

РЕЗОНАНСНЫЕ АКЦЕПТОРНЫЕ УРОВНИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЛАВАХ $Bi_{1-x}Sb_x$, ЛЕГИРОВАННЫХ ОЛОВОМ

Б.А. ТАИРОВ

Институт Физики АН Азербайджана,
Баку, 370143, пр. Г. Джавида, 33

Проведено экспериментальное исследование температурных зависимостей концентрации электронов при гидростатическом давлении в сплавах $Bi_{1-x}Sb_x$ ($x=0,09; 0,15$) в интервале температур $77 \leq T \leq 130$ К. Измерения проведены с помощью электромагнитного высокочастотного магнитоплазменного метода. Обнаружено, что в сплаве $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ легированного до 10^{-3} ат.% Sn концентрация ионизированной примеси повышается с ростом температуры, а в сплаве $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$ она уменьшается при увеличении давления и температуры, что объясняется перераспределением электронов между зоной проводимости и квазилокальными акцепторным уровнем.

Наиболее активными примесями акцепторного типа в висмуте и сплавах $Bi_{1-x}Sb_x$ являются ближайшие к нему четырехвалентные элементы Sn и Pb, которые по сравнению с шестивалентными элементами [1] отличаются более сложной структурой валентной зоны.

Из ряда экспериментов следует, что как донорные, так и акцепторные примеси ионизированы уже при низких температурах, примесь лишь незначительно искажает зонный спектр сплавов, а примесные носители просто заполняют соответствующие зоны [2]. Однако в работах [3,4] обнаружен максимум на температурной зависимости удельного сопротивления, который объяснялся влиянием примесных состояний на зонный спектр. В работе [5] исследовались барические зависимости концентрации и подвижности электронов в сплавах $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$ и $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$, легированных оловом при 77К, которые показали, что акцепторные состояния зависят от структуры и параметров валентной зоны. Как было показано в [6], рост температуры приводит, кроме очевидного изменения концентрации и подвижности носителей заряда, и к некоторому изменению энергетического спектра, которое может повлиять на акцепторные состояния в сплавах $Bi_{1-x}Sb_x$. Поэтому представляет интерес сравнение температурных зависимостей электрофизических параметров этих сплавов.

Измерения температурных зависимостей кинетических параметров носителей заряда проводились электромагнитными ВЧ магнитоплазменными (ЭМПВ) методами [7], обладающими рядом преимуществ при исследованиях анизотропных материалов $Bi_{1-x}Sb_x$. В частности, эта методика исключает погрешности измерений, обусловленные электрическими контактами и влиянием формы образца. Измерения производились в диапазоне частот $0,1 \div 25$ МГц с применением скрещивающихся катушек индуктивности. Эффективная концентрация электронов n определялась по отношению f_r / B_r , где f_r и B_r соответственно частота и магнитная индукция, соответствующая максимуму передаваемого на индикационную катушку сигнала.

В настоящей работе представлены результаты исследования температурных зависимостей эффективной концентрации электронов в сплавах $Bi_{1-x}Sb_x$ с $x=0,09; 0,15$, легированных оловом, в условиях всестороннего сжатия до 0,8 ГПа. Отметим, что сплав $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ при атмосфер-

ном давлении и низких температурах представляет собой прямозонный полупроводник с минимальной щелью в L точке зоны Бриллюэна (ЗБ), а в сплаве $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$ вблизи потолка валентной зоны в L точке имеется другой экстремум валентной зоны в T точке (ЗБ).

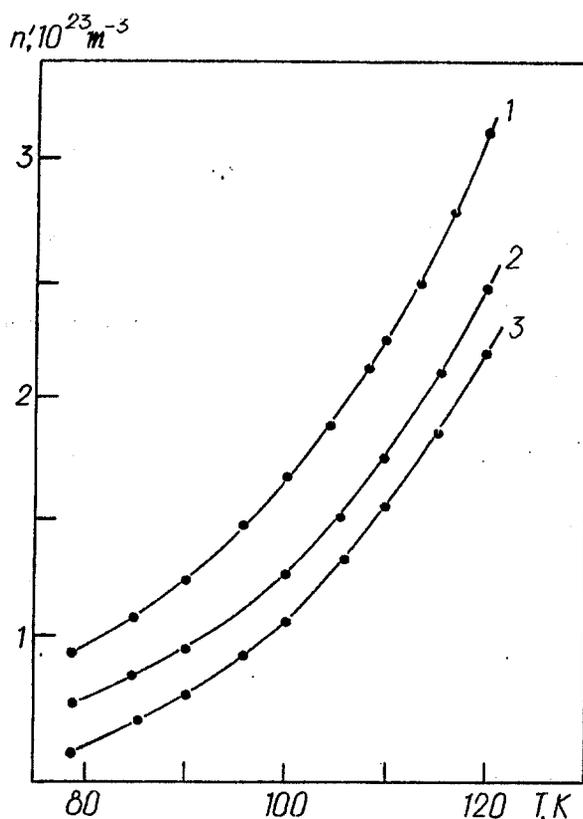


Рис. 1 Зависимости эффективной концентрации носителей заряда от температуры в сплаве $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$, легированном Sn: 1-0 ат.% Sn; 2- $5 \cdot 10^{-5}$ ат.% Sn; 3- 10^{-3} ат.% Sn.

На рис.1 представлены зависимости эффективной концентрации электронов от температуры для сплава $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ легированного до 10^{-3} ат.% Sn при атмосферном давлении. По эффективной концентрации n' и при известных параметрах энергетического спектра носителей заряда можно оценить концентрацию ионизированной примеси: $Na^- = P_L + P_T + P - n$; здесь P_L , P_T и P — концентрации дырок в L , T и Σ точках зоны Бриллюэна (ЗБ). Для сплава $Bi_{1-x}Sb_x$ с $x=0,15$ параметры энергетического

спектра хорошо известны при низких температурах [8]. Как было показано в [9], экспериментальная и теоретическая зависимости $n'(T)$ сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, последняя из которых рассчитана в предположении независимых от температуры параметров энергетического спектра носителей заряда, близки в области температур 77-100К. Выше 130К экспериментальные и расчетные зависимости n от T значительно расходятся, что указывает на значительное изменение энергетического спектра носителей заряда. Поэтому анализ температурных зависимостей эффективной концентрации следует ограничить областью температур 77-130К. Оценка концентрации ионизированной примеси в этой области температур показала, что она возрастает примерно вдвое для образцов с различным уровнем легирования. На результаты расчета может повлиять температурная зависимость щели E_{gL} , особенно для сильнолегированных образцов, для которых уровень Ферми близок ко дну зоны проводимости. Так как всестороннее сжатие меняет значение E_{gL} , то представляет интерес сравнение зависимостей эффективной концентрации электронов $n'(T)$ под воздействием гидростатического давления, особенно когда E_{gL} близка к нулю. На рис.2 представлены зависимости $n'(T)$ для $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}+\text{Sn}$ при различных давлениях. Видно, что они подобны зависимостям $n'(T)$ при атмосферном давлении. Обратим внимание, что при $P=0,62$ ГПа значение E_{gL} близко к нулю (при $T=77$). Сравнение зависимостей $n'(T)$ легированных и собственного сплава показывает, что и при этом давлении концентрация ионизированной примеси растет.

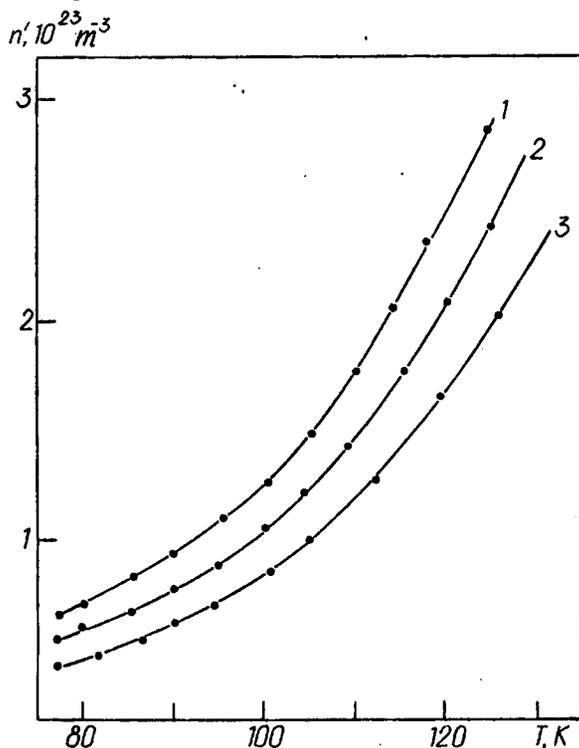


Рис. 2 Зависимости эффективной концентрации носителей заряда от температуры для $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15} + 5 \cdot 10^{-5}$ ат.% Sn при различных значениях давления: 1 - 10^5 Па, 2 - 0,3 ГПа, 3 - 0,56 ГПа.

Небольшая вариация параметров энергетического спектра (например, изменение эффективной массы Σ -дырок энергетического расстояния между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны в Σ точке $E_{L\Sigma}$) не влияет на результаты расчета, поэтому можно полагать, что концентрация ионизированной примеси действительно растет в указанной области температур. Заметим, что при давлении $P=0,62$ ГПа и $T=77$ К сплав $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ переходит в бесщелевое состояние, следовательно акцепторные уровни в L (если таковые существуют) становятся резонансными. Однако, как можно увидеть из рис.2, это не отражается на зависимостях $n'(T)$. Можно ожидать, что для акцепторных состояний, связанных с L экстремумами, выполнено условие сильного легирования ($\sim 10^3$ ат.% Sn).

На рис.3 представлены зависимости эффективной концентрации от температуры для сплава $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$ легированного до 1,5.10 ат.% Sn при атмосферном давлении. Оценка концентрации ионизированной примеси в области температур 77-130К показала, что она не зависит от температуры.

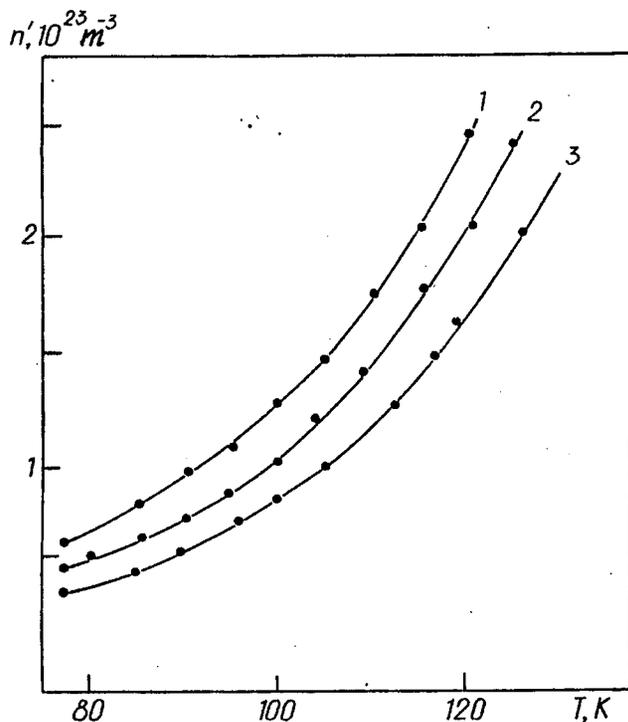


Рис. 3. Зависимости эффективной концентрации электронов в $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$, легированном Sn: 1-0 ат.% Sn; 2- 10^{-4} ат.% Sn; 3- $1,5 \cdot 10^{-4}$ ат.% Sn.

На рис.4 представлены зависимости $n'(T)$ для сплава $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$ с различным уровнем Sn при различных значениях гидростатического давления. Видно, что при $P=0,07$ ГПа эффективная концентрация электронов легированных образцов выше, чем при атмосферном давлении до $T=100$ К, а при более высоких температурах - ниже, т.е. в легированных образцах в отличие от нелегированного в интервале температур 77-100К в барических зависимостях эффективных концентраций наблюдается максимум, что указывает на перераспределение электро-

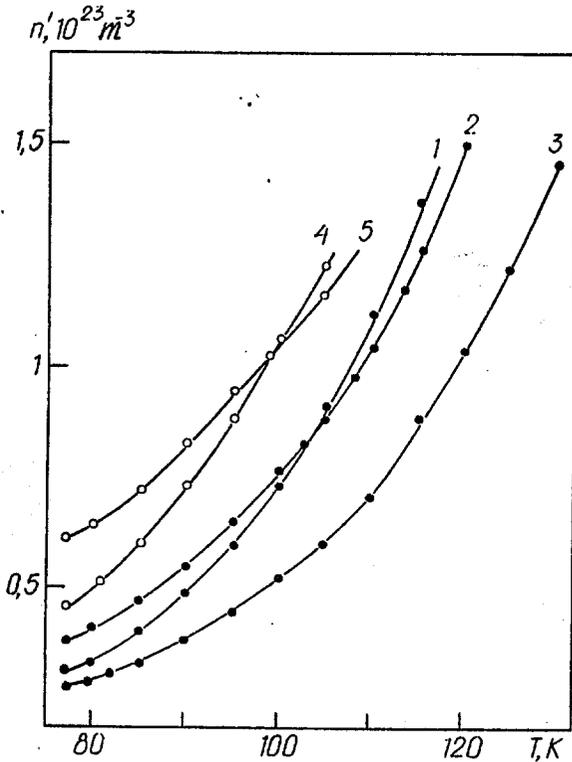


Рис. 4. Зависимости эффективной концентрации носителей заряда от температуры для $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$, легированном Sn при различных значениях давления: \circ - 10^{-4} ат. % Sn, \bullet - $1,5 \cdot 10^{-4}$ ат. % Sn; 1 - $1,4 \cdot 10^{-5}$ Па, 2 - 0,04 ГПа, 3 - 0,32 ГПа, 4 - 0,07 ГПа.

нов между зоной проводимости и акцепторными состояниями. При температурах выше 100K меняется характер барических зависимостей $n'(T)$: исчезает максимум к зависимости от P , они становятся подобными аналогичным зависимостям для сплава $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$. Заметим, что смена характера барических зависимостей $n'(P)$ для сплава $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$ с различным уровнем легирования происходит при одном значении температуры. Увеличение температуры от 77 до 100K не может существенно повлиять на ионизацию отдельных акцепторных уровней в запрещенной зоне. Действительно, уровень Ферми при таком повышении температуры меняется лишь на 1 мэв в собственном сплаве. Поэтому можно предположить, что смена характера зависимости $n'(P)$ при $T=100K$ связана с изменением энергетического спектра носителей заряда, вероятно щели E_{gl} . Действительно, при давлении $P=0,07$ ГПа, когда наблюдается максимум эффективной концентрации электронов в легированных оловом образцах $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$ при 77K, E_{gl} изменяется всего лишь на 1 мэв. Примерно на такую энергию E_{gl} уменьшается и при повышении температуры от 77 до 100 K [10]. Поэтому, как и при увеличении давления, акцепторные уровни с ростом температуры становятся резонансными.

Эти результаты позволили сделать заключение, что в сплавах $Bi_{1-x}Sb_x$ существуют акцепторные уровни, а их влияние на температурные и барические зависимости эффективной концентрации и циклотронной подвижности определяется составом сплава.

- [1] П.П. Бодюл. Анизотропия явлений переноса в сплавах висмута с акцепторными примесями и ее взаимосвязь со структурой зон вблизи уровня Ферми. Автореф. канд. дис. Новосибирск, 1970.
- [2] Н.Б. Брандт, Х. Диттмак, Я.Г. Пономарев ФТТ, 1971, т.13, в.10., С.2860-2872.
- [3] П.П. Бодюл, В.У. Гарбажю. Особенности действия примесей в висмуте. Полуметаллы и узкозонные полупроводники под влиянием воздействий. Кишинев, 1983, С.26-49.
- [4] Б.А. Таиров, Д.С. Томтиев, М.Г. Шахтахтинский. Известия АН Азерб. ССР, 1977, н.ч.
- [5] А. Суткус, Р. Толутис. Лит. физ. сб., 1991, т. 21, №5, с.478-484.
- [6] N.M. Ravindra, V.R. Srivastava. J. Phys. Chem. Sol., 1979, v.40, n10, p.791-793.
- [7] Ю. Пожела, В. Рячка, Б. Таиров, Р. Толутис. Лит. Физ. Сб., 1973, т.13, № 4, с.535-543.
- [8] Н.Б. Брандт, Р. Германн, Г.Л. Тольшева, П.Л. Девяткова, Д. Кусник, В. Криах, Я.Г. Пономарев. ЖЭТФ, 1982, т.83, № 6, с. 2152-2169.
- [9] В.А. Таиров, А.А. Суткус, Р. Толутис, М.Г. Шахтахтинский. Turkish Journal of Physics, v.18, n.2.
- [10] В.Г. Алексеева, Г.М. Лившиц, Е.Г. Чирикова, А.Я. Шульман. Радиотехника и электроника, 1976, №9, с.1926-1938.

В.А. Таиров

QALAYLA AŞQARLANMIŞ YARIMKEÇİRİCİ $Bi_{1-x}Sb_x$ XƏLİTƏLƏRİNDƏ REZONANS AKSEPTOR SƏVIYYƏLƏRİ

İşdə qalayla aşqarlanmış $Bi_{1-x}Sb_x$ ($0.09 \leq x \leq 0.15$) xəlitələrində hidrostatik təzyiç altında elektromağnit maqnitoplazma dalğalarının dispersiyasının tədqiqi nəticəsində, elektronların konsentrasiyasının temperatur asılılığı analiz edilmişdir. Göstərilmişdir ki, 10^{-3} at. % Sn səviyyəsinə qədər aşqarlanmış $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$, $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ xəlitələrində 77-100K temperatur intervalında elektronların konsentrasiyasının temperatur asılılığının xarakteri müxtəlifdir. $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$ xəlitəsində ionlaşmış ionların konsentrasiyası təzyiçdən asılıdır ki, bu da rezonans akseptor səviyyəsinin əmələ gəlməsilə əlaqədardır.

Б.А. ТАИРОВ

B.A. Tairov

THE RESONANCE ACCEPTOR LEVELS IN SEMICONDUCTOR ALLOYS OF $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ DOPED BY Sn

There have been carried out experimental investigation of temperature dependences of effective electron concentrations in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.09 \leq x \leq 0.15$) doped by Sn under the hydrostatic pressure in temperature range $77 \leq T \leq 130$ K. The measurements are conducted by electromagnetic high-frequencies magnetoplasma method (EMPW). It is found that in $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ alloy doped up to 10^{-3} at.% Sn the concentration of ionizing impurities increases with temperature, and in $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$ alloy doped up to $15 \cdot 10^{-4}$ at.% Sn it decreases from pressure and temperature which is due to redistribution of charge carriers between conduction band and quasilocal acceptor levels.

Дата поступления: 24.02.97

Редактор: С.А. Алиев