

## РЕЗОНАНСНАЯ УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ У ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЛАВОВ $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Е.В.Богданов, Н.Б.Брандт, В.М.Мананков,  
Л.С.Флейшман

Сообщается о наблюдении в квантующих магнитных полях у полупроводниковых сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  резонансных максимумов скорости  $g$ -ударной ионизации и связанных с ними осцилляций проводимости  $\sigma$ . Эффект обусловлен, по-видимому, вертикальными оже-переходами, теоретически предсказанными Такешимой [1].

За последние годы у узкозонных полупроводников экспериментально обнаружены резонансы вероятности фононной, плазменной и оже-рекомбинации неравновесных носителей в квантующих магнитных полях [2]. Резонансы наблюдаются в магнитных полях, при которых расстояния между уровнями Ландау оказываются равными характерной энергии рекомбинации. Поскольку многие определяющие рекомбинацию процессы, в частности оже-переходы могут идти в обратном направлении, то естественно ожидать появления резонансов скорости генерации носителей заряда в квантующих магнитных полях. Этот эффект, насколько нам известно, ранее не наблюдался.

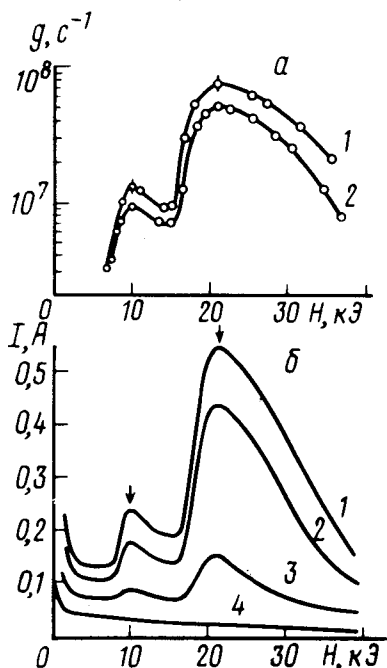


Рис. 1. Зависимость скорости ударной ионизации  $g$  (а) и тока  $I$  (б) от напряженности продольного магнитного поля  $H$  у  $\text{Bi}_{0,86}\text{Sb}_{0,14}$  при  $H \parallel C_1$  и напряжениях электрического поля  $E$ : 1 -  $E = 50$  В/см; 2 -  $E = 45$  В/см; 3 -  $E = 35$  В/см; 4 -  $E = 20$  В/см

В настоящей работе сообщаются результаты измерений скорости ударной ионизации валентной зоны и проводимости в полупроводниковых сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$   $n$ -типа ( $x = 0,09; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,15$ ) в продольном магнитном поле  $H$  до 40 кЭ при температуре  $T = 4,2\text{К}$  и ориентации тока вдоль биссекторной  $C_1$  и бинарной  $C_2$  кристаллографических осей. По данным гальваномагнитных измерений в слабых электрических полях  $E$  у исследованных сплавов при  $T = 4,2\text{К}$  концентрация электронов  $n \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и подвижность  $\mu \approx 6 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$ . При таких концентрациях полупроводниковые сплавы  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  находятся в области сильного легирования. Ширина запрещенной зоны  $\epsilon_g$  у исследованных сплавов определяется расстоянием между практически зеркальными трема элект-

ронными и тремя дырочными экстремумами в точках  $L$  зоны Бриллюэна [ 3, 4 ] и изменяется в пределах от 12 до 21 МэВ [ 4 ]. Измерения проводились в режиме заданного напряжения по методике, впервые описанной в работе [ 5 ]. Прямоугольные импульсы напряжения с длительностью фронта менее 1 нсек формировались с помощью генератора на ртутном реле.

Зависимости скорости ударной ионизации от величины магнитного поля для двух фиксированных значений электрического поля у образца  $\text{Bi}_{0,86}\text{Sb}_{0,14}$ ,  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{I} \parallel C_1$ , приведены на рис. 1а. На обеих представленных кривых наблюдаются максимумы резонансного типа, положение которых (10 и 21 кЭ) не зависит от напряженности электрического поля. При этих же значениях магнитных полей зависимости тока  $I$  (проводимости) от магнитного поля имеют максимумы (рис. 1, б, кривые 1, 2, 3). А в допробойной области электрических полей осцилляции проводимости не наблюдаются (рис. 1, б, кривая 4).

Аналогичные результаты получены на всех исследованных образцах, причем магнитное поле  $H_N$ , при которых наблюдаются максимумы скорости ударной ионизации и проводимости, увеличиваются с ростом содержания сурьмы и, следовательно, ширины запрещенной зоны  $\epsilon_g$  (рис. 2).

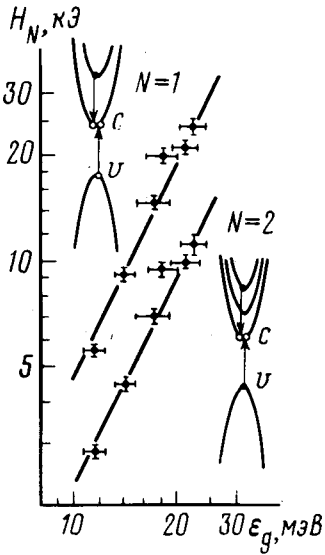


Рис. 2. Зависимость магнитных полей  $H_N$  наблюдения резонансов от величины энергетической щели  $\epsilon_g (H=0)$  при  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{I} \parallel C_1$ . Кривые проведены согласно расчетам по формуле (2), выполненным с учетом изменения щели в магнитном поле [ 7 ] для  $N=1$  и  $N=2$ . На вставках приведены схемы соответствующих вертикальных оже-переходов между уровнями Ландау зоны проводимости (с) и валентной (v) зоны

Появление в магнитном поле резонансных максимумов скорости ударной ионизации может быть обусловлено вертикальными оже-переходами [ 1 ] (см. вставки на рис. 2). Эти переходы при выполнении условия:

$$\epsilon_{N,s} - \epsilon_0^- = \epsilon_g, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{N,s}$ ,  $\epsilon_0^-$  — энергии  $N, s$ -ого и нижнего уровней Ландау, обладают минимальной пороговой энергией, что вместе с особенностями плотности состояний на дне зон Ландау приводит к резонансному возрастанию скорости ударной ионизации. Заметим, что положение резонансов определяется только параметрами энергетического спектра и не зависит от величины электрического поля. Используя полуэмпирическую модель спектра Смита, Барафа, Роуэлла [ 6 ], описывающую легкие носители в квантуемом магнитном поле у  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  [3], легко определить из условия (1) значения магнитных полей  $H_N$ :

$$H_N = M \frac{cm_0}{e\hbar} \frac{\epsilon_g^2}{N}, \quad (2)$$

где  $m_0$  — масса свободного электрона,  $M$  — произведение матричных элементов,  $N=1, 2, 3, \dots$ . Значения  $H_N$  для  $\text{Bi}_{0,86}\text{Sb}_{0,14}$  ( $\mathbf{H} \parallel \mathbf{I} \parallel C_1$ ), рассчитанные с учетом изменения величины  $\epsilon_g$  в магнитном поле [ 7 ] и с использованием известных значений параметров спектра электронов

из двух эквивалентных долин [ 3, 4 ] для  $N = 1, 2$ , указаны стрелками на рис. 1 и, как видно, хорошо согласуются с экспериментом. Электроны из третьей долины имеют практически вдвое меньшую массу [ 3 ] и, поэтому, лишь вносят дополнительный вклад в резонансы с четными номерами.

Формула (2) при учете изменения щели в магнитном поле [ 7 ] удовлетворительно описывает зависимость положения резонанса от величины энергетической щели (рис. 2), что свидетельствует в пользу предположения о связи наблюдаемых эффектов с вертикальными оже-переходами.

Измерения времени жизни носителей показывают, что оно не изменяется в интервале магнитных полей  $3 \div 40$  кЭ. Это позволяет объяснить наблюдаемые максимумы проводимости ростом стационарной концентрации носителей при резонансах скорости ударной ионизации.

При ориентации магнитного поля вдоль бинарной оси также наблюдаются максимумы скорости ударной ионизации и проводимости, причем магнитные поля  $H_N$  в этом случае примерно в 1,7 раза меньше соответствующих полей при ориентации  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{I} \parallel C_1$ , что согласуется с анизотропией малых циклотронных масс электронов в сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  [3].

Прямые измерения скорости ударной ионизации у образцов, ориентированных вдоль тригональной оси, затруднены из-за большого отрицательного магнитосопротивления, однако осцилляции магнитосопротивления наблюдаются и в этом случае.

#### Литература

1. *Takeshima M.* J. Appl. Phys., 1973, **44**, 4717.
2. *Nimtz G.* Phys. Reports, 1980, **63**, 265.
3. *Миронова Г.А., Судакова М.В., Пономарев Я.Г.* ЖЭТФ, 1980, **78**, 1830.
4. *Миронова Г.А., Судакова М.В., Пономарев Я.Г.* ФТТ, 1980, **22**, 3628.
5. *Mc Groddy J.C., Nathan M.I.* J. Phys. Soc. Japan (Suppl.), 1966, **21**, 437.
6. *Smith G.E., Baraff G.A., Rowell J.W.* Phys. Rev., 1964, **135**, A1118.
7. *Брандт Н.Б., Чудинов С.М., Караваев В.Г.* ЖЭТФ, 1976, **70**, 2296.