

ТУННЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА В КВАНТУЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В.Н.Винчаков, В.И.Кайданов, С.А.Рыков

Методом туннельной спектроскопии в квантующем магнитном поле исследованы закон дисперсии электронов в зоне проводимости и в основной поверхностной двумерной подзоне теллурида свинца.

Туннельная спектроскопия в квантующем магнитном поле имеет ряд преимуществ по сравнению с другими осцилляционными методами исследования энергетического спектра полупроводников. В отличие от метода, основанного на эффекте Шубникова – де Гааза, она позволяет изучать энергетический спектр в широком интервале энергий на одном образце. Здесь нет трудностей расшифровки осцилляций межзонных переходов, которые могут иметь место в магнитооптической спектроскопии. И, наконец, привлекательна возможность изучать спектр как объемных, так и поверхностных состояний. Метод туннельной спектроскопии в квантующем магнитном поле успешно использован для исследования энергетического спектра полупроводников с изотропным законом дисперсии^{1,2}. Из полупроводников с анизотропным спектром он применялся к кремнию³ и теллуриду свинца⁴, причем ставилась задача обнаружения и исследования только поверхностных двумерных зон.

В настоящем сообщении приведены результаты исследования проводимости туннельных МДП структур на основе теллурида свинца в магнитных полях до 80 кЭ. Объектом изучения служили монокристаллы PbTe, выращенные методом Бриджмена – Стокбаргера, легированные галлием, с концентрацией дырок $p \cong 1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. С помощью стандартной модуляционной методики при температуре 4,2 К измерялись первая dI/dV и вторая d^2I/dV^2 производные вольт-амперных характеристик МДП структур $p\text{-PbTe}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Pb}$ с туннельно прозрачным слоем диэлектрика, изготовленных на ориентированных по плоскостям типа (100) кристаллах полупроводника с использованием технологии⁴.

При двух ориентациях магнитного поля \mathbf{H} – параллельно плоскости перехода ($\mathbf{H} \perp \mathbf{I}$) и перпендикулярно ей ($\mathbf{H} \parallel \mathbf{I}$) – исследовалась зависимость второй производной вольт-амперной характеристики от магнитного поля. В том и другом случае при напряжениях смещения, соответствующих туннелированию электронов из металла в состояния пустой зоны проводимости ($V > 0,3 \text{ В}$), наблюдались осцилляции, связанные с квантованием Ландау объемных состояний. На рис. 1 изображены положения минимумов осцилляций при различных напряжениях смещения. Кривые отражают движение уровней Ландау в магнитном поле. Серия уровней, соответствующих квантованию объемных состояний, в нулевом магнитном поле экстраполируются к дну зоны проводимости E_c .

При напряжении смещения, соответствующем туннелированию электронов в объемные состояния вблизи дна зоны проводимости полупроводника, исследовалась зависимость осцилляций от ориентации кристалла PbTe в магнитном поле. При вращении в плоскости (100) в осцилляционной картине присутствует не более двух периодов по обратному магнитному полю $\Delta(1/H)$ ⁵. Фурье-анализ позволил выделить каждый период, а характер их изменения в зависимости от ориентации кристалла (рис. 2) – оценить коэффициент анизотропии эффективных масс $K = m_{\parallel} / m_{\perp} = 9 \pm 1$.

При $\mathbf{H} \parallel [100]$ ориентация всех изоэнергетических эллипсоидов относительно магнитного поля одинакова (один период осцилляций⁵). Для этой ориентации при различных напряжениях смещения определены экстремальные сечения эллипсоидов плоскостью, перпендикулярной \mathbf{H} , и циклотронные эффективные массы:

$$S = 2\pi e / \hbar c \Delta(1/H), \quad (1)$$

$$m_c = \frac{\hbar^2}{2\pi} \frac{dS}{dE} = \frac{\hbar^2}{2\pi} \frac{dS}{d(eV)}. \quad (2)$$

На рис. 3 зависимости $S(E - E_c)$ и $m_c(E - E_c)$, отражающие закон дисперсии, приведены в сопоставление с рассчитанными (пунктирные кривые) для двухзонной модели⁵ с параметрами: $m_{\perp 0} = 0,022 m_0$, $E_g = 0,19$ эВ, $K = 9$. Видно, что вплоть до $E - E_c \cong 0,09$ эВ двухзонная модель удовлетворительно описывает экспериментальные зависимости, но при больших энергиях она становится неприменимой, и при расчетах необходимо пользоваться более сложными моделями^{6,7}.

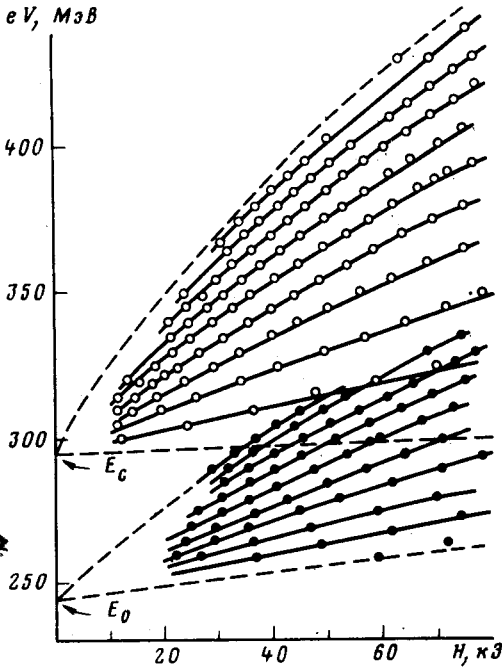


Рис. 1

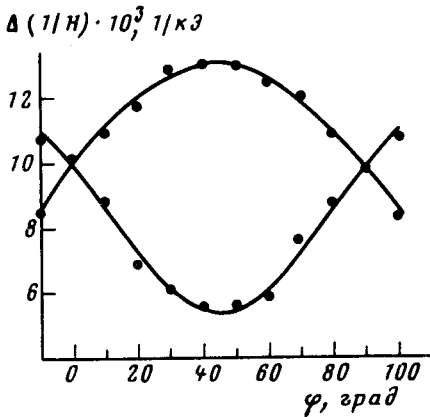


Рис. 2

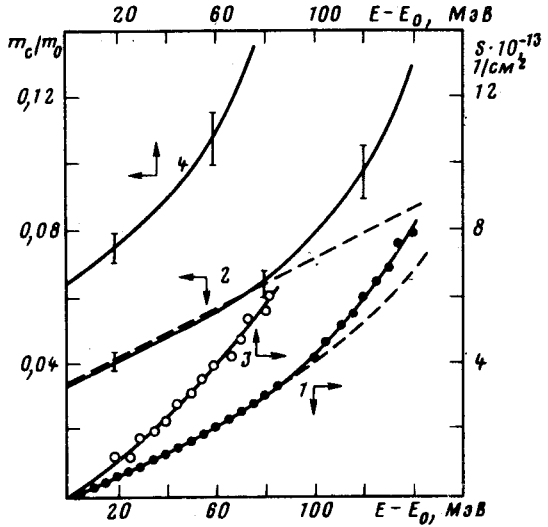


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость положений минимумов d^2I/dV^2 от магнитного поля при $H \parallel I$ (E_c — край зоны проводимости, E_0 — дно основной поверхностной подзоны)

Рис. 2. Зависимость периодов осцилляций туннельной проводимости по обратному магнитному полю от ориентации кристалла в магнитном поле ($\varphi = 0$ при $H \parallel [100]$, вращение в плоскости (100))

Рис. 3. Энергетические зависимости экстремальных сечений изоэнергетических поверхностей и циклотронных эффективных масс для объемных состояний (кривые 1 и 2) и для основной поверхностной подзоны (кривые 3 и 4) ($H \parallel I$)

Кроме серии уровней, которые экстраполируются к дну зоны проводимости, при $H \parallel I$ можно выделить уровни, экстраполирующиеся к минимумам поверхностных подзон. На рис. 1 приведены уровни Ландау для основной поверхностной подзоны E_0 . Для нее по формулам (1) и (2) рассчитаны зависимости S (рис. 3, кривая 3) и m_c (рис. 3, кривая 4) от $E - E_0$. Значения массы на краю подзоны ($\sim 0,064 m_0$) находится в хорошем согласии с рассчитанной из параболической зонной модели ($0,063 m_0$)⁸.

Таким образом, туннельная спектроскопия в квантующем магнитном поле, с успехом применявшаяся для исследования полупроводников с изотропным спектром, может быть также использована и при анизотропных, многодолинных моделях, давая ценную информацию как об объемных, так и поверхностных состояниях.

Литература

1. Миньков Г.М., Кружаев В.В. ФТТ, 1980, 22, 1641.
2. Зверев Л.П., Кружаев В.В., Миньков Г.М., Рут О.Э. ЖЭТФ, 1981, 80, 1163.
3. Kunze U., Lautz G.. Surface Sci., 1982, 113, 55.
4. Tsui D.C., Kaminsky G., Schmidt P.H. Phys. Rev. B, 1974, 9, 3524.
5. Равич Ю.И., Ефимова Б.А., Смирнов И.А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS. М.: Наука, 1968, с. 394.
6. Dimmock J.O. Phys. Chem. Sol., 1972, 32, suppl 1, 1972, p. 319.
7. Волков Б.А., Панкратов О.А., Сазонов А.В. ЖЭТФ, 1983, 85, 1395.
8. Stern F., Howard W.E. Phys. Rev., 1967, 163, 816.

Ленинградский
политехнический институт

Поступила в редакцию
13 июня 1985 г.