

05.4

## Управление сверхпроводимостью эвтектики полупроводник–сверхпроводник

© Г.И. Исаков

Институт физики НАН Азербайджана, Баку  
E-mail: gudrat@physics.ab.az

Поступило в Редакцию 11 апреля 2003 г.

Исследовались электрические свойства эвтектической композиции GaSb–V<sub>2</sub>Ga<sub>5</sub>, где при направленной кристаллизации сверхпроводящая фаза V<sub>2</sub>Ga<sub>5</sub> в полупроводниковой матрице GaSb формируется в виде ориентированных длинных вискеро́в. Показано, что в зависимости от угла между направлением электрического тока и вискеро́в электрические свойства различных образцов из одного материала или же одного образца управляемы. Особенности температурной зависимости, а также возможности управления сверхпроводимостью эвтектики объясняются дискретными сверхпроводящими областями из джозефсоновских контактов сверхпроводник–полупроводник–сверхпроводник ( $S-Sm-S-Sm-S\dots$ ), вискеро́рами, состоящими из цепочки микромостиков ( $S-S'-S-S'-S\dots$ ), а также бесконечными кластерами из их комбинации ( $S-S'-S-Sm-S-S'-S$ ).

**Введение.** Управление свойствами материалов является фундаментальной проблемой прикладной физики, научного и промышленного приборостроения.

В работе [1] установлена возможность управления тензометрическими параметрами эвтектической композиции полупроводник–металл.

В последние годы уделяется большое внимание зависимости электрофизических свойств от угла разориентации в ВТСП джозефсоновских переходах [2–4].

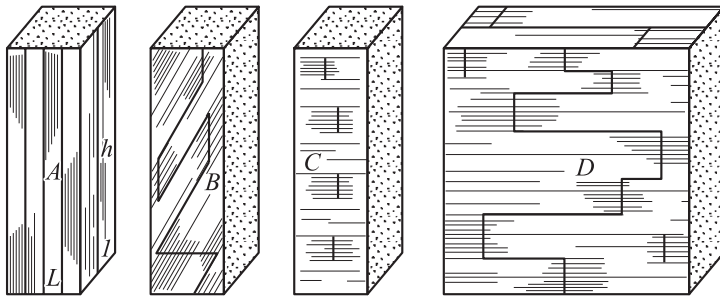
Среди многочисленных джозефсоновских переходов особое место занимают контакты типа сверхпроводник–полупроводник–сверхпроводник ( $S-Sm-S$ ). Это прежде всего связано с возможностью управления параметрами полупроводниковой прослойки путем легирования, воздействием внешних электрических и магнитных полей [5–8].

В нашей ранней работе [9] сообщалось об обнаружении эффекта Джозефсона в эвтектической композиции полупроводник–сверхпроводник.

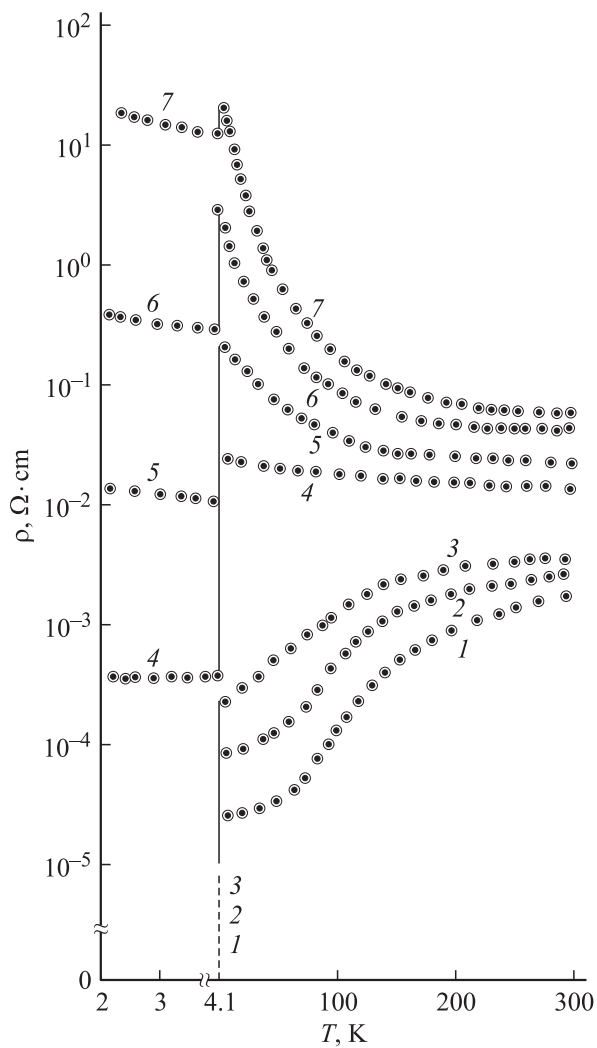
В настоящей работе приводятся оригинальные результаты по исследованию сверхпроводимости и управлению свойствами эвтектической композиции полупроводник–сверхпроводник ( $\text{GaSb}-\text{V}_2\text{Ga}_5$ ) различными способами. Отметим, что сверхпроводящая фаза  $\text{V}_2\text{Ga}_5$  составляет 4 vol.% эвтектической композиции  $\text{GaSb}-\text{V}_2\text{Ga}_5$ . При направленной кристаллизации сверхпроводящая фаза  $\text{V}_2\text{Ga}_5$  в полупроводниковой матрице  $\text{GaSb}$  формируется в виде ориентированных длинных вискеров [10].

Результаты данной работы могут быть использованы при создании как аналогичных низкотемпературных, так и высокотемпературных сверхпроводников и джозефсоновских структур на их основе.

**Экспериментальные результаты.** Для измерения температурной зависимости удельного сопротивления ( $\rho$ ) при различных углах между направлением электрического тока ( $I$ ) и вискеров ( $X$ ) из эвтектической композиции были вырезаны образцы в виде прямоугольного длинного параллелепипеда. Углы  $\alpha$  между направлением вискеров ( $X$ ) и высотой параллелепипеда ( $h$ ) были следующие:  $\alpha = 0; 15; 30; 45; 60; 75; 90^\circ$ . На рис. 1,  $A, B, C$  показаны схематические изображения образцов с  $\alpha = 0;$



**Рис. 1.** Схематические представления образцов из эвтектической композиции  $\text{GaSb}-\text{V}_2\text{Ga}_5$ .  $A$  — угол  $\alpha$  между направлением электрического тока и направлением вискеров равен нулю. Сверхпроводящий кластер бесконечный.  $B$  —  $30^\circ$ , сверхпроводящий кластер бесконечный.  $C = \alpha = 90^\circ$ , дискретные сверхпроводящие области состоят из джозефсоновских контактов типа сверхпроводник–полупроводник–сверхпроводник ( $S-Sm-S$ ).  $D$  — сверхпроводящий кластер бесконечный,  $\alpha$  — произвольная.



**Рис. 2.** Температурные зависимости удельного  $\rho$  сопротивления образцов из эвтектической композиции при различных углах  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  в форме длинного параллелепипеда: 1 —  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 —  $\alpha = 15^\circ$ ; 3 —  $\alpha = 30^\circ$ ; 4 —  $\alpha = 45^\circ$ ; 5 —  $\alpha = 60^\circ$ ; 6 —  $\alpha = 75^\circ$ ; 7 —  $\alpha = 90^\circ$ .

30; 90° соответственно. Штриховыми линиями изображены висеры сверхпроводящей фазы. Жирными линиями изображены возможные сверхпроводящие пути, или сверхпроводящие кластеры.

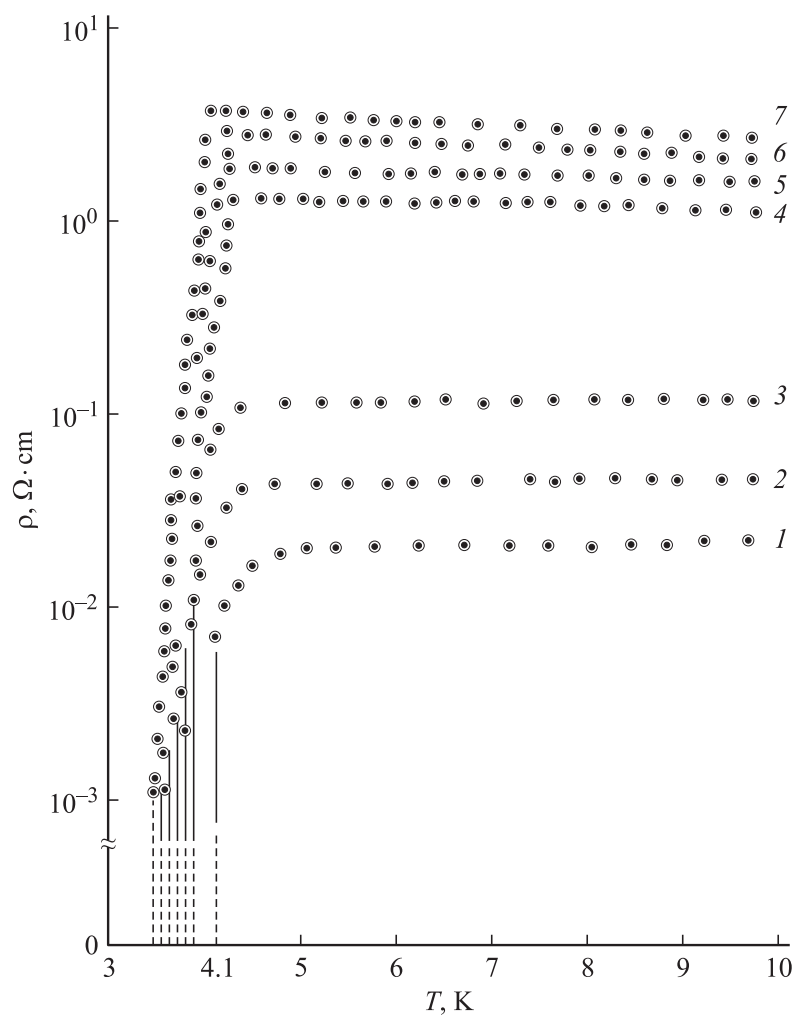
На рис. 2 представлены температурные зависимости удельного сопротивления вышеуказанных образцов. Из рисунка видно, что в образцах с  $\alpha = 90; 75; 60^\circ$  в интервале 300-4.1 К удельное сопротивление имеет полупроводниковый ход. С уменьшением угла  $\alpha$  температурная зависимость  $\rho$  ослабевает. Для образца с  $\alpha = 45^\circ$   $\rho$  очень слабо зависит от температуры. При  $T = 4.1$  К  $\rho$  резко падает. С уменьшением  $\alpha$  величина падения  $\rho$  увеличивается.

В отличие от вышеуказанных образцы с  $\alpha = 30, 15, 0^\circ$  при  $T = 4.1$  К переходят в сверхпроводящее состояние. Температурные зависимости  $\rho$  этих образцов в отличие от предыдущих имеют металлические ходы.

Из эвтектической композиции была вырезана пластинка, две боковые грани которой были параллельны направлению кристаллизации (направлению вискеро́в) и имели форму квадрата. Схематическое изображение этой пластинки показано на рис. 1, D, где жирная линия — возможный сверхпроводящий кластер. В отличие от вышеуказанных образцов пластинка при всех направлениях тока и вискеро́в переходит в сверхпроводящее состояние около температуры  $T = 4$  К (рис. 3).

**Обсуждение результатов.** Из вышеприведенных результатов ясно, что в зависимости от угла между направлением вискеро́в и электрическим током и в зависимости от формы вырезки образца сверхпроводящие свойства эвтектической композиции полупроводник–сверхпроводник управляемы.

При перпендикулярности электрического тока к вискеро́в ( $I \perp X$ ,  $\alpha = 90^\circ$ , рис. 2, кривая 7) полупроводниковый ход температурной зависимости обусловлен тем, что параллельно расположенные висеры  $V_2Ga_5$  составляют всего 4 vol.% и они мало влияют на свойства полупроводниковой матрицы GaSb (рис. 1, C). Образцы с  $\alpha = 30; 15; 0^\circ$  переходят в сверхпроводящее состояние. Температурные зависимости удельного сопротивления обнаруживают металлический ход. Несомненно, что в этих случаях при  $T = 4.1$  К появляются сверхпроводящие кластеры по всей протяженности образца. Выше температуры сверхпроводящего перехода эти сверхпроводящие кластеры ответственны за металлическое сопротивление образцов. Резкое падение удельных сопротивлений образцов с  $\alpha = 90; 75; 60; 45^\circ$  при  $T = 4.1$  К и увеличение этих падений по величине связаны с образованием в композиции



**Рис. 3.** Температурные зависимости удельного сопротивления  $\rho$  пластины при  $L = h$  в различных углах: 1 —  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 —  $\alpha = 15^\circ$ ; 3 —  $\alpha = 30^\circ$ ; 4 —  $\alpha = 45^\circ$ , 5 —  $\alpha = 60^\circ$ ; 6 —  $\alpha = 75^\circ$ ; 7 —  $\alpha = 90^\circ$ .

дискретных сверхпроводящих кластеров (рис. 1), длина и числа которых с уменьшением  $\alpha$  растут.

В прямоугольном длинном параллелепипеде из эвтектической композиции GaSb–V<sub>2</sub>Ga<sub>5</sub> в случае  $I \perp X$  ( $\alpha = 90^\circ$ ) в образце существуют только контакты типа  $S-Sm-S$ . По-видимому, в этом случае отсутствие перехода в сверхпроводящее состояние связано с большой толщиной полупроводниковой прослойки (4–5  $\mu\text{m}$ ) между параллельными вискерами. Резкое падение  $\rho$  при температуре  $T = 4.1\text{ K}$ , а также микрофотографии поверхности образца свидетельствуют о том, что вискеры в полупроводниковой матрице расположены нерегулярно и в образце появляются дискретные сверхпроводящие области, образующие джозефсоновские цепочки типа  $S-Sm-S-Sm-S \dots$  (рис. 1, C).

Когда поверхность параллелепипеда приобретает форму квадрата в образце при  $I \perp X$  и соответственно при всех углах  $\alpha$ , осуществляется переход в сверхпроводящее состояние. Перпендикулярно направлению роста вискером по всей протяженности образца появляются бесконечные сверхпроводящие пути (бесконечный кластер). В направлении  $I \parallel X$  бесконечные кластеры состоят как из вышеуказанной комбинации, так и из вискером бесконечной длины (рис. 1, D).

Следует отметить, что эффект Джозефсона наблюдается как при  $I \parallel X$  ( $\alpha = 0^\circ$ ), так и при  $I \perp X$  ( $\alpha = 90^\circ$ ), если в последнем случае поперечные размеры образца  $L$  сравнимы с высотой  $h$  [9]. С другой стороны, диаметры вискером не везде одинаковы [9]. По протяженности роста вискером из-за различных флуктуационных процессов появляются сужения. В области сужения вискером диаметр  $d$  порядка длины когерентности  $\xi$  ( $d \approx 5 \cdot 10^{-5}\text{ cm}$ ). Поэтому каждый вискер эвтектической композиции представляет собой последовательно соединенные микромостыки переменной толщины и состоит из цепочки  $S-S'-S-S'-S \dots$  (где  $S'$  — микромостык переменной толщины).

Из рис. 3 видно, что сопротивления  $R$  пластинки, измеренные при различных углах ( $\alpha = 0; 15; 30; 45; 60; 75; 90^\circ$ ) проявляют также сильную анизотропию. Видно, что в исследованном интервале температур кривые 1, 2, 3 ( $\alpha = 0; 15; 30^\circ$ ) проявляют металлический характер. Кривые же 4, 5, 6, 7 ( $\alpha = 45, 60, 75, 90^\circ$ ) проявляют слабый полупроводниковый ход. Несомненно, что при углах  $\alpha = 0, 15, 30^\circ$  при переходе в сверхпроводящее состояние доминируют параллельные бесконечные кластеры из цепочки типа  $S-S'-S-S'-S \dots$ . При углах же  $\alpha = 45, 60, 75, 90^\circ$  при переходе в сверхпроводящее состояние основную роль играют бесконечные кластеры из цепочки типа

$S-S'-S-Sm-S-S'-S\dots$  Следует отметить, что при  $\alpha = 0^\circ$  число параллельных бесконечных кластеров на единицу площади поперечного сечения композиции равно числу бесконечных вискеро́в и при скорости выращивания  $v = 7 \text{ см/ч}$  составляет  $n \approx 10^4 \text{ мм}^{-2}$ . При этом сверхток через площадь  $1 \text{ мм}^2$  будет

$$I = i_1 + i_2 + \dots + i_n. \quad (1)$$

Если считать, что среднестатистические диаметры вискеро́в одинаковы, тогда

$$i_1 = i_2 = \dots = i_n, \quad (2)$$

$$I = n \cdot i. \quad (3)$$

При  $\alpha = 0^\circ$   $n \approx 10^4 \text{ мм}^{-2}$ . В отличных от нуля углах число  $n$  уменьшается. Происходит замена бесконечных кластеров  $S-S'-S-S'-S\dots$  на бесконечные кластеры  $S-S'-S-Sm-S-S'-S\dots$ .

**Заключение.** В эвтектической композиции полупроводник–сверхпроводник в зависимости от угла  $\alpha$  между направлением тока и вискеро́в электрические свойства различных образцов, вырезанных из одного слитка, управляемы. В образцах с  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  резкое падение удельного сопротивления  $\rho$  при  $T = 4.1 \text{ К}$  обусловлено наличием сверхпроводящих кластеров с конечными размерами. В образцах с  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  переход в сверхпроводящее состояние обусловлен бесконечным сверхпроводящим кластером.

Установлено, что в образцах в форме параллелепипеда в случае, если длина  $L$  (в направлении вискеро́в) равна или же превосходит высоту  $h$  (в направлении поперек вискеро́в) ( $L \geq h$ ), во всех направлениях электрического тока и вискеро́в (при всех  $\alpha$ ) происходит переход в сверхпроводящее состояние. Такой переход при условии  $L \geq h$  обусловлен образованием в образце бесконечных кластеров во всех направлениях. Бесконечный сверхпроводящий кластер состоит из каскада джозефсоновских контактов сверхпроводник–полупроводник–сверхпроводник ( $S-Sm-S$ ) и соединяющих их вискеро́в, состоящих из цепочки микромостиков ( $S-S'-S$ ). Одна полная цепочка бесконечного сверхпроводящего кластера выглядит следующим образом:  $S-S'-S-Sm-S-S'-S\dots$ . В направлении  $\alpha = 0^\circ$  доминируют бесконечные кластеры из цепочки  $S-S'-S'-S-\dots$ . В интервале  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  с увеличением  $\alpha$  общее число бесконечных кластеров уменьшается. Увеличивается вклад каскада джозефсоновских контактов  $S-Sm-S-Sm-S\dots$ . Выше и ниже критической температуры перехода электрические свойства одного образца в виде пластинки в зависимости от  $\alpha$  управляемы.

## Список литературы

- [1] *Исаков Г.И.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 24. С. 70–74.
- [2] *Кислинский Ю.В., Степанцов Е.А., Иванов З.Г.* и др. // ФТТ. 2001. Т. 43. № 4. С. 581–586.
- [3] *Alarco J.A., Olsson E.* // Phys. Rev. 1995. В. 52. N 18. P. 13625–13630.
- [4] *Winkler D., Zhang V.M., Nilsson P.A., Stepantsov E.A., Claeson T.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 72. N 8. P. 1260–1263.
- [5] *Асламазов Л.Г., Фистуль М.В.* // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. № (7). С. 382–397.
- [6] *Асламазов Л.Г., Фистуль М.В.* // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. № 3. (7). С. 1170–1176.
- [7] *Асламазов Л.Г., Фистуль М.В.* // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. № 4. С. 1516–1526.
- [8] *Schapers Th., Muller R.P., Kaluza A.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. N 3. P. 391–393.
- [9] *Алиев М.И., Исаков Г.И., Алиев Ф.Ю.* и др. // ДАН СССР. 1989. Т. 306. № 3. С. 583–586.
- [10] *Алиев М.И., Исаков Г.И.* // Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. материалы. 1980. Т. 16. № 5. С. 782–786.