

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА КОММУТАЦИОННЫХ
КОНТАКТОВ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМ Bi-Sb-Te, Bi-Se-Te И Bi-Sb**

Д.Ш.АБДИНОВ, Т.Д.АЛИЕВА, Н.М.АХУНДОВА, М.М.ТАГИЕВ

*Институт Физики НАН Азербайджана
AZ-1143, Баку, пр.Г.Джавида, 33*

Исследованы основные процессы, происходящие на границе раздела кристаллов твердых растворов $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ и $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ с металлическими сплавами на основе Bi, Sb, Sn, Pb, Cd. Показана возможность создания низкоомных и стабильных по электрическим параметрам переходных контактов с удовлетворительной адгезионной прочностью.

По инициативе и под руководством академика Г.Б. Абдуллаева в Институте Физики Национальной Академии Наук Азербайджана в 50-х годах прошлого века были начаты интенсивные научные и прикладные работы по созданию различных термоэлектрических преобразователей, в результате которых институт вскоре стал одним из ведущих центров в этом направлении.

Основные параметры термоэлектрических преобразователей, в том числе охладителей, наряду с фундаментальными параметрами ветвей термоэлементов определяются и физическими свойствами коммутационных контактов [1,2].

Твердые растворы $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ и $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, являются основными материалами для создания термоэлектрических охладителей. В связи с этим исследования физических свойств контактов указанных твердых растворов с различными эвтектическими сплавами, представляют важный научно-технический интерес.

В данной работе обобщены и анализированы наши результаты по электрическим и адгезионным свойствам контактов вышеперечисленных твердых растворов с некоторыми эвтектическими сплавами и сформулированы рекомендации для их практического применения.

Были исследованы влияния следующих основных факторов на сопротивление переходных контактов: степень нарушенности и состояние поверхностного слоя торцов ветвей (кристаллов), диффузия компонентов контактного сплава в приконтактный слой кристаллов (ветвей), образование промежуточных фаз на границе раздела вследствие химического взаимодействия компонентов кристаллов и сплавов, смачиваемость и адгезия на границе раздела.

При резке кристаллов электроискровым или механическим способами образуются поверхностный слой с большим количеством структурных нарушений и слой, отличающийся по составу и структуре от кристаллов. Концентрация и подвижность основных носителей заряда в этих нарушенных слоях будут существенно отличаться от концентрации и подвижности в объеме кристаллов. За счет сильного изменения концентрации носителей заряда в приповерхностном слое изменяется и работа выхода электронов с поверхности кристаллов. Эти факторы изменяют энергетические характеристики потенциального барьера в контакте полупроводник-металл, т.е. сопротивление переходного контакта термоэлемента. Кроме того, адгезионные свойства образовавшегося поверхностного нарушенного слоя также будут отличаться от адгезионных свойств поверхности самого кристалла, поэтому в электрических и адгезионных свойствах переходных

контактов термоэлементов одну из основных ролей может играть состояние поверхности и степень нарушенности приповерхностного слоя ветвей (кристаллов).

Нами были проведены комплексные исследования структуры и глубины нарушенного слоя на поверхности кристаллов указанных твердых растворов и влияние этого нарушенного слоя на сопротивление переходного контакта кристаллов с различными сплавами. Структуру и глубину нарушенного слоя определили рентгеновским исследованием поверхности реза. Эти исследования показали, что при резке кристаллов твердых растворов $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ на образцах и ветвях термоэлементов на поверхности реза возникает нарушенный слой толщиной $10\div 15\text{мкм}$. Этот нарушенный слой состоит, в основном, из двух отличающихся по составу подслоев: подслоя, образующегося за счет плавления и частичного сгорания полупроводникового материала при электроискровой резке и закалке жидкой фазы сильно загрязненного продуктами электрода и диэлектрической среды, и подслоя, образующегося за счет деформации поверхности образца при резке, приводящей к фрагментации кристаллов, изгибу атомных плоскостей и появлению поликристаллических участков на поверхности.

Торцевые поверхности кристаллов перед нанесением контактов обрабатывались одним из следующих способов или их комбинацией: механической шлифовкой, электрохимическим и химическим травлением поверхности кристаллов.

Торцы были залужены сплавами (мас.%) $50\text{Bi}+25\text{Pb}+12,5\text{Sn}+12,5\text{Cd}$ с $T_{\text{пл}}\sim 343\text{K}$ (сплав 1), $50\text{Bi}+25\text{Pb}+25\text{Sn}$ с $T_{\text{пл}}\sim 370\text{K}$ (сплав 2), $57\text{Bi}+43\text{Sn}$ с $T_{\text{пл}}\sim 412\text{K}$ (сплав 3), а также сплавом $42\text{Bi}+4\text{Sb}+54\text{Sn}$ с $T_{\text{пл}}\sim 418\text{K}$ (сплав 4) – одноступенчатый способ. Также рассмотрены случаи, когда поверхности кристаллов залуживались сначала сплавом $99,3\text{Bi}+0,7\text{Sn}$ с $T_{\text{пл}}\sim 538\text{K}$ (сплав 5) с толщиной слоя $0,1\text{мм}$, а затем одним из легкоплавких сплавов 1 или 3- двухступенчатый способ.

Результаты измерений переходного контактного сопротивления r_k на примере некоторых контактных сплавов и способов обработки торцов кристаллов представлены на Рис.1-3.

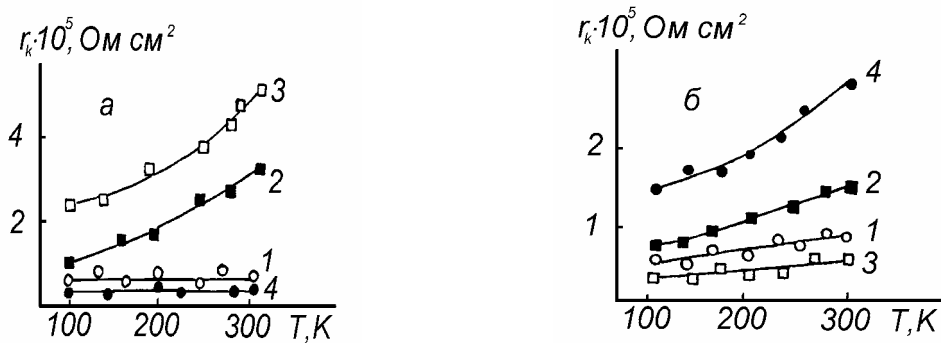


Рис. 1.

Температурная зависимость контактного сопротивления кристаллов

$\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ (а), $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ (б) со сплавом мас.%. $57\text{Bi}+43\text{Sn}$.

Кривые 1- 4- соответствуют кристаллам, поверхности которых перед залуживанием обрабатывались: 1-электрохимическим травлением, 2-электрохимическим травлением с предварительной шлифовкой, 3-химическим травлением, 4-химическим травлением с предварительной шлифовкой.

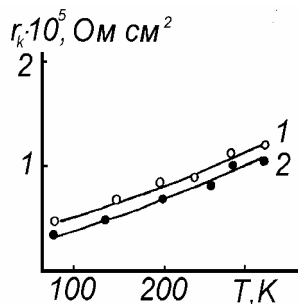


Рис. 2.

Температурная зависимость контактного сопротивления кристаллов $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ (1), $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ (2) со сплавом мас. % 99,3Bi+0,7Sn.

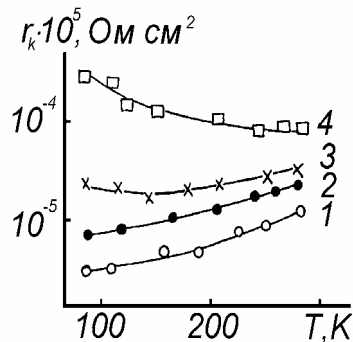


Рис. 3.

Температурная зависимость контактного сопротивления при залуживании поверхности кристаллов $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ со сплавами мас. %: 99,3Bi+0,7Sn(1); 42Bi+4Sb+54Sn(2); 52Bi+32Pb+16Sn(3); 25Bi+50Pb+12,5Cd+12,5Sn(4).

*Обработка поверхности перед залуживанием проводилась электрохимическим травлением.

Полученные данные показывают, что действительно, снятие нарушенного слоя с поверхности кристаллов существенно влияет на сопротивление переходных контактов. При этом электрические характеристики переходных контактов кристаллов с контактными сплавами сильно зависят как от способа предварительной обработки контактной поверхности кристаллов, так и способа нанесения контактного материала.

Термоэлектронным методом контактной разности потенциалов [3] было измерено влияние состояния поверхности кристаллов на работу выхода электрона. Выявлено, что электрохимическое травление поверхности кристаллов приводит к изменению работы выхода электронов: для кристаллов $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ работа выхода электронов увеличивается, а для кристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ уменьшается, что хорошо коррелируется с данными по влиянию состояния поверхности кристаллов на r_k переходного контакта.

Таким образом, первым достаточно эффективным способом получения низкоомных переходных контактов является предварительная обработка поверхности кристаллов перед залуживанием по установленной технологии.

На основе полученных результатов нами был разработан и защищен авторским свидетельством способ изготовления высокоэффективных термоэлементов [4]. Эти результаты были использованы при разработке различных одно- и многоэлементных термоэлектрических охладителей.

При залуживании торцов кристаллов часть атомов компонентов контактного материала, диффундируя в приконтактную область кристаллов, может влиять на работу выхода электронов с поверхности кристаллов и концентрацию основных носителей тока. Кроме того, при контакте расплава многокомпонентного контактного материала с кристаллом на границе раздела образуются преимущественно теллуриды или селениды наиболее химически активного компонента данного контактного материала. Поэтому сопротивление переходных контактов твердых растворов $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ с различными многокомпонентными металлическими сплавами наряду с диффузионными процессами, приводящими к легированию приконтактного слоя кристалла, будет существенно определяться и электрическими свойствами образовавшихся

теллуридов и селенидов на границе раздела. При малых концентрациях элементов в контактном материале, вероятно, решающую роль играет диффузионное легирование приконтактного слоя. При больших же концентрациях главную роль будет играть образование слоев промежуточных фаз на границе раздела. Образование промежуточных фаз и их состав нами были подтверждены рентгеновскими исследованиями границ раздела твердых растворов с контактными сплавами [5].

Исследования также показали, что, действительно, обнаруживается четкая корреляция между удельным сопротивлением слоев образовавшихся промежуточных фаз на границе раздела и сопротивлением переходного контакта [6]. Так соединения $PbTe$, $CdTe$, $CdSe$ обладают полупроводниковым характером температурной зависимости электропроводности, соответственно, r_k переходных контактов структур, в которых образуются эти соединения, с ростом температуры до $200\div 250K$ падает. Остальные соединения до $300K$ имеют металлический характер проводимости, и в этих случаях r_k с ростом температуры растет. При температурах выше $200\div 250K$ для всех структур температурные зависимости r_k почти одинаковы и соответствуют температурной зависимости ρ кристаллов. При $\sim 80K$ наблюдается линейная зависимость r_k переходного контакта структуры от ширины запрещенной зоны (E_g) образовавшейся промежуточной фазы. С ростом E_g концентрация свободных носителей заряда уменьшается и, следовательно, растет ρ соединения.

Образовавшиеся на границе раздела слои промежуточных фаз препятствуют дальнейшей взаимодиффузии компонентов кристалла и контактных материалов. Поэтому, создавая на границе раздела достаточно низкоомный слой промежуточной фазы, можно добиться получения низкоомного и стабильного переходного контактного сопротивления, что очень важно при создании термоэлектрических преобразователей. Это наглядно демонстрируется в случае контактного материала с 4 мас.% сурьмы. Диффузия сурьмы в соединениях Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 и их твердых растворов связана со значительно большей энергией активации [7] и это, вероятно, вызвано тем, что сурьма образует с селеном и теллуrom такие же соединения, как и висмут, причем с близкими параметрами. Поэтому на границе раздела кристалл-контактный материал с 4%Sb за счет взаимной диффузии образуются преимущественно устойчивые соединения Sb_2Te_3 , препятствующие перемещению в кристалле атомов сурьмы. Образование слоя Sb_2Te_3 на границе раздела подтверждалось и рентгеновскими данными. Кристаллы соединения Sb_2Te_3 имеют положительный тип проводимости и не удается получить образцы с концентрацией носителей тока менее, чем $10^{19}\div 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Электропроводность кристаллов соединений Sb_2Te_3 при комнатной температуре равна $2000\div 4000 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ и легирующие добавки не влияют на тип проводимости и концентрацию свободных носителей [8]. Поэтому контакты кристаллов твердых растворов теллуридов висмута и сурьмы со сплавом, содержащим 4%Sb имеют достаточно низкое переходное сопротивление и r_k после термообработки при 120°C в течении 1000 часов почти не меняется. Переходные контакты же, не содержащие на границе раздела такие антидиффузионные слои, сильно деградируют со временем термообработки [9].

Одним из основных требований к контактному материалу является то, что они в расплавленном состоянии должны хорошо смачивать данный полупроводниковый материал и создавать с кристаллом достаточно высокую адгезионную прочность.

Смачивание есть первая стадия молекулярного взаимодействия жидкого контактного материала с поверхностью кристалла, и оно оценивается краевым

углом смачивания. Смачивание - результат взаимодействия жидкой и твердой фазы на границе раздела этих фаз. Взаимодействие же твердой и жидкой фазы на границе раздела оценивается работой адгезии

$$A_a = \sigma_n (1 + \cos \theta)$$
$$\cos \theta = (2 A_a - A_k) / A_k,$$

где σ_n – поверхностное натяжение жидкого контактного материала, θ - краевой угол смачивания, A_k - работа когезии, характеризующая взаимодействие частиц жидкого контактного материала.

Поэтому величина краевого угла определяется соотношением сил притяжения жидкости к поверхности твердого тела и сил взаимного притяжения частиц самой жидкости и, следовательно, адгезионные свойства границ раздела будут определяться способом обработки поверхности кристаллов и составом контактного материала. Следует отметить, что состав контактного материала двояко будет влиять на адгезионные свойства границ раздела. Во-первых, в зависимости от состава расплава изменяются силы между атомами твердого тела и атомами компонентов жидкого сплава (работа адгезии), с одной стороны, и между атомами самой жидкости сплава (работа когезии) - с другой. Во-вторых, в зависимости от состава контактного материала на границе раздела кристалл-контактный материал будут образовываться разные слои промежуточных фаз, и силы взаимодействия между атомами кристаллов и молекулами этих промежуточных фаз будут отличаться.

Исследованы σ_n , θ , A_a и r_k в зависимости от температуры, способов обработки поверхности и состава некоторых контактных материалов. Выяснено, что σ_n и A_a с ростом температуры сначала резко падают и при температурах на 20÷40 градусов выше температуры плавления данного контактного материала почти не зависят от температуры. С ростом температуры растет и работа адгезии. Кроме того, для контактного материала каждого состава наблюдается корреляция между r_k и θ , A_a . С уменьшением θ , а также с ростом A_a , контактное сопротивление уменьшается. Корреляция между r_k и θ , в общих чертах, сохраняется и при переходе от одного контактного материала к другому. Однако при переходе от одного состава контактного материала к другому, корреляция между r_k и A_a нарушается. Например, несмотря на то, что максимальное значение A_a наблюдается в случае контактного материала на основе системы Bi-Sn-Pb, r_k своего максимального значения достигает при применении контактного материала системы Bi-Sn. Это обусловлено разным влиянием диффундирующих атомов компонентов контактных материалов на электрические свойства монокристаллов твердых растворов $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ и $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$.

Поверхностные натяжения для рассматриваемых расплавленных контактных материалов имеют довольно большие значения (до 400 Дж/м²). Поэтому ясно, что адгезионное взаимодействие этих расплавов с кристаллами в значительной мере будет определяться теми физико-химическими процессами, которые могут происходить на границе раздела расплав-твердое тело: адсорбционным понижением прочности в результате снижения свободной энергии на поверхности раздела, растворением материала кристалла в расплаве, диффузией в объеме твердого тела и химическим взаимодействием контактирующих материалов.

Отметим, что в случае контактного материала мас.% 99,3Bi+0,7Sn с 0,5мас.%Pb или Cd вычисленные значения молекулярной адгезии составляют 45,84кДж/моль и 43,91кДж/моль соответственно. Эти значения, наряду с наблюдаемой температурной зависимостью θ и A_a , показывают, что смачивание и растекание в рассматриваемых случаях обеспечиваются преимущественно

химическим взаимодействием между расплавом контактного материала и кристаллом. При этом образуются интерметаллические соединения уменьшающие механическую прочность контакта, ухудшающие смачиваемость поверхности и приводящие к росту r_k .

Исследованы также электрические и адгезионные свойства границ раздела экструдированных образцов $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ со сплавами 1 и 3 в интервале температур $77 \div 300K$ и напряженности магнитного поля до $74 \cdot 10^4 H/m$.

Выявлено, что характер изменений сопротивления переходного контакта твердого раствора $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ с указанными сплавами и удельного сопротивления самого твердого раствора в магнитном поле почти одинаковы. Однако, изменения $(r_k - r_{k0})/r_{k0}$ с ростом напряженности магнитного поля во всех случаях сильнее, чем изменения $(\rho - \rho_0)/\rho_0$. В образцах, не прошедших отжиг после экструзии, соотношения $(r_k - r_{k0})/r_{k0}$ и $(\rho - \rho_0)/\rho_0$ с ростом напряженности магнитного поля во всех случаях сильнее, чем изменения $(\rho - \rho_0)/\rho_0$, а соотношения $(r_k - r_{k0})/r_{k0}$ и $(\rho - \rho_0)/\rho_0$, при всех напряженностях магнитного поля меньше, чем для образцов, прошедших отжиг. С ростом температуры до $300K$ зависимость r_k и ρ от напряженности магнитного поля ослабляется, однако, закономерности влияния магнитного поля на r_k и ρ , наблюдаемые при $\sim 77K$, сохраняются и при высоких температурах.

Контактные сплавы содержат компоненты из атомов свинца и олова, являющихся эффективными акцепторами в твердых растворах систем Bi-Sb. Поэтому при формировании контактов в результате диффузии атомов Pb и Sn в твердый раствор $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ вблизи контакта возникает приконтактный слой данного твердого раствора, легированный атомами свинца и олова, в результате чего возникает трехслойная структура: твердый раствор $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ – промежуточный слой твердого раствора $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$, сильнолегированный акцепторными атомами - контактный сплав. Удельное сопротивление промежуточного слоя при $77K$ (твердого раствора $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$, легированного Pb и Sn) в несколько раз превышает удельное сопротивление чистого твердого раствора. Кроме того, образцы, легированные атомами Pb и Sn с концентрацией более $0,01 \text{ ат. \%}$ обладают при $\sim 77K$ p-типом проводимости. Вследствие этого вблизи контакта возникает переход n- $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ -p- $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ и r_k структуры определяется сопротивлением этого перехода. В магнитном поле с ростом напряженности магнитного поля удельное сопротивление $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ сильно растет. Одновременно растет и удельное сопротивление промежуточного слоя. Из-за этого рост r_k структуры твердый раствор $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ - промежуточная фаза под действием магнитного поля более сильный, чем рост удельного сопротивления чистого $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$.

С ростом температуры тип проводимости промежуточного слоя становится электронным и действие примесей Pb и Sn на ρ промежуточного слоя ослабляется. Поэтому при $300K$, несмотря на то, что удельное сопротивление как $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$, так и промежуточного слоя, легированного атомами Pb и Sn, незначительно отличаются от значений ρ при $77K$, контактное сопротивление r_k при $300K$ – в два раза меньше, чем при $77K$. Изменение r_k структуры под действием магнитного поля при $300K$ также хорошо коррелирует с изменением ρ чистого $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ и промежуточного слоя.

Эксперименты показали, что при использовании в качестве контактного материала сплава 1, краевой угол равен $\sim 23 \div 24^\circ$, а в случае сплава 3 составляет $\theta \approx 21 \div 22^\circ$.

При $\sim 410 \div 415K$ поверхностное натяжение сплава 1 и сплава 3 составляли 424 и 410 мН/м соответственно, а работа адгезии A_a составляет, соответственно, $780 \div 850 \text{ мДж/м}^2$. Эти значения A_a указывают, что хорошее смачивание

вышеприведенными контактными сплавами поверхности экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ обеспечивается за счет достаточно сильного физико-химического взаимодействия расплава контактного материала с кристаллами.

В случае как отожженных, так и неотожженных образцов при малых концентрациях Pb зависимости r_k и ρ от концентрации Pb при 77К противоположны друг другу: при концентрациях до $\sim 0,01\text{ат.}\% \text{Pb}$ с увеличением концентрации свинца ρ растет, а r_k уменьшается. При концентрациях больше $0,01\text{ат.}\%$ зависимости r_k и ρ от концентрации свинца удовлетворительно коррелируют между собой. Кроме того, при 77К с ростом концентрации Pb в твердом растворе $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ зависимости $(r_k - r_{k0})/r_{k0}$ и $(\rho - \rho_0)/\rho_0$ от напряженности магнитного поля ослабляется. При этом зависимость $(r_k - r_{k0})/r_{k0}$ от напряженности магнитного поля всегда сильнее, чем зависимость магнитосопротивления от H . С повышением концентрации Pb в твердом растворе $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ величина $(r_k - r_{k0})/r_{k0}$ приближается к значению $(\rho - \rho_0)/\rho_0$.

Как и в случае структур на основе чистого твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ контактное сопротивление r_k и ρ структур на основе отожженных образцов, легированных свинцом, более чувствительны к изменениям напряженности магнитного поля, чем структура на основе неотожженных образцов $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$.

При легировании твердого раствора атомами Pb концентрация электронов в нем уменьшается и твердый раствор при концентрациях Pb больше $0,01 \div 0,05\text{ат.}\% \text{Pb}$ приобретает p-тип проводимости при 77К. В результате в структурах на основе твердого раствора, легированного Pb или Sn с концентрациями больше $0,01 \div 0,05\text{ат.}\%$, p-n переход на границе твердый раствор $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ - контактный сплав отсутствует. Вследствие этого в структурах на основе образцов, легированных Pb или Sn, контактное сопротивление r_k меньше, чем в структурах на основе чистого твердого раствора $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$.

В отожженных образцах твердого раствора $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ концентрация структурных дефектов меньше, чем в неотожженных образцах. Вследствие этого подвижность электронов и дырок в отожженных образцах более высокая. Поэтому в структурах твердый раствор $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ - контактный сплав на основе неотожженных образцов $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$, а также на основе образцов, легированных Pb зависимости $(r_k - r_{k0})/r_{k0}$ и $(\rho - \rho_0)/\rho_0$ от напряженности магнитного поля слабее, чем в структурах на основе чистого отожженного твердого раствора $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$.

В экструдированных образцах твердого раствора изменения ρ и r_k в зависимости от концентрации Te носят почти одинаковый характер и с ростом степени легирования твердого раствора теллуrom ρ и r_k уменьшаются. При этом при малых концентрациях (до $\sim 0,005\text{ат.}\%$) влияние примесей теллура на ρ и r_k образцов, непрошедших отжиг, сильнее, чем образцов, прошедших отжиг.

При введении теллура в структурах твердый раствор $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ - контактный сплав одновременно происходят два процесса: а) в приконтактной области твердого раствора происходит компенсация акцепторных центров Pb и Sn (созданные за счет диффузии этих элементов из контактного сплава в приконтактную область твердого раствора) примесями теллура. В результате этого приконтактный слой при $\sim 77\text{К}$ обладает электронным типом проводимости; б) в объемной части твердого раствора растет концентрация электронов, которые являются основными носителями заряда. Оба процесса приводят к снижению высоты потенциального барьера на контакте, т.е. к уменьшению сопротивления переходного контакта. По-видимому, начиная с $0,005 \div 0,01\text{ат.}\% \text{Te}$ акцепторные

центры Pb и Sn в приконтактной области полностью компенсируются. Поэтому, начиная с этой концентрации теллура в твердом растворе $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$, контактное сопротивление структуры полностью определяется сопротивлением перехода твердый раствор $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ – контактный сплав. Начиная с 0,01 ат.% Te, с ростом концентрации Te концентрация основных носителей заряда в приконтактной области растет, что приводит к резкому уменьшению r_k .

Установлено, что с легированием в приконтактной области термоэлементов на основе твердых растворов Bi-Sb можно в 10-15 раз уменьшить r_k контактов и тем самым повысить добротность термоэлементов. При этом такое легирование приводит к тому, что в магнитном поле сопротивление переходного контакта не растет, что очень важно для магнитотермоэлектрических преобразователей на основе твердых растворов висмут-сурьма.

Таким образом, легируя теллуrom приконтактную область термоэлементов на основе твердых растворов Bi-Sb, можно создать термо- и магнитотермоэлектрические преобразователи с более высокой добротностью и стабильными параметрами.

1. Л.С.Стильбанс, *ЖТФ*, **27** (1957) 212.
2. Т.Д.Алиева, Н.М.Ахундова, Д.Ш.Абдинов, *Прикладная физика*, **3** (1999) 115.
3. Б.М.Цирев, *Контактная разность потенциалов*, М.:Гостехтеориздат, (1955) 208.
4. Д.Ш.Абдинов, Т.Д.Алиева, Н.М.Ахундова, М.М.Тагиев, *Пол. решение на А.С.№45400289/25*, (1991).
5. Б.Ш.Бархалов, Н.М.Ахундова, И.Р.Нуриев, Д.Ш.Абдинов, *Изв. АН СССР, Неорган. материалы*, **26**, (1990) 1427.
6. Т.Д.Алиева, Д.Ш.Абдинов, *Неорган. материалы*, **33** (1997) 27.
7. Б.И.Болтакс, *Диффузия в полупроводниках*, М.: Наука, (1961) 462.
8. Н.Х.Абрикосов, В.Ф.Банкина, Л.В.Порецкая, *Полупроводниковые соединения, их получение и свойства*, М.: Наука, (1967) 174.
9. Т.Д.Алиева, Б.Ш.Бархалов, Н.М.Ахундова, Д.Ш.Абдинов, *Изв.АН СССР, Неорган. материалы*, **23** (1987) 346.

**Bi-Sb-Te, Bi-Se-Te və Bi-Sb SİSTEMİ BƏRK MƏHLULLARI ƏSASINDA
TERMOELEMENTLƏRİN KOMMUTASIYA KONTAKTLARININ ELEKTRİK
VƏ ADGEZIYA XASSƏLƏRİ**

J.Ş.ABDİNOV, T.J.ƏLİYEV, N.M.AXUNDOVA, M.M.TAĞIYEV

$\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ və $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ bərk məhlulları kristalları ilə Bi, Sb, Sn, Pb, Cd əsasında metallik ərintiləri sərhəddində fiziki proseslər tədqiq edilmişdir. Aşağı müqavimətli, stabil elektrik xassəli, kafi adgeziya möhkəmlikli kontaktların yaradılma mümkünlüyü göstərilmişdir.

**ELECTRICAL AND ADHEZIVE PROPERTIES OF CONTACTS OF TERMOELEMENTS ON
THE BASIS OF THE SOLID SOLUTIONS OF Bi-Sb-Te, Bi-Se-Te AND Bi-Sb**

D.Sh.ABDINOV, T.D.ALIYEVA, N.M.AKHUNDOVA, M.M.TAGIYEV

The main processes occurring at the interface between crystals of $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ and $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ solid solutions and Bi, Sb, Sn, Pb, Cd. based metallic alloys are investigated. It is shown that low-resistance contacts with stable on electrical parameters and a satisfactory adhesive strength can be product.

Редактор:С.Мехтиева