N 2. P. 443—473.
- [4] Бонч-Бруевич В. А., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 617 с.
- [5] Кунькова З. Е., Голик Л. Л., Паксеев В. Е. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 6. С. 1877—1879.
- [6] Arai T., Wakaki M., Onari S. et al. // J. Phys. Soc. Jap. 1973. V. 34. N 1. P. 68—73.
- [7] Голик Л. Л., Кунькова З. Е., Паксеев В. Е. и др. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 10. С. 3080—3085.

Институт физики металлов
УО АН СССР
Свердловск

Поступило в Редакцию
25 января 1991 г.