

СВЧ РЕЗОНАНС ЗАДЕРЖАННОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$

Д.Е. Долженко, И.М. Иванчик, А.В. Никорич, Д.Р. Хохлов,
С.Н. Часноков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119899, Москва

Поступила в редакцию 4 декабря 1991 г.

Обнаружен эффект резонансного возрастания фотопроводимости сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$ при воздействии СВЧ накачки. Показано, что за возникновение эффекта ответственны электроны, локализованные на метастабильных примесных состояниях яблизи дна зоны проводимости.

В настоящей работе сообщается об обнаружении нового эффекта - резонансе задержанной фотопроводимости в $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$, индуцированном сигналом СВЧ.

В качестве объекта исследования был выбран сплав с содержанием олова $x = 0,25$, в котором уровень Ферми стабилизирован внутри запрещенной зоны на ~ 25 мэВ ниже дна зоны проводимости¹. Темновая концентрация свободных электронов в материале не превышает 10^6 см⁻³ при температуре жидкого гелия. Под действием инфракрасной подсветки постоянной интенсивности проводимость сплава линейно возрастает во времени, а после выключения освещения наблюдается долговременная релаксация фотопроводимости, характерное время которой превышает 10^4 с при $T = 4,2$ К².

Образец помещался в вакуумированной камере, охлаждаемой жидким гелием и полностью экранирующей фоновое излучение. Контролируемая ИК подсветка образца осуществлялась тепловым источником излучения, нагреваемом до температуры ~ 100 К, через сеточный фильтр, охлаждаемый до $T = 4,2$ К, который отсекает длинноволновую часть спектра излучения источника с длиной волны $\lambda > 18$ мкм. Часть камеры, содержащая образец, опускалась в сверхпроводящий селексид.

Схема измерительной части установки представлена на рис.1. Образец включен в два электрических контура: по первому из них протекает измерительный постоянный ток, по второму подводится энергия СВЧ накачки. Конденсаторы и катушки индуктивности находятся в непосредственной близости от образца и служат для развязки контуров по постоянному и переменному токам. Согласующее сопротивление находится внутри охлаждаемой камеры на конце коаксиальной СВЧ линии и служит для согласования линии с выходом СВЧ свип-генератора. Последний позволяет сканировать частоту в пределах (0 - 600) МГц, а также останавливать развертку на определенной частоте. Мощность выходного СВЧ сигнала может изменяться от 0 до 50 мВт. В эксперименте проводились измерения проводимости образца в зависимости от интенсивности ИК подсветки, частоты и амплитуды СВЧ накачки, а также от величины приложенного магнитного и электрического поля.

Образец охлаждался в условиях темноты до температуры $T = 4,2$ К. Затем включался источник ИК подсветки и регистрировалась эволюция во времени кривой $\sigma(\omega)$. Полученные результаты представлены на рис.2, кривые 1 - 3. Видно, что по мере увеличения экспозиции ИК излучения помимо общего увеличения проводимости на кривой $\sigma(\omega)$ появляется пик на частоте

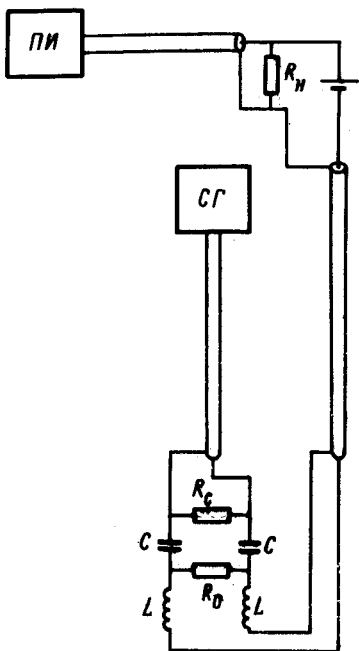


Рис.1

Рис. 1. Электрическая схема измерительной части установки. R_0 — образец; C , L , — согласующие конденсаторы и катушки индуктивности; R_C — согласующее сопротивление нагрузки; ПИ — панорамный индикатор; СГ — СВЧ свип-генератор.

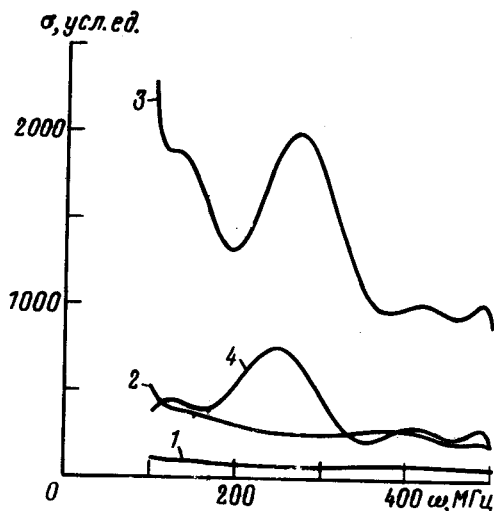


Рис.2

Рис. 2. Эволюция зависимости проводимости образца σ от частоты СВЧ накачки ω при увеличении экспозиции ИК подсветки (кривые 1 - 3) и после релаксации к метастабильному состоянию (кривая 4)

~ 280 МГц, форма которого не меняется в зависимости от скорости и способа сканирования частотой СВЧ накачки.

После выключения ИК подсветки проводимость сплава медленно релаксирует. Скорость этой релаксации существенно зависит от частоты СВЧ накачки: в области частот, соответствующем резонансу проводимости, она значительно ниже, чем вне этой области. В результате полуширина пика проводимости уменьшается, и может быть достигнуто состояние, при котором вне резонанса проводимость образца существенно ниже, чем в области пика (рис.2, кривая 4). Данное состояние является стабильным, т.е. оно воспроизводится при длительном выключении СВЧ накачки и повторном ее включении.

На скорость процесса релаксации влияют амплитуда и частота СВЧ накачки. Так, при остановке сканирования частотой в области пика - 280 МГц, скорость релаксации возрастает, увеличение амплитуды сигнала накачки приводит к тем же последствиям. Если же остановить частоту СВЧ вне пика, то накачка не оказывает заметного влияния на релаксацию вне зависимости от ее амплитуды.

Полученное метастабильное состояние образца является стартовым для последующих экспериментов. Если произвести дальнейшую ИК подсветку, то чувствительность проводимости в области пика на кривой $\sigma(\omega)$ к инфракрасному излучению оказывается существенно выше, чем для исходного темного состояния материала как в режиме сканирования частотой СВЧ от 0 до 600 МГц, так и при ее остановке в области резонанса. Проводимость образца в пике зависимости $\sigma(\omega)$ увеличивается на $10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ за время 10 с при температуре теплового источника ИК излучения $T^* = 75\text{K}$. Если же освещать образец, находящийся в темновом состоянии, то тот же рост проводимости в

течение заданной экспозиции происходит при величине $T^* = 90\text{K}$.

При введении магнитного поля $H < 0,1\text{ Т}$ амплитуда пика на частоте 280 МГц резко падает. По мере дальнейшего увеличения H пик сдвигается в область меньших ω . В поле $H = 4\text{ Т}$ он располагается уже на частоте 50 МГц . Если остановить развертку по ω в окрестности резонанса, то, в отличие ситуации в нулевом поле, проводимость сплава растет во времени.

Изменение величины питающего напряжения в цепи образца приводит к изменению амплитуды резонанса, но не сказывается на его частоте и ширине.

Энергия, соответствующая частоте СВЧ резонанса существенно меньше любых энергий, характеризующих данный материал, как то: ширина запрещенной зоны, примесная щель, энергия поперечного оптического фонона и др. Кроме того, значительный сдвиг частоты пика на кривой $\sigma(\omega)$ в магнитном поле свидетельствует о том, что за появление эффекта ответственны свойства самого образца, а не электрической цепи, в которую он включен.

Маловероятно, что резонанс связан с движением доменов сильного поля в образце. Действительно, в этом случае можно было бы ожидать сильной зависимости частоты резонанса от приложенного к образцу напряжения, что не наблюдается в эксперименте.

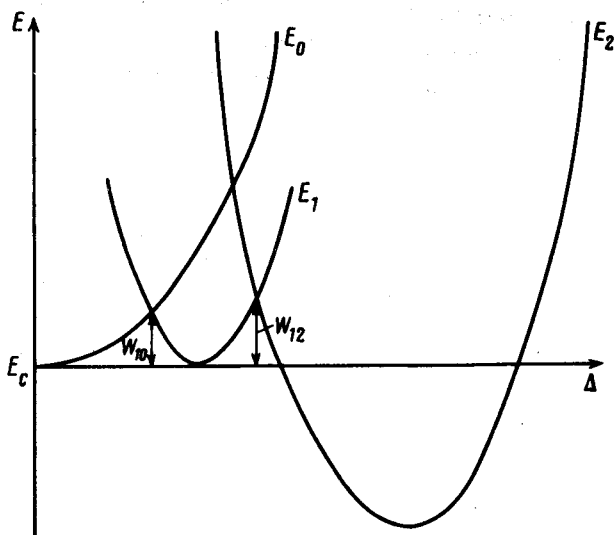


Рис.3. Конфигурационная диаграмма сплавов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$. Δ — конфигурационная координата, $E_{0,1,2}$ — кривые, соответствующие состояниям системы с 0, 1 и 2 локализованными электронами. W_{10} и W_{12} — барьеры, отделяющие одноэлектронное примесное состояние от состояния с делокализованным электроном и с двумя локализованными электронами, соответственно ⁴⁻⁶

По нашему мнению, описанный в настоящей работе СВЧ резонанс имеет общую природу с явлением СВЧ стимуляции фотопроводимости ³ и связан с релаксацией фотовозбужденных электронов в одноэлектронные метастабильные примесные состояния ⁴⁻⁶. Действительно, резонанс не наблюдается, если отсутствовало предварительное фотовозбуждение образца. Следовательно, происхождение эффекта обусловлено электронами, которые были генерированы ИК излучением, а затем локализовались на примесное состояние, отличное от основного. При подаче СВЧ накачки в определенном диапазоне частот барьеры W_{10} и W_{12} , отделяющие состояния E_1 от зонных и двухэлектронных, по-видимому, становятся резонансно-прозрачными (рис. 3). В результате, с одной стороны, при остановке развертки СВЧ в области пика резко ускоряется рекомбинация свободных электронов как в основное примесное, так и в метастабильное состояние. С другой стороны, практическое исчезновение

барьера W_{10} в данном диапазоне частот приводит к тому, что носители заряда, находящиеся в метастабильном состоянии, делокализуются и начинают принимать участие в проводимости. Когда же частота СВЧ выходит из области резонанса, эти электроны быстро локализируются обратно на одноэлектронные состояния.

Влияние магнитного поля на частоту пика проводимости также подтверждает высказанное предположение о природе резонанса. Действительно, как было показано в работе ⁵, взаимное расположение уровня E_1 и дна зоны проводимости, а, следовательно, высота и форма барьера W_{10} , сильно зависят от магнитного поля. С этой точки зрения вполне естественно, что положение резонанса определяется величиной H . С другой стороны, если бы эффект был обусловлен резонансным возбуждением колебаний решетки какого-то типа, то столь сильной зависимости частоты резонанса от поля было бы трудно ожидать.

-
1. Б.А.Акимов, Л.И.Рябова, С.М.Чудинов и др., ФТП 13, 752. (1979).
 2. В.А.Акимов, N.B.Brandt, S.O.Klimonskiĭ et al., Phys. Lett. A, 88, 483 (1982).
 3. В.А.Акимов, N.B.Brandt, S.N.Chesnokov et al., Materials Research Society Symposia Proceedings 1991, 216.
 4. И.И.Засавицкий, Б.Н.Мацонашвили, О.А.Панкратов и др., Письма в ЖЭТФ 42, 3 (1985).
 5. Б.А.Акимов, А.В.Никорич, Д.Р.Хохлов и др., ФТП, 23, 668 (1989).
 6. В.Н.Винчаков, В.И.Кайданов, С.Н.Лыков и др., Письма в ЖЭТФ 43, 384 (1986).