

05.4; 06.1

© 1991

СПЕЦИФИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОВЕДЕНИЯ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА  
„ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИК -  
ВЫРОЖДЕННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК“ В ОКРЕСТНОСТИ  $T_c$

В.В. Бунда

Появление высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) открывает широкие перспективы в создании новых приборов криофотоэлектроники-гетеропереходов (ГП), включающих контактные слои сверхпроводников (СП) с полупроводниками (ПП). Важным фактором, обуславливающим перспективность использования ВТСП и ГП на их основе в фотоэлектронике, является большая величина сверхпроводящей щели  $\Delta$  ( $2\Delta_0 \cong (30-60)$  мэВ) [1] и удовлетворительные значения концентраций ( $p(90\text{К}) \cong 10^{18}-10^{21}$  см $^{-3}$ ) и дрейфовых подвижностей ( $\mu_d(90\text{К}) \cong 10^4-10^6$  см $^2$ /В.с) носителей заряда ПП-слоев [2].

Специфика электрофизических свойств ГП „ВТСП-ПП“ значительно усиливается в области температур  $T < T_c$  ( $T_c$  - температура СП-перехода), поскольку энергетический спектр элементарных возбуждений сверхпроводника претерпевает существенные изменения: в окрестности уровня Ферми  $E_F$  образуется щель  $2\Delta_0$ , разделяющая основные и возбужденные состояния квазичастиц. В этой связи возникает возможность эффективного обмена носителями заряда между ВТСП и полупроводником и взаимного управления их свойствами.

Как правило, нанесение на  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (далее 123) безкислородных полупроводниковых слоев приводит к обеднению его поверхности кислородом [3, 4]. В результате у поверхности 123 образуется несверхпроводящая прослойка (в случае ГП - переходной изолирующей слой) толщиной  $d$ . В случае  $d \gg \xi_n$  (где  $\xi_n \cong 20$  Å - максимальное значение корреляционной длины в 123) электрические свойства контакта „ВТСП-ПП“ в основном определяются параметрами переходного слоя. При реализации условия  $d \cong \xi_n$  могут быть получены туннельные структуры: переходы типа  $S-I-N$  с высокими ( $> 10^3-10^5$  Ом.см) значениями дифференциального сопротивления  $\rho_d$  (при напряжении смещения  $V_{tr} \rightarrow 0$ ) [5], либо туннельные контакты с  $\rho_d \rightarrow 0$ , базирующиеся на эффекте „близости“ [6].

В данной работе ставилась цель разработать технологию получения надежных туннельных гетеропереходов „ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -ПП“. Для преодоления указанных в [7] трудностей в качестве полупроводниковых слоев использовали соединения тетрагональных оксигалогенидов висмута  $BiOX$  (X-галоген) - слоистых широкозонных

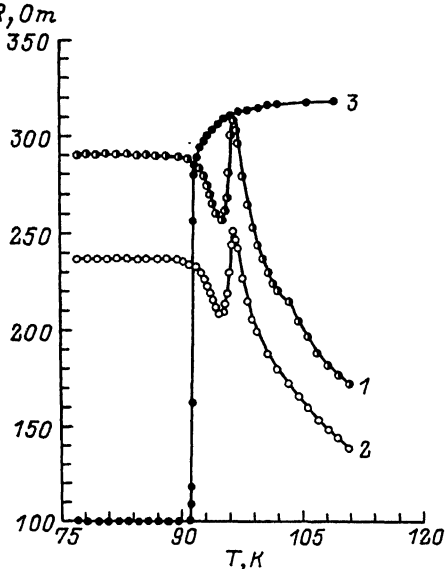


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления: 1 - иттрий-бариевого купрата 123, 2 - гетероперехода „ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} - BiOCl:Ti$ “ в сквозной геометрии, 3 - гетероперехода „ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} - BiOCl:Ti$ “ в планарной геометрии.

фотопроводников ( $E_g \cong 1.85-3.5$  эВ;  $R_T$  (77 К)  $\cong 10^{10}-10^{13}$  Ом см,  $R_T/R_{\phi} \cong 10^4-10^6$  при  $T=77$  К), обладающих рядом преимуществ.

1. Соединения  $BiOX$  кристаллизуются в сингонии  $R4/mmm$ , близкой по симметрии к  $P/mmm$ , в которой кристаллизуется  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ .

2. Согласование параметров кристаллической решетки для базовых плоскостей (001) не хуже 1% ( $\Delta a \cong 0.1\%$ ,  $\Delta c \cong 5\%$ ).

3. Соединения  $BiOX$  обладают слоистой структурой, что позволяет получать их в виде монокристаллических ультратонких ( $\cong 0.25-0.8$  мкм) слоев на подложках  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ .

4. Оксигалогениды висмута подвержены удовлетворительной интеркаляции (до 3-7 весовых %)  $3d$ - и  $4f$ -элементами, приводящей к устойчивому р-типу проводимости. Степень вырождения  $\zeta_p = (E_V - E_F)$  поддается контролю.

В настоящей работе нами исследовались ГП типа „керамический  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ,  $T_c = 91$  К“ - „тонкопленочный  $BiOCl:Ti$  - слой“. Выбор структуры „ВТСП-керамика - ПП-пленка“ определялся, во-первых, нестабильностью параметров СП-пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  и, во-вторых, ограничениями со стороны эффекта близости.

Слой оксигалогенидов висмута получали методом лазерного импульсного испарения (лазер ЛТИПЧ-500,  $\lambda = 0.53$  мкм,  $\nu = 50$  Гц). Поверхность  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  предварительно подвергалась ионно-плаз-

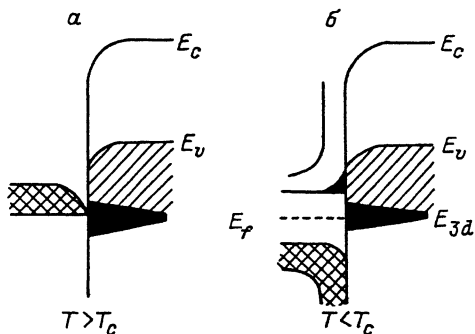


Рис. 2. Модель энергетической диаграммы контакта гетероперехода „ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} - BiOCl : Ti$ “: а -  $T > T_c$ , б -  $T < T_c$ .

менному травлению в атмосфере кислорода с целью восстановления сверхпроводящих свойств нарушенного приповерхностного слоя. После завершения цикла формирования ПП осуществляли рекристаллизационный отжиг при  $T=230-250$  °С. При этом рентгеноаморфный слой  $BiOCl : Ti$  переходил в поликристаллическое состояние.

Особенность температурного поведения сопротивления гетероперехода „ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} - BiOCl : Ti$ “ состоит в наличии  $N$ -образной аномалии в интервале 85–105 К (рис. 1), причем имеет место идентичный характер зависимости  $R(T)$  как собственно ПП в сквозной геометрии (кривая 2), так и сопротивления ПП-слоя в планарной геометрии (кривая 3). Кривая 1 на рис. 1 представляет собой температурную зависимость сопротивления  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}(T_c(R=0)) = 91$  К [8].

Детальное рассмотрение температурной зависимости сопротивления ПП в сквозной (кривая 2) и планарной (кривая 3) геометриях показывает, что в обоих случаях в узком температурном интервале вблизи  $T_c$  ( $\cong 5$  К) сопротивление испытывает скачок, достигая минимума при  $T=(T_c + 2)$  К. Дальнейшее повышение температуры сопровождается ростом  $R(T)$ , причем максимум достигается при  $T=(T_c + 5)$  К. После прохождения максимума сопротивление резко уменьшается, сохраняя экспоненциальный характер хода вплоть до температур 400 К.

Рассмотрим модель зонной диаграммы гетероперехода „ВТСП-полупроводник“ (рис. 2). Механизм токопереноса в  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  носит дырочный характер (носители  $p$ -типа локализованы на кислородных вакансиях). ПП с возможностью туннелирования квазичастиц реализуется в случае вырожденного ПП-слоя  $p$ -типа [1, 2]. В интервале 77–85 К  $R_d$  ПП практически не зависит от  $T$ , что связано со значительной глубиной залегания примесных зон  $Ti^{4+}$  внутри запрещенной зоны  $BiOCl : Ti$  и шунтирующим действием объема ВТСП ( $R=0$ )

Приложение напряжения  $V_{tr}$  смещает уровень Ферми ПП в область края щели сверхпроводника (рис. 2, б). Повышение температуры ПП до 85–98 К инициирует дальнейшее смещение  $E_F$  относительно края щели и приводит к туннелированию квазичастиц из объема  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  на свободные состояния примесной (либо валентной) зоны полупроводника. Квазичастицы проникают в ПП-слой на глубину порядка  $\xi_n$ , разваливаясь в дальнейшем на пары свободных дырок. В этой связи повышается концентрация основных носителей заряда ПП-слоя и возникают участки падения  $R(T)$  (рис. 1).

При  $T \cong 95-98$  К в ПП имеют место следующие процессы: 1) ВТСП выходит в резистивное состояние; 2) величина щели  $\Delta_0(T \rightarrow T_c) \rightarrow 0$ ; 3) обратная инжекция дырок с ПП-слоя в объем  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с последующей термализацией; 4) эффективный захват дырок на центры прилипания ПП. Все четыре упомянутых процесса приводят к возрастанию сопротивления ПП. В дальнейшем характер  $R(T)$  ПП (при  $T > 105$  К) носит полупроводниковый характер, т.е. полностью определяется собственно полупроводниковым слоем ПП [8].

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А л ф е е в В.Н., Н е у с т р о е в Л.Н. // Сверхпроводимость: ФХТ. 1990. Т. 3. № 3. С. 385–391.
- [2] А л ф е е в В.Н., Н е у с т р о е в Л.Н. // ДАН СССР. 1990. Т. 311. № 5. С. 1106–1109.
- [3] S u z u k i M., F u j i i T., M o r i k K. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 10. P. 2003–2004.
- [4] К о м а ш к о В.А., У х а н о в С.А., Ю р ч е н к о Н.П. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 4. С. 9–11.
- [5] C u r v i t c h M., V a l l e s J.M., C u s o l o Jr.A.-M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. N 9. P. 1008–1011.
- [6] T o s h i k a z u N., H i d e a k i N., Y o s h i n o b u T. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. Pt. 2. V. 26. N 8. P. 1320–1322.
- [7] В е н г а л и с Б., Ю к н а А., Ш и к т о р о в Н. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 8. С. 60–64.
- [8] B u n d a V.W. // Mat. 7 Internat. Conf. of Ferroelectrics. Dijon. France, 1991. P. 9021.

Ужгородский  
государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
2 октября 1991 г.