

гермия его кинетической энергии. Расчетные и экспериментальные результаты исследования изменения глубины внедрения ударяющего тела с уменьшением плотности преграды из пористого материала согласуются с зависимостью величины давления  $p_1$  в точке торможения, рассчитанной по ударным адиабатам пористой меди (рис. 1, б).

Основной результат теоретического и экспериментального исследования сверхзвукового внедрения ударяющего тела в пористые среды состоит в том, что эффекты, связанные с ударным сжатием пористых тел, в частности увеличение внутренней энергии и связанная с ним диссипация кинетической энергии ударяющего тела, в значительной степени компенсируют снижение уровня инерционного сопротивления, обусловленное меньшей начальной плотностью по сравнению со сплошными телами того же состава.

### Список литературы

- [1] *Лаврентьев М. А.* // УМН. 1957. Т. 12. № 4. С. 41—56.
- [2] *Златин Н. А., Кожушко А. А.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 2. С. 330—334.
- [3] *Златин Н. А., Кожушко А. А.* // ФГВ. 1980. № 5. С. 94—96.
- [4] *Сагомонян А. Я.* Проникание. М., 1974.
- [5] *Шалль Р.* // Физика быстропотекающих процессов. М.: Мир, 1971. Т. 2. С. 276—349.
- [6] *White J., Wahl M., Backofen J.* // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 52. № 6. P. 4515—4517.
- [7] *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1968.
- [8] High-velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. New York: Academic Press, 1970.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград |

Поступило в Редакцию  
12 июля 1990 г.

06  
© 1991 г.

Журнал технической физики, т. 61, в. 6, 1991

## СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР НЕМАГНИТНЫЙ—МАГНИТНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК $\text{Fe}_3\text{O}_4$ В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ—ДИЭЛЕКТРИК

*Н. А. Дрокин, С. Г. Овчинников*

Потенциальные барьеры, возникающие в области контакта полупроводников с металлами или другими полупроводниками, определяются электронным энергетическим спектром полупроводников, разностью работ выхода электронов с уровня Ферми и поверхностными состояниями контактирующих материалов. При создании контактов с использованием полупроводников, обладающих атомным магнитным порядком (магнитные полупроводники), можно ожидать существенных изменений барьерных структур из-за наличия взаимосвязи электронной подсистемы с магнитными состояниями в таких полупроводниках.

Изменение величины барьера и выпрямляющих характеристик было обнаружено при исследовании контакта металл—магнитный полупроводник  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  и  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  в работах [1, 2] из-за наличия спинового расщепления зон при переходе из парамагнитного в ферромагнитное состояние. Изменения барьерных структур должны возникать и при других типах фазовых переходов, существующих в магнитоупорядоченных соединениях, например при переходе металл—полупроводник. Такие переходы, вызванные перестройкой энергетического спектра, наблюдаются в целом ряде соединений  $d$ - и  $f$ -металлов.

В данной работе для обнаружения изменений в контактной структуре при переходе металл—полупроводник использовался типичный представитель такого перехода — магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Контакт магнетита осуществлялся с широко распространенными полупроводниками Ge, Si, GaAs как  $p$ -, так и  $n$ -типов с концентрацией примесей  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и удельным сопротивлением  $\rho \sim 1$ —10 Ом·см. Монокристаллы магнетита в металлической фазе обладали сопротивлением  $\rho \sim 20$  Ом·см, а при переходе в полупроводниковую фазу при  $T_B = 119$  К оно увеличивалось до значений  $\rho \sim 10^4$ — $10^5$  Ом·см.

Контакт осуществлялся при механическом сжатии сколов монокристаллов полупроводников и магнетита. Омический контакт со стороны магнетита изготовлялся точечной микро-

сваркой медного провода, а со стороны полупроводников — термодиффузией соответствующих низкотемпературных сплавов для  $p$ - и  $n$ -типов материалов. Исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных структур в диапазоне температур от 300 до 77 К.

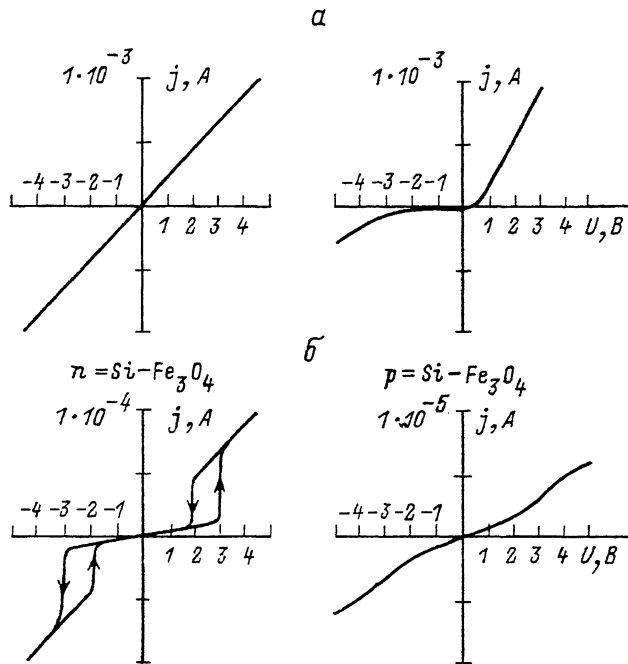


Рис. 1. ВАХ контактов  $n$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и  $p$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> при  $T=250$  (а) и 90 К (б).

На рис. 1 приведены ВАХ для контактов  $n$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и  $p$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> при  $T=250$  К (магнетит находится в металлической фазе) и при  $T=110$  К (в полупроводниковой). При  $T > T_B$  для  $n$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ВАХ линейны, а для  $p$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> являются выпрямляющими. В области перехода в полупроводниковое состояние контакт  $p$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> становится невыпрямляющим,

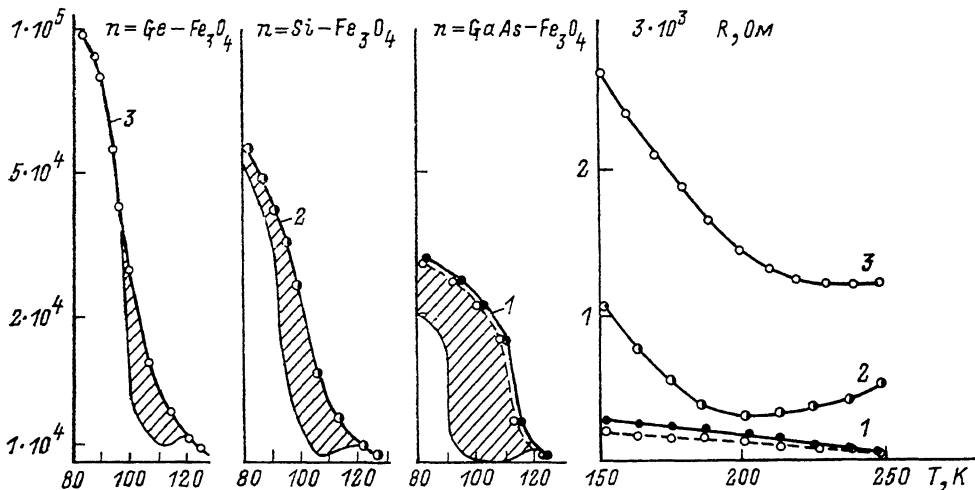


Рис. 2. Температурные зависимости  $R(T)$  контактов Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> с GaAs (1), Si (2), Ge (3).

а для  $n$ -Si-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> наблюдается хорошо известный эффект переключения магнетита в высокопроводящее состояние при достижении критического поля  $U_k=3$  В [3]. При дальнейшем понижении температуры критические поля увеличиваются до  $U_k=40$  В при 77 К.

Подобные закономерности наблюдаются и для контактов магнетита с Ge и GaAs, однако зависимости  $j(U)$  существенно различны. Для сравнения на прямолинейных участках ВАХ, а при наличии выпрямления в прямом направлении в области малых напряжений  $\sim 1$  В

рассчитывались температурные зависимости  $R(T)$  контактных структур, значения которых приведены на рис. 2 для  $n$ -типа полупроводников (кривые 1—3), а также для  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (штриховая кривая), измеренного с металлическими контактами. Заштрихованные участки соответствуют области переключения при  $U > U_k$ .

Для структур, содержащих полупроводники  $p$ -типа, зависимости  $R(T)$  оказываются почти подобными в прямом направлении, но области переключения отсутствуют. В некоторых случаях наблюдались лишь слабые эффекты переключения вблизи  $T_B$ . Видно, что наименьшие отличия зависимостей  $R(T)$  от магнетита проявляются для структур с GaAs, а наибольшие — для структур с Ge. Это свидетельствует об образовании барьеров на границе полупроводник—магнетит.

Для интерпретации полученных результатов рассмотрим электронную структуру магнетита. Эволюция представлений об электронных свойствах магнетита характеризуется проникновением зонных аспектов в первоначальную картину перехода порядок—беспорядок в системе ионов  $\text{Fe}^{2+}$ — $\text{Fe}^{3+}$ . Соответствующие расчеты энергии зонных состояний проводились в работе [4], а основная на этих расчетах теория перехода металл—диэлектрик построена в [5]. Согласно этим работам, поверхность Ферми в металлической фазе образуется тремя зонами  $d$ -электронов, принадлежащих ионам Fe в  $B$ -узлах. Одна зона является электронной, вторая — дырочной, а третья имеет сложную поверхность Ферми и рассматривается как резервуар электронов, не принимающих непосредственного участия в процессах электропереноса. Число электронов в первой зоне  $n_{e1} = 0.03$  на формульную единицу, а число дырок в зоне  $n_{h2}$  значительно меньше. При понижении  $T < T_B = 119$  K за счет эффектов электрондырочного спаривания в спектре электронов появляется щель  $\Delta$

$$E^{\pm} = \pm \sqrt{\xi^2(p) + \Delta^2} - \mu,$$

$\xi^2(p)$  — энергия зонных состояний;  $\mu$  — химпотенциал; величина  $\Delta$  зависит от температуры, концентрации электронов и находится самосогласованно.

С использованием этих представлений упрощенная зонная схема гетероструктур представлена на рис. 3, где явно показаны  $d$ -подзоны при  $T > T_B$  и  $T < T_B$  в контакте с  $p$ -типа полупроводником. Валентная зона и зона проводимости магнетита разделены щелью  $E_g \sim 6$  эВ и на рисунке не показаны.

Видно, что в случае структуры полупроводников  $p$ -типа с  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  возникает  $p$ - $n$ -гетеропереход при  $T > T_B$ , который может обладать свойствами выпрямления. Ниже  $T_B$  из-за расщепления зоны гетеропереход становится  $p$ - $p$ -типа с нелинейной, но не выпрямляющей ВАХ (рис. 1). При контакте магнетита с полупроводниками  $n$ -типа картина становится обратной и при  $T < T_B$  возникает  $n$ - $p$ -гетеропереход, способствующий эффектам переключения, как и при использовании металлических электродов к магнетиту.

Возникающие в области контакта изгибы зон связаны не только со свойствами электронной структуры полупроводников и магнетита, но и с поверхностными состояниями и для их определения требуются дополнительные исследования.

#### Список литературы

- [1] Осипов В. В., Михайлов В. И., Самохвалов А. А., Чеботаев Н. М. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 9. С. 37—40.
- [2] Меркулов А. И., Радауцан С. И., Тэзлеван В. Е. // ФТП. 1980. Т. 14. Вып. 5. С. 1009—1010.
- [3] Burch T., Craig P. P., Hedrick C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 23. N 25. P. 1444—1449.
- [4] Yanase A., Siraatori K. // J. Phys. Soc. Jap. 1984. Vol. 53. N 1. T. 312—317.
- [5] Овчинников С. Г. // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 6. С. 1758—1762.

Институт физики им. Л. В. Киренского  
СО АН СССР  
Красноярск

Поступило в Редакцию  
12 июля 1990 г.