

РЕЗОНАНСНАЯ СВЧ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ СЛОИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ $\text{Bi} - \text{Sb}$ С СЕТКОЙ ДИСЛОКАЦИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ. ПРОЯВЛЕНИЕ МИНИЗОННОСТИ СПЕКТРА?

*В.А.Герасименко, В.В.Зорченко, В.В.Кондратенко,
А.И.Федоренко, Д.Д.Халамейда, В.М.Яковенко*

Впервые обнаружен резкий пик отрицательной СВЧ фотопроводимости (ФП) в зависимости от магнитного поля H в слоистых периодических композициях $\text{Bi} - \text{Sb}$. ФП резонансна по частоте, а положение пика по H определяется мощностью излучения и током через образец.

В последние годы ведется интенсивное изучение слоистых структур на основе полуметаллов и материалов с узкими запрещенными зонами, которые являются перспективными для СВЧ и ИК-техники.

Нами исследовались слоистые периодические композиции (СПК) на основе полуметаллов Bi и Sb . СПК выращивались методом поочередного термического испарения Bi и Sb на слюдяную подложку в вакууме 10^{-6} Па. Период СПК (~ 10 нм) и толщины слоев определялись по известной методике по положению пиков спутников на дифрактограмме¹. СПК (размер образцов — 13×1 мм) имели 15 периодов. На границе раздела $\text{Bi} - \text{Sb}$ расположены дислокации несоответствия, образующие упорядоченную треугольную сетку². Образцы помещались в жидкий гелий и крепились к фланцу волновода так, что облучалась их центральная часть. Контакты располагались вне волновода. Постоянное магнитное поле H лежало в плоскости СПК и было ортогонально току I через образец. Электрическое поле волны ориентировалось параллельно H . Образец облучался прямоугольными СВЧ импульсами длительностью, равной половине периода повторения. Частота исследования импульсов 30 Гц, либо 15 кГц. Добавочное напряжение $u_{\text{ФП}}$, возникающее на СПК при облучении, измерялось калиброванным селективным нановольтметром 232 В, настроенным на частоту модуляции. Ток через образец поддерживался постоянным. Падающая на образец СВЧ мощность достигала 50 мВт, что не вызывало разогрева образца. Частота излучения f изменялась от 131,5 до 137,7 ГГц.

На рис. 1 показана зависимость ФП одного из образцов (период $d = 8,6$ нм, толщина слоев Bi $d_{\text{Bi}} = 4,32$ нм) от H и I . При малых I и $H = 0$ СПК практически не фоточувствительны. Включение магнитного поля приводит к появлению резкого пика отрицательной ФП с максимумом при $H = H^*$. По мере увеличения тока происходит сдвиг пика в область меньших H с одновременным ростом амплитуды пика. При $H = 0$ максимум фотопроводимости достигается при некотором токе, равном I_0 . Дальнейшее увеличение тока вызывает спад и исчезновение ФП. Оказалось, что при фиксированном I максимум ФП достигается в поле H^* , удовлетворяющем эмпирическому соотношению

$$I = I_0 [1 - (H^*/H_0^*)^2], \quad (1)$$

где H_0^* есть предел H при $I \rightarrow 0$.

При $I \gtrsim 300$ мкА вслед за основным пиком появляется область с положительной ФП, а при $I \gtrsim 450$ мкА кроме основного пика наблюдается дополнительный пик, движущийся, как и основной, в сторону меньших H с ростом I . Зависимости (1) приведены на рис. 2, который иллюстрирует также деградацию СПК после повторных циклов охлаждения от комнатных до гелиевых температур. Для образца с $d = 8,6$ нм, $d_{\text{Bi}} = 4,32$ нм с увеличением мощности излучения пик ФП нелинейно сдвигается в область меньших H . С понижением частоты излучения ток I_0 возрастает, а параметр H_0^* уменьшается, поэтому пик ФП может сдвигаться в область как меньших, так и больших H в зависимости от уровня тока. При фиксированном $I \sim 500$ мкА расстройка частоты $\sim 2\%$ приводит к полному исчезнове-

нию пика ФП в магнитном поле, хотя для образца с $d = 11,2$ нм пик ФП наблюдался при всех используемых в эксперименте частотах. Вольт-амперные характеристики образцов практически линейны; для образца, соответствующего рис. 1, $R = 204$ Ом. Изменение сопротивления при включении СВЧ поля не превышает 0,01%. Эффект ФП не реагирует на изменение на противоположное направления H или I .

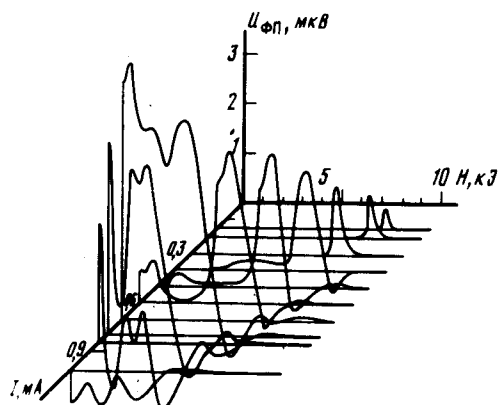


Рис. 1. Зависимость фотопроводимости от магнитного поля и тока при $f = 135,35$ ГГц, мощности излучения $W = 50$ мВт, $T = 4,2$ К

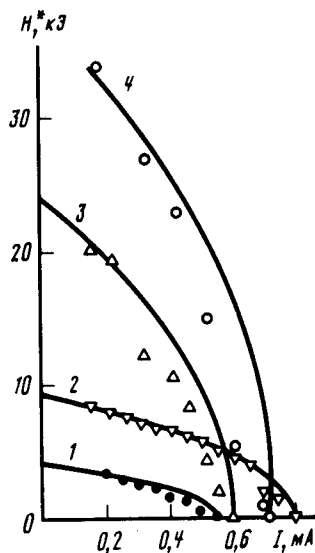


Рис. 2. Связь между H^* и I для образцов с параметрами $d = 11,2$; $d_{Bi} = 3,84$ нм (кривая 1 (●)) и $d = 8,6$; $d_{Bi} = 4,32$ нм (кривые 2 (▽), 3 (△), 4 (○)); $W = 50$ мВт. Кривые 1 и 2 соответствуют измерениям после первого, а 3 и 4 — после второго и третьего охлаждений образца от 290 К до 4,2 К

Объяснить наблюдаемые эффекты разогревом носителей тока или же явлениями акусто-электронного типа ³ весьма затруднительно, учитывая резонансный характер ФП и малость электрических полей. По сути требуется понять природу ФП при $H = 0$ и роль магнитного поля в наблюдаемых явлениях. Можно предположить, что в исследуемых образцах электронный спектр минизонный. Такое допущение позволяет объяснить резонансный по частоте характер ФП и зависимость положения пика от величины тока, если считать, что электроны частично заполняют нижнюю минизону. При энергии кванта достаточной для заброса электронов в вышележащую минизону, должна наблюдаться ФП (ее знак будет определяться соотношением подвижностей электронов в зонах). Если же частота излучения мала для такого процесса, то постоянным электрическим полем можно сместить ферми-распределение по энергии на величину $\delta\epsilon$ и произвести "подстройку" энергетического зазора под энергию кванта. $\delta\epsilon$ можно оценить из соотношения $\delta\epsilon \sim eEl$, где E — напряженность постоянного электрического поля, l — длина пробега электронов между неупругими соударениями. Оценка l по сдвигу I_0 при изменении f дает $l \sim 14$ мкм (это значение совпадает по порядку величины с длиной пробега между электрон-электронными соударениями в пленках сурьмы ⁴), а для ширины вышележащей минизоны, определяемой по интервалу токов ($H = 0$), при которых наблюдается ФП, получаем величину, приблизительно в 2 раза меньшую энергии кванта ($5,6 \cdot 10^{-4}$ эВ при $f = 135,5$ ГГц). С понижением температуры ФП уменьшается и исчезает при $T \sim 1,7$ К, что вероятно, связано с уменьшением размытия распределения Ферми.

Роль магнитного поля неясна. Мы не можем пока объяснить природу резонанса ФП в магнитном поле, а также происхождение связи (1) между I и H^* . Обращает на себя внимание тот факт, что параметр H_0^* увеличивается в кратное число раз (частота и мощность излучения фиксированы) после термоциклирования образцов.

Если действительно образуется сверхрешетка (СР), то минизонный характер спектра связан, по-видимому, как со слоистостью структуры, так и с потенциальными ямами для электронов в Sb в узлах упорядоченной сетки дислокаций несоответствия (трехмерная СР), поскольку для одномерных СР энергетические параметры минизон на два порядка больше характерных энергий в эксперименте. Выдвинутые нами гипотезы требуют дополнительных исследований, пока же вопрос о природе наблюдаемых явлений остается открытым.

Авторы благодарят Ю.А.Богода и Ф.Г.Басса за полезные дискуссии.

Литература

1. *Хачатурян А.Г.* Теория фазовых превращений и структура твердых растворов. М. : Наука, 1974, с. 384.
2. *Федоренко А.И., Кондратенко В.В.* Известия АН СССР, сер. физ., 1977, 41, 2315.
3. *Виткалов С.А., Гантмахер В.Ф., Левиев Г.И.* ЖЭТФ, 1986, 90, 2233.
4. *Bukhshtab E.I., Butenko A.V., Komnik Yu. F., Pilipenko V.V.* Solid State Commun., 1985, 53, 347.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
23 июля 1987 г.
После переработки
14 декабря 1987 г.