

УДК 621.315.592

## О МЕХАНИЗМЕ РАССЕЙАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЛАВАХ $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ( $x=0,09; 0,15$ )

Б. А. ТАИРОВ

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

Исследованы температурные зависимости эффективной концентрации и циклотронной подвижности электронов в полупроводниковых сплавах висмут-сурьма. Измерения проводились электромагнитными магнитоплазменными методами. Показано, что в полупроводниковых сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  в интервале температур 77-170К преобладает сплавное рассеяние, а в области  $T>170\text{К}$  существенный вклад в рассеяние электронов вносят акустические фононы.

Несмотря на многочисленные работы, посвященные изучению механизмов рассеяния электронов в полупроводниковых сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  данные о механизмах рассеяния при температурах  $T\geq 77\text{К}$  крайне недостаточны и часто противоречивы. Поэтому в настоящей работе исследована дисперсия магнитоплазменных волн (мв) в полупроводниковых сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  с целью выявления механизма рассеяния в них электронов. Рассеяние электронов зависит от параметров энергетического спектра, таких как ширина запрещенной зоны, перекрытие валентной зоны проводимости и др. Так как давление изменяет энергетический спектр носителей заряда, то также проведены исследования влияния гидростатического давления на дисперсию МПВ в сплавах  $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$  и  $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ .

Измерения проводились электромагнитными ВЧ магнитоплазменными методами. Для возбуждения и индикации ВЧ магнитоплазменных волн использовались скрещенные катушки индуктивности [1]. Частота волн изменялась в пределах 0,1÷35МГц. Эффективная концентрация электронов  $n'$  определялась из соотношения  $f_n/V$ , где  $f_n$  и  $V$  соответственно частота и магнитная индукция в условиях размерного резонанса [1]. Циклотронная подвижность электронов  $\mu_c=(V_m)^{-1}$ , где  $V_m$  магнитная индукция, соответствующая максимуму передаваемого на индикационную катушку сигнала в его зависимости от магнитного поля при частотах  $f\ll f_c$ . Гидростатическое давление создавалось в камере высокого давления из бериллиевой бронзы [2].

Анализ барических зависимостей циклотронной подвижности и эффективной концентрации электронов в полупроводниковых сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $0,07<x<0,16$ ) показал [3], что при  $T=77\text{К}$  может преобладать рассеяние электронов на акустических фононах. Однако, похожая зависимость времени релаксации импульса электронов от энергии и величины прямой щели  $E_{gl}$  имеет место и при сплавном рассеянии электронов (на неоднородностях концентрации сурьмы), особенно при энергиях электронов  $E>E_{gl}$  [4], что затрудняет определение преобладающего механизма рассеяния по барическим зависимостям. Зависимости времени релаксации импульса электронов от температуры для двух механизмов рассеяния и анализ температурных зависимостей кинетических коэффициентов мог бы указать преобладает ли акустическое или сплавное рассеяние.

Температурные зависимости эффективной концентрации электронов в сплавах  $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$  и  $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$  представлены на Рис.1. Видно, что эти зависимости для обоих сплавов имеют степенной характер с различными показателями степени в интервалах температур  $77 \div 100K$  и  $100 \div 200K$ . На Рис.1 сплошной кривой изображена теоретическая зависимость  $n'(T)$  для  $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$  в предположении, что концентрация электронов равна концентрации дырок и параметры энергетического спектра не зависят от температуры. Следовательно,  $n'=P_T$ , где  $P_T$  - концентрация дырок в  $T$  экстремуме валентной зоны в  $T$  точке зоны Бриллюэна. Для тяжелых дырок в  $T$  точке принимался параболический закон дисперсии. Положение химического потенциала рассчитывалось по эффективной концентрации электронов с использованием параметров энергетического спектра в  $L$  точке ЗБ, представленных в [5].

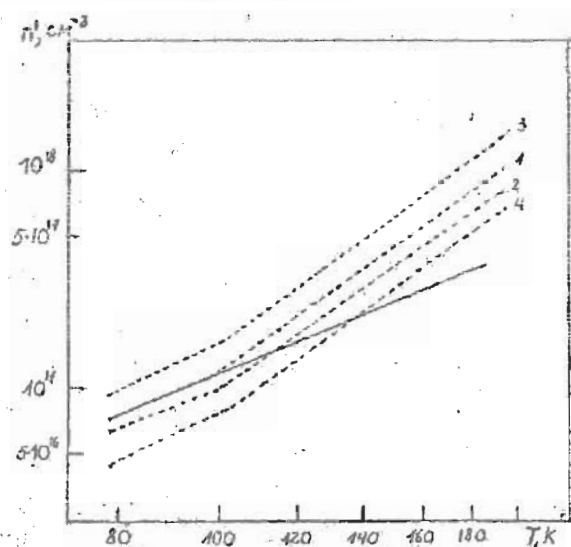
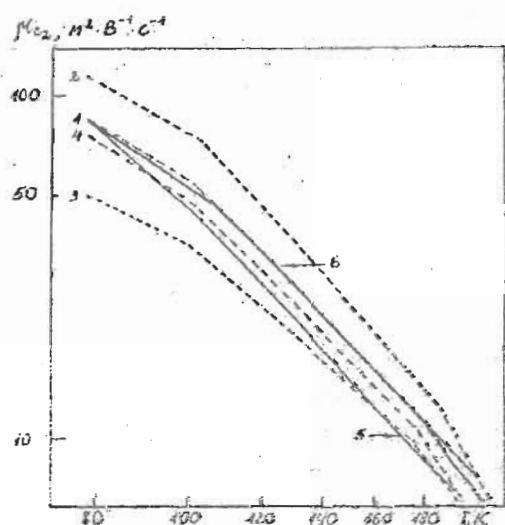


Рис.1  
Зависимости эффективной концентрации электронов от температуры сплава  $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$  (1 -  $P=10^4$  ГПа, 2 -  $P=0,35$  ГПа) и сплава  $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$  (3 -  $P=10^4$  ГПа, 4 -  $P=0,67$  ГПа).

Видно, что при  $T > 100K$  экспериментальные зависимости значительно выше теоретически предсказанных. Это указывает на то, что параметры энергетического спектра зависят от температуры. Аналогичные результаты получены и для  $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$ . То обстоятельство, что температурные зависимости  $n'(T)$  качественно похожи при различных давлениях, которые эффективно изменяют прямую щель  $E_{gL}$ , указывает на то, что изменение  $E_{gL}$  с температурой мало влияет на зависимости эффективной концентрации электронов от температуры. Сопоставить экспериментальные и теоретические зависимости  $n'(T)$  удастся в предположении, что энергетическая щель между дном зоны проводимости в  $L$  точке и экстремумом валентной зоны в  $T$  точке ЗБ зависит от температуры:  $E_{LT} = a - bT$  в интервале  $T > 100K$ , в соответствии с данными [6] температурных зависимостей энергетического спектра висмута. При расчетах мы пренебрегали температурной зависимостью  $E_{gL}$  на основании барических зависимостей. Действительно, при давлении  $P=0,35$  ГПа (Рис.1), когда прямая энергетическая щель близка к нулевой, характерные зависимости  $n'(T)$  сохраняются.

Перейдем к обсуждению температурных зависимостей подвижности. Они представлены на Рис.2 для сплавов  $Bi_{0,91}Sb_{0,09}$  и  $Bi_{0,85}Sb_{0,15}$  при атмосферном давлении и давлениях  $P=0,35$  ГПа и  $P=0,62$  ГПа, соответствующих переходу сплавов в бесщелевое состояние при  $T=77K$ . Зависимости  $\mu_{c2}(T)$  состоят из трех частей, каждая из которых имеет степенной характер. Заметим, что при  $T=100K$  меняются показатели степени температурных зависимостей как эффективной концентрации,

так и подвижности электронов. Можно предположить, что более быстрое уменьшение циклотронной подвижности выше этой температуры также обусловлено температурной зависимостью параметров энергетического спектра и, так как характер зависимостей циклотронной подвижности от температуры не зависит от давления, можно полагать, что слабая зависимость  $E_{g1}$  от температуры не отражается на температурных зависимостях  $\mu_{c2}$ . Авторы [7] полагали, что при  $T > 160\text{K}$  существенный вклад в зависимость  $\mu(T)$  вносит межзонное L-T рассеяние. Однако это рассеяние существенно зависит от давления, поскольку энергетическое расстояние между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны в T (для  $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$ ) значительно меняется. Это изменение  $E_{LT}$  с давлением, как видно из Рис.2 не отражается на температурных зависимостях  $\mu_{c2}$  для гидростатически сжатых сплавов. На Рис.2 также представлены рассчитанные нами зависимости  $\mu_{c2}(T)$  для сплавов  $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$  при атмосферном давлении. Процедура расчета отмечена в [3]. Выражения для времен релаксации импульса приведены в [4,8]. При расчетах использовалась указанная выше зависимость  $E_{LT}(T)$ . Видно, что для рассеяния электронов акустическими фононами эта зависимость значительно сильнее, чем экспериментальная.



**Рис.2**  
Зависимости циклотронной подвижности  $\mu_{c2}(T)$  электронов сплава  $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$  от температуры (1 -  $P=10^{-4}$  ГПа, 2 -  $P=0,35$  ГПа) и сплава  $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$  (3 -  $P=10^{-4}$  ГПа, 4 -  $P=0,67$  ГПа). Сплошные кривые – расчет для  $\text{Bi}_{0,91}\text{Sb}_{0,09}$  при  $P=10^{-4}$  ГПа, 5 – рассеяние акустическими фононами, 6 – сплавное рассеяние.

В интервале температур  $77 \div 170\text{K}$  расчетные и экспериментальные зависимости  $\mu_{c2}$  от температуры наиболее близки, если принять, что рассеяние происходит преимущественно на неоднородностях распределения сурьмы. При расчетах мы пренебрегали межзонным рассеянием, так как по нашим оценкам большая часть электронов не может рассеиваться в T зону. Экспериментально наблюдаемое изменение показателя степени функции  $\mu_{c2}(T)$  в высокотемпературной области ( $T > 170$ ) можно описать, подгоняя параметры рассеяния, как переход из области сплавного рассеяния в область акустического. (Отметим, что для расчетных кривых 5,6 рассеяние подогнано в точке  $T=77\text{K}$ ). Таким образом, анализ температурных зависимостей эффективной концентрации и подвижности электронов позволяет предположить, что в полупроводниковых сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  в диапазоне температур  $77 \div 170\text{K}$  преобладает сплавное рассеяние, а в области  $T > 170\text{K}$  существенный вклад в рассеяние электронов вносят акустические фононы.

1. Ю.К.Пожела, Р.Г.Толутис, *Многодолинные полупроводники*, 1 (1978) 87.
2. Р.Ю.Пожела, Р.Г.Толутис, *Лит. физ. сб.*, XVII (1977) 771.
3. R.Pozera, A.Sutkus, R.Tolutis, *Phys. Stat.Sol. (b)*, 120 (1983) 165.
4. Yu.I.Ravich, B.G.Efimova, V.I.Tamarchenko, *Phys. Stat.Sol. (b)*, 43 (1971) 11.
5. К.Н.Каширин, *Возникновение седловой точки в энергетическом спектре сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$* , Автореф... канд.физ.-мат. наук, М.,1987.
6. Ю.И.Маслов, И.Г.Маслов, *Полупроводники и сегнетозлектрики*, Сб.ст. под ред. Л.Иванова, (1976) 114.
7. А.А.Мусась, Б.А.Тайров, М.Г.Шахтактинский, *Изв. АН Аз. ССР, серия физ.-техн. и мат. наук*, №1 (1983) 79.
8. H.Nielsen, *J. Phys.F: Metal. Phys.*,8 (1978) 141.

YARIMKEÇİRİCİ  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x=0,09;0,15$ ) XƏLİTƏLƏRİNDƏ ELEKTRONLARIN  
SƏPİLMƏSİ MEKANİZMI HAGGINDA

B.A.TAIROV

Bismut-sürmə berk məhullarında elektronların effektiv konsentrasiyasının və siklotron yürüklüyünün temperatur asılıqları tədqiq edilmişdir. Ölçülər yüksək tezlikli elektromaqnit maqnit-plazma üsulu vasitəsilə aparılmışdır. Effektiv konsentrasiyanın və siklotron yürüklüyünün temperatur asılığının analizi nəticəsində müəyyən edilmişdir ki 77÷170K temperatur intervalında elektronlar əsasən sürmənin qeyri bircinsliliyindən,  $T > 170\text{K}$  də akustik fononlardan səpilir.

ON THE ELEKTRON SCATTERING MECHANISM IN SEMICONDUCTOR  
 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x=0,09;0,15$ ) ALLOYS

B.A.TAIROV

The temperature dependences of the electron effective concentration and cyclotron mobility in semiconductor Bi-Sb alloys are investigated. Measurements are made by electromagnetic magnetoplasma methods. It's shown that the alloys scattering dominates in 77÷170K temperature range and in  $T > 170\text{K}$  region the acoustic phonon scattering dominates in semiconductor  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  alloys.