

*Письма в ЖЭТФ, том 20, вып. 6, стр. 389 – 392*

*20 сентября 1974 г.*

## **ЦИКЛОТРОННЫЕ ВОЛНЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЛАВАХ**

**Bi – Sb**

*Г.Эльгарт<sup>1)</sup>, В.С.Эдельман*

Показано, что в сплавах Bi – Sb могут наблюдаться циклотронные волны. Исследование их спектра позволяет определить такие характеристики вещества, как эффективные массы носителей тока, диэлектрическую постоянную кристаллической решетки и т. д. и изучать электронный спектр в ультраквантовом пределе.

В работах [1, 2] сообщалось о наблюдении в полупроводниковых сплавах Bi – Sb стоячих магнитоплазменных волн частоты  $f = \omega_c / 2\pi \approx$

---

<sup>1)</sup> Университет им. Гумбольдта, Берлин, ГДР

$\approx 10^{11}$   $\epsilon\mu$  при поле  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{k}$  [1] и  $\mathbf{H} \perp \mathbf{k}$  [2]. ( $\mathbf{k}$  — волновой вектор; так как  $v = \omega/k \ll c$ , то  $\mathbf{k}$  направлен вдоль нормали к плоской поверхности образца). Волны с  $\mathbf{k} \parallel \mathbf{H}$  представляют собой геликоны, и их исследование позволяет измерять концентрацию носителей тока  $N$ . Природа волн с  $\mathbf{k} \perp \mathbf{H}$  в [2] осталась невыясненной. Здесь будет показано, что эти волны являются циклотронными, и имеют спектр, подобный циклотронным волнам в чистом висмуте [3].

Эксперимент был проведен с образцами  $\text{Bi}_{0,865}\text{Sb}_{0,135}$   $n$ -типа с  $N = 5 + 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация электронов определялась по скорости геликонов, наблюдавшихся на этих же образцах. Образцы в форме плоскопараллельных пластин толщиной  $\sim 0,7 + 0,3 \text{ мк}$  отрезались искрой от монокристаллических слитков. Образцы прикладывались к отверстию  $\phi 1,2 \text{ мм}$  в стенке резонатора двухмиллиметрового диапазона. Изменения импеданса образца при возбуждении стоячих магнитоплазменных волн регистрировались по изменению СВЧ мощности, проходящей через резонатор [1]. Запись эксперимента представлена на рис. 1.

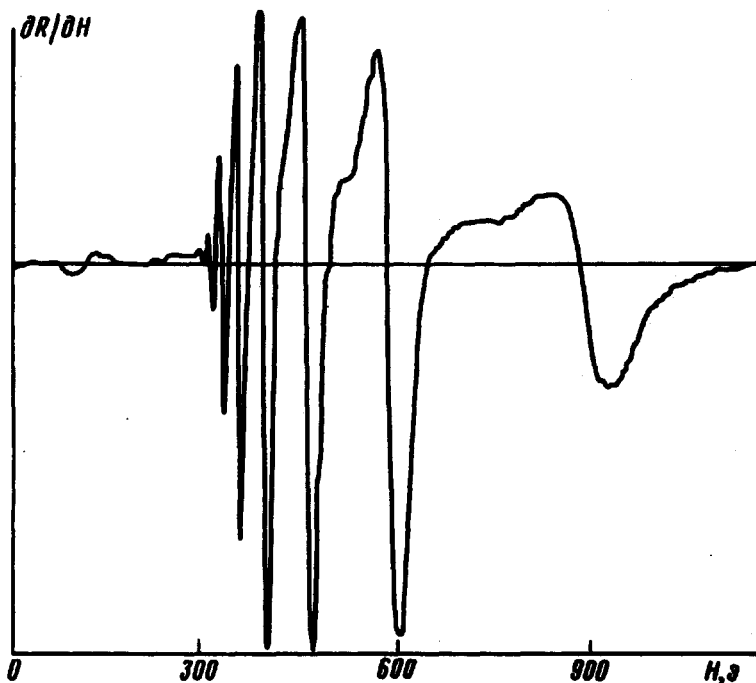


Рис. 1. Осцилляции поверхностного сопротивления  $n$ -BiSb, связанные с возбуждением стоячих циклотронных волн:  $f = 131 \text{ Гц}$ ;  $\mathbf{H} \parallel C_3$ ;  $\mathbf{k} \parallel C_3$ ;  $\mathbf{I} \parallel \mathbf{H}$ ; толщина образца  $0,32 \text{ мк}$ ;  $T = 1,5^\circ\text{К}$ ;  $N = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

Рассчитаем спектр волны при  $\mathbf{H} \parallel C_1$  ( $C_1, C_2, C_3$  — соответственно биссекторная, бинарная и тригональная оси кристалла). Согласно эксперименту, волны возбуждаются наилучшим образом при направлении СВЧ токов в резонаторе  $\mathbf{I} \parallel \mathbf{H}$ . При  $\mathbf{H} \parallel C_1$  вследствие симметрии компоненты тензора проводимости  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{yx} = 0$ . Поэтому спектр волны определяет только  $\sigma_{xx}$ , которую можно рассчитать, при известной поверхности Ферми по формулам, приведенным в [4].

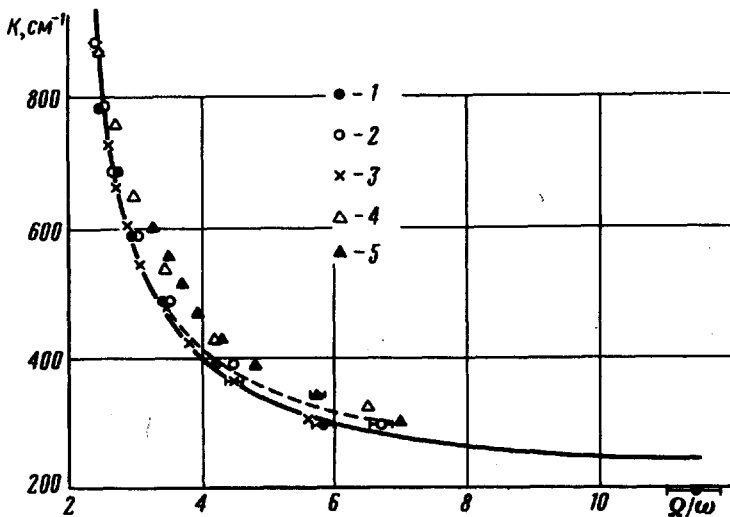


Рис. 2. Зависимость  $k(\Omega/\omega)$  для циклотронных волн при  $H \parallel C_1$ : 1, 2 -  $k \parallel C_3$ ,  $d=0,32$  мм;  $N=5 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ;  $f=120,5$  ГГц (1),  $f=130,1$  ГГц (2); 3 -  $k \parallel C_3$ ,  $N=5 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $d=0,52$  мм,  $f=135,7$  ГГц; 4 -  $k \parallel C_2$ ,  $N=6 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $d=0,29$  мм,  $f=132,1$  ГГц; 5 -  $k \parallel C_2$ ,  $N=6 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $d=0,73$  мм,  $f=140,2$  ГГц. Сплошная кривая - расчет по (2) при  $f=120,5$  ГГц, пунктир - при  $f=135,7$  ГГц

Поверхность Ферми изучаемого сплава состоит из трех эквивалентных эллипсоидов, переходящих друг в друга при повороте вокруг оси  $C_3$  на  $120^\circ$  [5]. Главные оси эллипсоидов относятся как  $p_{C_2} : p_{C_3} : p_{C_1} = 1 : \alpha : \beta = 1 : 1,4 : 15$ . (Наклоном эллипсоидов к базовой плоскости  $\sim 6^\circ$  мы будем пренебрегать).

Произведя соответствующие вычисления, из уравнений Максвелла с учетом токов смещения получим

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon + \frac{4\pi}{3c^2} \frac{Ne^2}{m} \alpha \left( \frac{6\omega^2/\Omega^2}{1-4\omega^2/\Omega^2} - \frac{9}{\beta^2} \right), \quad (1)$$

где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость решетки кристалла,  $m$  - минимальная эффективная масса электронов при  $H \parallel C_1$ ,  $\Omega = eH/mc$ . Выражение (1) справедливо в классическом пределе. В нашем случае стоячие волны наблюдались при  $H \gtrsim 300$  э. Согласно оценкам, при  $H > 350 + 400$  э для каждого участка поверхности Ферми ниже уровня Ферми остается по единственному уровню Ландау (мы считаем, что спиновое расщепление, как и в чистом висмуте, близко к циклотронному). Квантование при  $k\nu/\omega \ll 1$  ( $\nu$  - скорость электронов) при квадратичном изотропном спектре не изменяет  $\sigma_{zz}$  [6]. Анизотропия поверхности Ферми приводит к перераспределению электронов между разными ее участками. Так как плотность электронов  $dn = [eH / (2\pi\hbar)^2 c] dp_z$ , то

в обоих "наклонных эллипсоидах" суммарное число электронов становится равным числу электронов в "прямом эллипсоиде". Учтя это обстоятельство, получим

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon + \frac{\pi}{c^2} \frac{Ne^2}{m} a \left( \frac{6\omega^2/\Omega^2}{1-4\omega^2/\Omega^2} - \frac{10}{\beta^2} \right). \quad (2)$$

На рис. 2 представлены экспериментальные значения  $k(H)$  и зависимость (2), рассчитанная при  $N = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $m = 2,8 \cdot 10^{-3} m_e$ ,  $\epsilon = 90$ . Интересно отметить, что при этих значениях параметров образец прозрачен при всех полях  $H$ , таких что  $\Omega/\omega > 2$ . Расчет хорошо согласуется с экспериментом. Некоторое различие наблюдается при  $\Omega/\omega = 11$ . Возможно, что это связано со смещением электронной зоны [7], приводящему к дальнейшему перераспределению электронов между различными участками поверхности Ферми.

Таким образом, в [2] впервые в полупроводниковых сплавах наблюдались циклотронные волны. Их исследование позволяет определить целый ряд параметров спектра электронов и изучать их поведение в квантующем поле.

П.Л.Кацице авторы благодарны за предоставленную возможность проведения работы, М.С.Хайкину и Р.Геррману за интерес к работе, Г.С.Чернышеву – за техническую помощь.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
16 июля 1974 г.

Университет им. Гумбольдта,  
Берлин, ГДР

### Литература

- [1] R.Herrmann, G.Oelgart, H.Krüger, H.Haefner. Phys. Stat. Sol., B63, 491, 1974.
- [2] G.Oelgart, R.Herrmann, H.Krüger. Phys. Stat. Sol., B63, K99, 1974.
- [3] В.С.Эдельман. Письма в ЖЭТФ, 9, 302, 1969.
- [4] М.С.Хайкин, Л.А.Фальковский, В.С.Эдельман, Р.Т.Мина. ЖЭТФ, 45, 1704, 1963.
- [5] G.Oelgart, R.Herrmann. Phys. Stat. Sol., B58, 181, 1973.
- [6] M.P.Greene, H.J.Lee, J.J.Quinn, S.Rodriguez. Phys. Rev., 177, 1019, 1969.
- [7] G.A.Baraff. Phys. Rev., 137, A842, 1965.