

## ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Vi}_{1-x}\text{Sb}_x$

Ю.В.Обухов, Е.Г.Чиркова

Обнаружена собственная фотопроводимость в твердых растворах  $\text{Vi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Измерен спектр этой фотопроводимости. Исследована частотная зависимость фотоотклика на 10-мкм излучение в диапазоне от единиц гц до 100 мгц. Показано, что величина времени релаксации фотопроводимости лежит в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-9}$  сек.

Твердые растворы  $\text{Vi}_{1-x}\text{Sb}_x$  при концентрациях сурьмы  $x$ , лежащей в пределах  $8 < x < 25$  ат. % представляют собой узкозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны, зависящей от  $x$  и изменяющейся от нуля до  $E_g \sim 25$  мэВ при  $x \sim 17$  ат. %. В настоящее время удается воспроизводимо получать чистые совершенные монокристаллы этих полупроводников, в которых концентрация электронов при  $T = 4,2$  К не превышает  $10^{14}$  см $^{-3}$ , а их подвижность достигает  $10^7$  см $^2$ /В·сек. Таким образом, твердые растворы  $\text{Vi}_{1-x}\text{Sb}_x$  представляют собой в настоящее время наиболее узкозонные из известных чистых полупроводниковых материалов с высокой подвижностью электронов. Электрофизические и гальваномангнитные свойства этих материалов исследованы весьма обстоятельно, ряд работ посвящен изучению оптических свойств  $\text{Vi}_{1-x}\text{Sb}_x$ , имеются сообщения о наблюдении когерентного длинноволнового ИК излучения из  $\text{Vi}_{0,92}\text{Sb}_{0,08}$ , но до сих пор в литературе нет сообщений о наблюдении фотопроводимости в этом материале, несмотря на то, что интерес к ней проявлялся уже давно [1].

Исследованные в данной работе образцы  $\text{Vi}_{1-x}\text{Sb}_x$  представляли собой монокристаллические пластины площадью  $10 \div 20$  мм $^2$  и толщиной  $50 \div 100$  мкм, получавшиеся скалыванием из монокристаллических слитков перпендикулярно тригональной оси в жидком азоте. Концентрация электронов в образцах составляла  $n_{4,2\text{К}} \lesssim 1 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ , подвижность  $\mu_{4,2\text{К}} \gtrsim 1 \cdot 10^6$  см $^2$ /В·сек. Сопротивление образцов в жидком гелии не превышало 30 Ом. Контакты к пластинкам припаивались индием. Образцы крепились на конце световода из нержавеющей стали и помещались в гелиевый криостат. Для записи спектра фотоответа был использован длинноволновый вакуумный решеточный монохроматор FIS-21, в котором излучение модулировалось механическим прерывателем с частотой 400 гц.

На рис.1 приведены спектр фотоответа образца  $\text{Vi}_{0,823}\text{Sb}_{0,177}$  и спектр его оптического пропускания, измеренный по методике, описанной в [2]. В данном образце ширина запрещенной зоны  $E_g \sim 19$  мэВ, при энергии фотонов  $\hbar\omega > 19$  мэВ ( $\lambda < 65$  мкм) коэффициент поглощения  $K > 500$  см $^{-1}$ , так что в названной области спектра  $Kd > 1$  ( $d$  - тол-

щина образца). Соответственно этому, спектральная зависимость фотопроводимости  $\text{Bi}_{0,823}\text{Sb}_{0,177}$  приведенная на рис. 1, имеет вид, характерный для "толстых" образцов: вся кривая лежит в области края фундаментального поглощения, максимум ее приходится на область частот ИК излучения, в которой  $Kd \sim 1$ , а при больших  $\hbar\omega$  фотопроводимость быстро спадает.

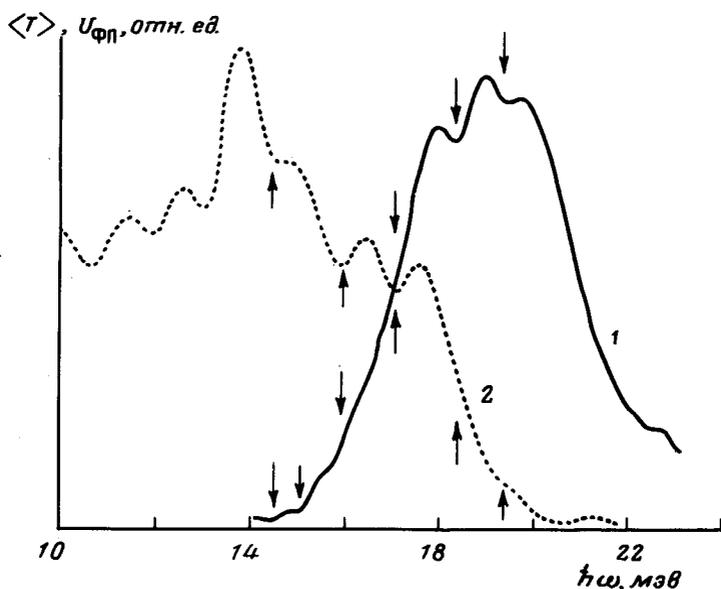


Рис.1. Сглаженный по шумам спектр фотопроводимости (кривая 1) и сглаженный по шумам и периоду интерференции спектр пропускания (кривая 2) образца  $\text{Bi}_{0,823}\text{Sb}_{0,177}$ . Стрелками указаны фононные провалы

В спектре фотопроводимости видны особенности (провалы), отвечающие полосам поглощения в  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  при энергиях фотонов 14,3; 15,0; 15,8; 16,5; 17,2; 18,5; 19,4; мэВ см. таблицу в [2]. Совпадение положения особенностей в спектрах фотопроводимости и оптического пропускания было установлено дифференцированием этих спектров на ЭВМ. Тот факт, что в областях спектра, в которых имеет место нефотозлектронное поглощение излучения, величина фотоответа уменьшается, показывает, что наблюдавшийся фотоответ обусловлен фотопроводимостью, а не каким-либо тепловым эффектом.

Мы исследовали также инерционность фотопроводимости в образцах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Первоначальные измерения показали, что время фотоответа, по крайней мере, меньше 1 мсек. Поэтому для измерения инерционности фотоответа мы использовали метод смещения в образцах излучения двух  $\text{CO}_2$ -лазеров, настроенных с помощью дифракционных решеток на одну линию генерации  $\lambda = 10,6$  мкм. Мощность падавшего на образец излучения составляла 10 мВт. Метод смещения с перестройкой частоты в пределах доплеровской ширины линии генерации позво-

ляет исследовать частотные зависимости фотоотклика вплоть до частоты  $\sim 10^8$  Гц. Кроме того, выигрыш в мощности падающего излучения при использовании лазера в качестве источника ИК излучения вместо монохроматора составляет пять — шесть порядков. Это позволяет исследовать частотные зависимости фотоотклика малочувствительных образцов.

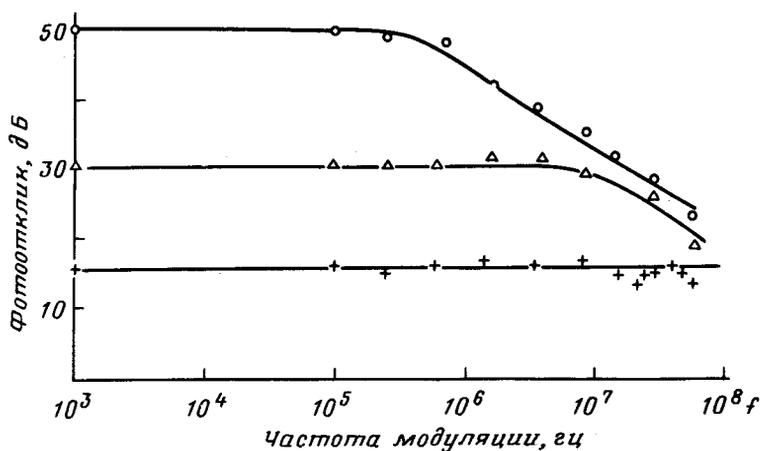


Рис.2. Типичные частотные зависимости фотоотклика образцов  $Bi_{1-x}Sb_x$  при температуре жидкого гелия

Контроль настройки на линию генерации осуществлялся решеточным анализатором спектра  $CO_2$ -лазера. Для получения требуемой частоты биений один из лазеров настраивался в пределах ширины линии генерации изменением длины резонатора с помощью регулируемого постоянного напряжения на пьезокерамическом элементе.

Время релаксации фотоотклика определялось из измерений зависимости фотоотклика от частоты биений. Следует отметить одну особенность проведения измерений инерционности фотоотклика образцов  $Bi_{1-x}Sb_x$ . В связи с тем, что в ряде образцов время фотоотклика и, соответственно, его величина оказались малыми, возникла необходимость использовать узкополосные приемники для регистрации сигнала биений. Полоса вольтметра составляла  $\sim 10$  кГц в диапазоне частот  $10^5 + 10^8$  гц. Поскольку стабильность частоты биений составляла  $\sim 5$  Мгц/мин, измеряемый сигнал уходил со временем из полосы вольтметра. Эта трудность измерений была обойдена следующим образом. На пьезокерамический элемент одного из лазеров вместе с постоянным напряжением подавалось также и переменное с частотой 1 кГц. При этом на выходе узкополосного вольтметра фотоотклик представлял собой серию импульсов. Импульсный сигнал на выходном детекторе приемника компенсировался постоянным напряжением, измерив которое можно было определить величину фотоотклика.

Измерения показали, что: 1) в образцах  $Bi_{1-x}Sb_x$  время релаксации лежит в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-9}$  сек. Типичные частотные зависимости фотоответа показаны на рис.2. В образцах, обладающих хорошей фоточувствительностью, фотоотклик не зависит от частоты в диапазоне от 10 до  $10^7$  гц. У некоторых малочувствительных образцов спад фотопроводимости не наблюдался вплоть до 160 Мгц откуда следует, что в них  $\tau < 1,5 \cdot 10^{-9}$  сек. 2) фоточувствительность образцов измерялась методом прямого детектирования излучения  $CO_2$ -лазера, модулированного по амплитуде механическим модулятором с частотой 1 кгц. Измеренные значения вольт-ваттной чувствительности фотоотклика составляют  $10^{-1} \div 10$  В/вт (при  $\tau \sim 10^{-9} \div 10^{-7}$  сек, соответственно).

Следует учесть, что из-за большого показателя преломления ( $n > 10$ ) [2] большая часть падающего излучения отражается. Просветление поверхности образцов позволило бы существенно увеличить фоточувствительность.

Авторы благодарны Т.М.Лифшицу за постоянное внимание к работе и ценные обсуждения.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
29 июля 1978 г.

### Литература

- [1] Фотопроводимость. Сб. статей из серии "Современные проблемы физики", пер. с англ. под ред. Ш.М.Когана, М., изд. Наука, 1967.
- [2] Т.М. Лифшиц, А.Б.Ормонт, Е.Г.Чиркова, А.Я.Шульман. ЖЭТФ, 72, 1130, 1977.