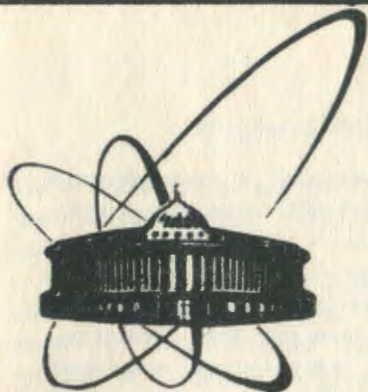


90-127



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

0-266

P8-90-127

С.А.Обухов¹, Б.С.Неганов, Ю.Ф.Киселев,
А.Н.Черников, В.С.Векшина², Н.И.Пепик²,
А.Н.Попков²

КРИОГЕННЫЙ ТЕРМОРЕЗИСТОР ИЗ $p\text{-InSb(Mn)}$

Направлено в журнал "Cryogenics"

¹Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
АН СССР, Ленинград

²Государственный институт редкометаллической
промышленности, Москва

1990

Введение

Создание термометров для измерения температур в миллиградусной области представляет в настоящее время чрезвычайно актуальную задачу. Попытки решить эту проблему путем использования стандартных материалов, таких, как спеченный углеродный композит - резисторы фирм Spreng-Carbon и Matsushita, а также легированных полупроводников - германия, арсенида галлия и кремния¹ натолкнулись на принципиальные трудности.

Это связано прежде всего с наличием в перечисленных материалах таких механизмов проводимости в миллиградусной области, которые не позволяют получить высокую термочувствительность при относительно низких значениях удельного сопротивления.

Известно, что в неупорядоченных системах, какими являются легированные полупроводники и спеченные углеродистые материалы, при низких температурах зависимость проводимости σ от температуры T определяется выражением вида

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot \exp[-(A/T)^x], \quad (1)$$

где $1/4 \leq x \leq 1/2$.

При $x=1/4$ зависимость проводимости от температуры соответствует моттовской проводимости², где $A = a^{-3}/g(E_F)$, $g(E_F)$ - плотность состояний на уровне Ферми, a - радиус локализации волновой функции.

При $x=1/2$ проводимость определяется наличием кулоновской щели в примесной зоне^{3,4}. В этом случае $A = 2.7e^2/c_0 a$, где c_0 - диэлектрическая константа, e - заряд электрона. Для резисторов фирм Spreng-Carbon, Matsushita и Lake Shore Cryotronics отмечена также зависимость проводимости от температуры с $x=1/3$ ⁵. Как следует из формулы (1), при понижении температуры термочувствительность упомянутых выше материалов падает.

Как было показано в работе⁶, использование p -InSb(Mn) в качестве материала для изготовления терморезисторов позволяет получить высокую термочувствительность при относительно низких значениях удельного сопротивления. Это связано с наличием в p -InSb(Mn) нового механизма низкотемпературной проводимости, при котором зависимость удельного сопротивления ρ от температуры описывается выражением вида (2) вплоть до $T=10$ мК:

$$\rho(T) = \rho_0 \exp(\Delta/kT), \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, Δ – энергия магнитной щели^{6/} в примесной зоне полупроводника, величина которой зависит от концентрации марганца.

В настоящей работе исследовано влияние концентрации Mn^{+2} , компенсации и магнитного поля на термочувствительность терморезисторов, выполненных из антимонида индия в миллиградусной области температур. Проводится сравнение характеристик терморезисторов из $p\text{-InSb}(Mn)$ с известными терморезисторами фирм Lake Shore Cryotr. и Speer-Carbon.

Изготовление терморезисторов и методика измерений

Антимонид индия, легированный марганцем, был выращен методом Чохральского. Диаметр монокристаллов составляет 3+4 см, длина – 5+10 см. Концентрация марганца, определяемая по измерениям коэффициента Холла при $T=77$ К в поле $H=15$ кЭ, составляла $10^{17} \text{ см}^{-3} \leq N_{Mn} \leq 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в средней части кристалла на длине 2+3 см. Исследуемые образцы имели размеры $10 \times 2 \times 1.5$ мм. Контакты припаивались индием после травления материала в травителе СР-4А. В качестве флюса использовался водный раствор $ZnCl_2$.

Измерения в интервале температур 300+1 К проводились в гелиевом антикриостате с откачкой паров гелия. При температурах $30 \text{ мК} < T < 1 \text{ К}$ электропроводность и магнитосопротивление исследовались на установке^{7/}, а при температуре до 8 мК – в рефрижераторе растворения, описанном в^{8/}. Измерения температуры в миллиградусной области проводились при помощи резисторов фирмы Speer-Carbon (100 и 200 Ом, 1/2 Вт). В качестве регистрирующей аппаратуры использовался автокомпенсационный измеритель сверхнизких температур^{9/}.

Результаты экспериментального исследования зависимости проводимости от температуры и концентрации примеси терморезисторов из $p\text{-InSb}(Mn)$

На рис. 1 представлена зависимость удельного сопротивления от температуры для нескольких образцов из $p\text{-InSb}(Mn)$. В миллиградусной области температур зависимость удельного сопротивления от температуры для всех терморезисторов описывается выражением (2). При температурах $T=4.2 \pm 0.3$ К наблюдается участок, на котором энергия активации проводимости возрастает при понижении температуры^{10/}.

В кристаллах антимонида индия, легированных марганцем и компенсированных донорной примесью (рис. 2 и 3), участок проводимости, определяемый выражением (2), простирается в область высоких температур вплоть до $T=15+20$ К. Исследования терморезисторов с различной концентрацией марганца позволили определить зависимость величины магнитной щели от концентрации марганца и концентрации дырок $p = N_{Mn} - N_d$ в компенсированном материале (рис. 4). При концентрации марганца $N_{Mn} < 10^{17}$ см $^{-3}$ зависимость проводимости от температуры описывается выражением вида (1), т.е. терморезистор из такого материала не имеет преимущества по сравнению с терморезисторами из Ge или GaAs. При концентрации дырок $> 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ происходит металлизация проводимости и материал становится практически нечувствительным к изменению температуры.

Таким образом, обобщая результаты экспериментального исследования зависимости проводимости p-InSb(Mn) от концентрации примеси, компенсации и температуры, можно сделать вывод, что наиболее интересным с точки зрения технического применения и изучения процессов на границе перехода металл-диэлектрик является диапазон концентраций 10^{17} см $^{-3} < p < 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ (где $p = N_{Mn} - N_d$ или $p = N_{Mn}$).

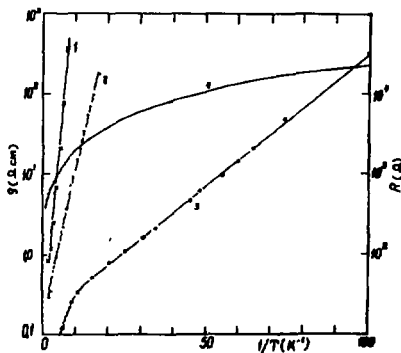


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления ρ терморезистора из p-InSb(Mn) (1+3) и сопротивления R терморезистора фирмы Speer-Carbon (100Ω 1/2W) (4) от температуры: 1 - $N_{Mn} = 2.03 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, 2 - $N_{Mn} = 2.1 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, 3 - $N_{Mn} = 2.14 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, 4 - Speer-Carbon (100Ω 1/2W).

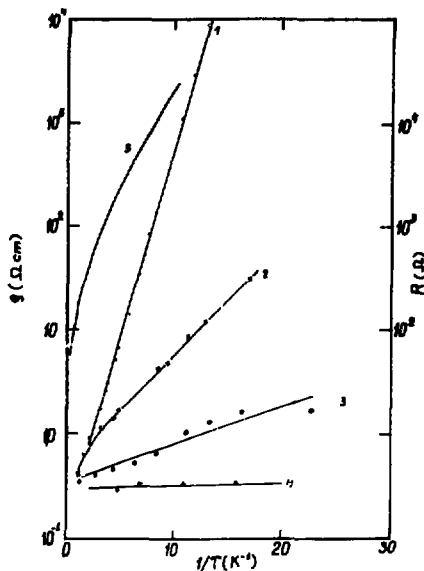


Рис.2. Зависимость удельного сопротивления ρ терморезистора из p-InSb(Mn) при различных значениях напряженности магнитного поля и сопротивления R германиевого терморезистора фирмы Lake Shore Cryotronics (GR-200A-50) (5) от температуры: 1+4 - $p=N_{Mn} - N_d = 1.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 1 - $H=0$; 2 - $H=0.23 \text{ Т}$, 3 - $H=0.745 \text{ Т}$, 4 - $H=2.865 \text{ Т}$.

Влияние магнитного поля на проводимость p-InSb(Mn)

К существенному недостатку терморезисторов из p-InSb(Mn) следует отнести их высокую чувствительность к магнитному полю. На рис. 2 и 3 представлена зависимость удельного сопротивления образцов p-InSb(Mn), компенсированных донорной примесью, от температуры при различных зна-

чений напряженности магнитного поля. Наблюдается сильное уменьшение величины магнитной щели в магнитном поле, то есть отрицательное магнитосопротивление (рис. 5). Величина отрицательного магнитосопротивления слабо зависит от направления магнитного поля по отношению к току, протекающему через образец. В магнитном поле $H > 5$ Т следует ожидать перехода из диэлектрического состояния в металлическое. Следует отметить, что при снятии магнитного поля остаточная намагниченность и гистерезисные явления не наблюдались.

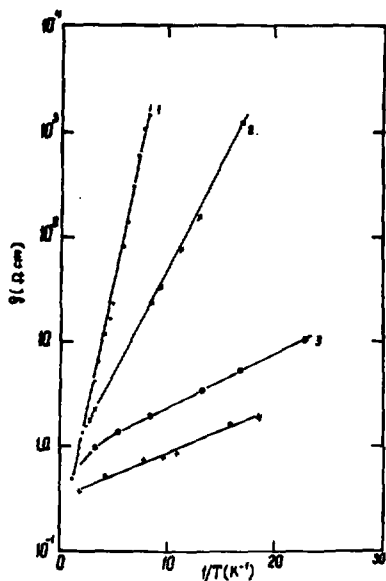


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления ρ терморезистора из p-InSb(Mn) от температуры при различных значениях напряженности магнитного поля: 1 - $H=0$, 2 - $H=0.23$ Т, 3 - $H=0.745$ Т, 4 - $H=2.865$ Т, $N_{\text{Mn}} = 1.13 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

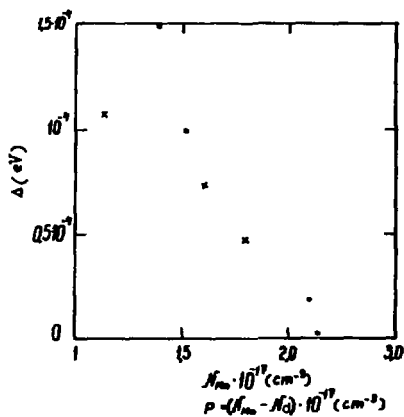


Рис. 4. Зависимость величины магнитной щели Δ от концентрации дырок в $p\text{-InSb(Mn)}$, \bullet - $K=0$, \times - $K=50\%$.

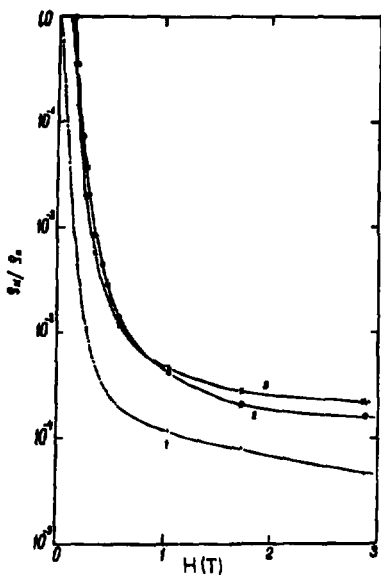


Рис. 5. Отрицательное магнитосопротивление ρ_H/ρ_0 в $p\text{-InSb(Mn)}$ в зависимости от напряженности магнитного поля при $T=80$ мК:
 1 - $N_{mn}=1.8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 2 - $N_{mn}=1.13 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 3 - $N_{mn}=1.6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Обсуждение

Вблизи перехода металл-диэлектрик, на диэлектрической стороне ($N \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), существенную роль в формировании примесной зоны и в эффектах переноса играют обменные эффекты между дырками (в полупроводнике p - типа) или электронами (в полупроводнике n - типа). Обменное взаимодействие в такой ситуации¹¹ приводит к антиферромагнитной упорядоченности дырок, т.е. спины соседних дырок ориентированы антипараллельно. В случае регулярного распределения примесей такое взаимодействие будет приводить к образованию энергетической щели Мотта-Хаббарда. Так как примеси в кристалле распределены нерегулярно, обменная энергия между дырками не будет одинаковой в каждой точке кристалла. Вследствие этого края щели будут размыты.

В работе¹² было показано, что роль обменных процессов в примесной зоне можно усилить, подвергая кристаллы анизотропной деформации. Известно, что анизотропная упругая деформация снимает вырождение валентной зоны в полупроводниках с алмазоподобной структурой (германий) или структурой типа цинковой обманки (соединения типа A^3B^5 , к которым принадлежит антимонид индия). Снятие вырождения приводит к усилению обменного взаимодействия дырок и увеличивает энергию псевдощели. В результате под давлением наблюдается переход из металлического состояния в диэлектрическое, а также появляются сильные магнитные эффекты - гигантское отрицательное магнитосопротивление и аномальный эффект Холла. Сказанное выше относится к кристаллам, легированным немагнитной примесью, например антимонид индия с германием.

В случае антимонида индия имеется уникальная возможность заменить германий на марганец, который является элементом переходной группы, и исследовать влияние магнитной примеси Mn^{+2} на обменные процессы на границе перехода металл-диэлектрик. При этом критическая концентрация перехода металл-диэлектрик составляет $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для кристаллов, легированных как германием, так и марганцем.

Расстояние между примесными центрами марганца при концентрации, близкой к критической концентрации перехода металл-диэлектрик, можно вычислить по формуле $Na^3 = 0.25$, где a - борковский радиус дырки на акцепторе. Очевидно, что расстояние между ближайшими ионами марганца недостаточно для того, чтобы наблюдать прямое обменное взаимодействие между d - оболочками ($r_d \approx 1 \text{ \AA}$). Однако, учитывая тот факт, что спины внешних дырок ориентированы антипараллельно по отношению к магнитному моменту d - оболочки¹³ ($S_d = 5/2$), возможно косвенное обменное взаимодействие d - электронов через дырки примесной зоны. Такая обменная

связь приведет к появлению магнитной щели в примесной зоне. Существование такой магнитной щели можно объяснить экспоненциальный участок (2) в зависимости удельного сопротивления от температуры. Указанное выше относится к некомпенсированным кристаллам. Предположим теперь, что в кристалл с концентрацией марганца выше критической концентрации перехода металл-диэлектрик ($N_{Mn} = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) мы добавляем компенсирующую примесь n - типа. Пусть компенсация составляет $K = N_{Mn} / N_d = 50\%$. В этом случае концентрация дырок $p = N_{Mn} - N_d$ будет близка к критической концентрации перехода металл-диэлектрик, а концентрация марганца вдвое выше, чем в случае перехода металл-диэлектрик в некомпенсированном материале. В такой системе следует ожидать проявления более сильных обменных эффектов.

Предлагаемая модель объясняет тот факт, что в кристаллах, компенсированных донорной примесью, магнитная щель проявляется вплоть до высоких температур ($T=20 \text{ К}$), в то время как в некомпенсированных кристаллах эффекты, связанные с наличием примеси марганца, начинают сказываться лишь при $T < 4.2 \text{ К}$.

Заключение

Таким образом, результаты исследования электрических и магнитных свойств терморезисторов из $p\text{-InSb(Mn)}$ позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование $p\text{-InSb(Mn)}$ позволяет изготовить терморезисторы с размерами $1 \times 1 \text{ мм}$, обладающие рекордными по чувствительности параметрами в миллиградусной области (см. таблицу).
2. Терморезисторы из $p\text{-InSb(Mn)}$ имеют относительно низкое удельное сопротивление при сохранении высокой термочувствительности и применимы для измерения температур ниже 10 мК .
3. Существенным недостатком терморезисторов из $p\text{-InSb(Mn)}$ является их высокая чувствительность к магнитному полю.
4. Терморезисторы обладают логарифмической зависимостью удельного сопротивления от температуры.

Таблица

ρ	T	R	$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{\Delta}{kT^2}$
см^{-3}	К	Ом	K^{-1}
$9 \cdot 10^{16}$	0.3	2510	37
$1.13 \cdot 10^{17}$	0.1	4466	85
$1.6 \cdot 10^{17}$	0.1	398100	124
$2.03 \cdot 10^{17}$	0.05	31622	220
$2.14 \cdot 10^{17}$	0.01	31600	750

Литература

1. Я. Вешек. Измерение низких температур электрическими методами. М., Энергия (1980).
2. N.F.Mott, J.Non-Cryst. Solids., 1, 1 (1968).
3. A.L.Efros and B.I.Shklovskii. J.Phys., 8, 249 (1975).
4. A.L.Efros, Nguen Van Lien and B.I.Shklovskii. Solid State Communication., 32, 851 (1979).
5. N.S.Sullivan, C.M.Edwards. Cryogenics, 26, 211 (1986).
6. С.А.Обухов, И.К.Волкова, В.С.Векшина, Н.И.Пепик, А.Н.Попков, Б.С.Неганов. Терморезистор для сверхнизких температур. Препринт ФТИ им. А.Ф.Иоффе АН СССР, N 1393 (1989).
7. A.N.Chernikov and Yu.F.Kiselev. Installation for producing low temperatures in the 0.028-4.2K range, Cryogenics v30 (1990) p52-55
8. В.Бенда, Б.С.Неганов. Рефрижератор растворения $^3\text{He} - ^4\text{He}$ средней мощности. Препринт ОИЯИ 8-84-772 (1984).
9. Yu.F.Kiselev, A.N.Chernikov, N.L.Gorodishenin, V.A.Evdokimov, S.S.Katushonok. Autocompensating device for ultra-low temperature measurements. Cryogenics, V.29, 55-58 (1989).
10. S.A.Obukhov, N.I.Pepic. Solid State Communication, v.70, 1, 103 (1989).
11. Н.Мотт, Н.Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах. Москва, "Мир" (1982).
12. С.А.Обухов. ФТТ, Т.21, в.1, 59 (1979).
13. Д.Г.Андрианов, Г.В.Лазарева, А.С.Савельев, В.И.Фистуль. ФТП, Т.9, в.8, 1555 (1975).

Рукопись поступила в редакцию в редакцию отдела
22 февраля 1990 года.