ЯВЛЕНИЕ ОБЪЕМНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ В n- InSb ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ЖИДКОГО АЗОТА

В.М.Афиногенов, А.М.Десятков, В.В.Мигулин, В.А.Попов, В.И.Трифонов, Н.Г.Яременко

При облучении образцов сурьмянистого индия n-типа, находящегося при температуре жидкого азота, электромагнитным излучением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, модулированным с частотой выше 1 *кгц*, обнаружено, что на контактах, припаянных к противоположным граням образца и лежащих в плоскости, параллельной облучае-

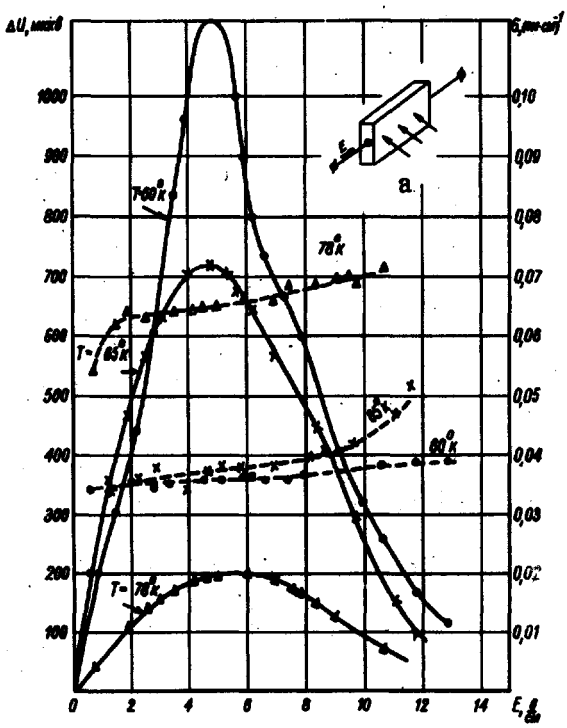

Рис.1. Зависимость отклика (сплошные кривые) и проводимости образца (пунктирные кривые) от напряженности поля смещения при температурах 78, 65, 60°K, размеры образца 7,25×2,75×1,25 *мм*, $n = 3{,}4 \cdot 10^{12}$ *см*$^{-3}$, $\mu = 1{,}2 \cdot 10^5$ *см*^{2}/*в·сек*

мой грани образца InSb (рис.1, *а*), возникает переменное напряжение, пропорциональное огибающей падающего на образец излучения. Величи-

на этого напряжения зависит также от величины постоянного поля смещения, прикладываемого к образцу. На рис.1 представлены кривые зависимости возникающего напряжения (отклика) и проводимости образца от напряженности поля смещения при трех температурах образца. Зависимость отклика от напряженности поля смещения имеет максимум, находящийся для разных образцов при смещениях от 2 до 30 *в/см*. Величина отклика в максимуме для лучших образцов характеризуется вольтваттной чувствительностью ~1 *в/вт* (в расчете на мощность падающего на образец излучения). С понижением температуры образца величина отклика растет и при температуре ~60°К превышает значение откли-

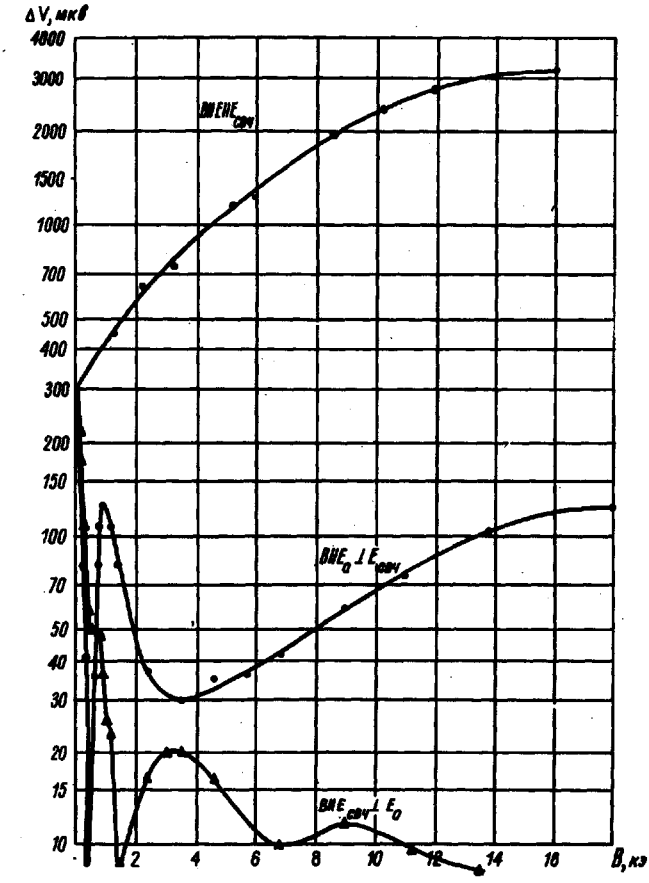

Рис.2. Зависимость отклика от магнитного поля при различных ориентациях полей B, E_0 и $E_\sim$, размеры образца 2,4×2,1×0,4 *мм*, $n = 2{,}5\cdot 10^{12}$ *см*$^{-3}$, $\mu = 3{,}1\cdot 10^{5}$ *см*^{2}/*в·сек*

ка при 78°К в 10-30 раз. При изучении спектральной характеристики явления детектирования не было обнаружено существенного изменения вольтваттной чувствительности в диапазоне волн от 10 до 0,8 *мм*. На ряде образцов отклик имел место и при отсутствии постоянного смещения, хотя при этом чувствительность составляла 10^{-4} – 10^{-3} *в/вт*.

Путем увеличения частоты амплитудной модуляции излучения исследовалась инерционность обнаруженного явления детектирования. Инерционность эффектов не наблюдалась вплоть до частоты модуляции 35 *Мгц*. На образце n –InSb при 78°К было получено смешение двух электромагнитных волн 8-*мм* диапазона и выделена промежуточная частота 2000 *Мгц*. Эти эксперименты указывают, что инерционность явления детектирования в n-InSb при 78°К не выше, чем 10^{-10} *сек*.

Обнаружена зависимость отклика от взаимной ориентации напряженности поля смещения E_0 и электрического вектора электромагнитной волны $E_\sim$. В случае, когда $E_0 \| E_\sim$, отклик в 1,3-2,5 раза больше, чем в случае, когда $E_0 \perp E_\sim$

Исследование влияния постоянного магнитного поля B на явление детектирования в n- InSb показало сильную зависимость отклика от величины магнитного поля и ориентации его по отношению к векторам E_0 и $E_\sim$. В случае, когда $B \| E_0 \| E_\sim$, отклик растет с увеличением магнитного поля (рис.2). Если же магнитное поле перпендикулярно E_0 или $E_\sim$, то с увеличением B отклик уменьшается до некоторой минимальной величины и далее осциллирует. Положение этого минимума зависит от длины волны излучения.

Используемые образцы сурьмянистого индия имели концентрацию свободных электронов $n \sim 10^{12} - 10^{13}$ *см*$^{-3}$ и подвижность $\mu \sim 1 \cdot 10^5 - 4{,}5 \cdot 10^5$ *см*^{2}/*в·сек*. Исследование нескольких образцов, о которых было известно, что они компенсированы германием, показало, что полная концентрация ионизованных примесей составляет $5 \cdot 10^{14} - 10^{16}$ *см*$^{-3}$. Отметим, что подвижность электронов в исследованных образцах InSb определяется рассеянием на ионизованных примесях; это, например, следует из рис.1. Если предположить, что отклик обусловлен изменением σ, то величина и полярность его определяется выражением:

$$\Delta V = -lE_0 \Delta\sigma/\sigma_0 , \qquad (1)$$

(l – длина образца). Измеренная полярность отклика совпадает с полярностью, определенной из (1).

Отклик в условиях описываемого опыта может быть обусловлен либо изменением подвижности электронов при нагреве их падающим излучением (механизм I), либо изменением концентрации электронов вследствии ионизации примесных атомов (механизм II). При этом одной из характерных черт наблюдаемого отклика является его зависимость от поляризации излучения. Как показано Ю.В.Гуляевым [1], в обоих этих механизмах такая зависимость может иметь место. Однако на основе механизма I не удается объяснить экспериментальные зависимости отклика от магнитного поля, например, в случае, когда $E_\sim \| E_0 \| B$. Кроме того, если считать, что $\sigma = \sigma_0 (1 + \beta E^2 + \gamma E^4)$ при $\beta > 0$, $\gamma > 0$, то функциональная зависимость отклика от E_0, которая следует из формулы (1) работы [1], не совпадает с экспериментально наблюдаемой.

Удовлетворительное объяснение обнаруженному явлению, по-видимому, можно дать на основе механизма II. При этом из-за небольшой энергии кванта СВЧ излучения миллиметрового диапазона фотоэффект может иметь место лишь с мелких уровней, на существование которых в n –InSb указывалось в работах [2,3]. Поскольку при азотных температурах в исследованных образцах $n << N_a < N_d$ (N_a, N_d – концентрации

донорной и акцепторной примеси) и вырождение отсутствует, то нетрудно получить, что концентрация электронов, находящихся на донорных уровнях, определяется выражением

$$n_{0d} \simeq (N_d - N_a)\left[1 + \frac{\beta N_c}{N_d} \exp\left(-\frac{\epsilon_d}{kT}\right)\right]^{-1}. \qquad (2)$$

Учитывая, что в InSb при 78°K $\beta N_c = 2{,}5 \cdot 10^{15}$ $см^{-3}$ и $\epsilon_a / kT \ll 1$, легко убедиться, что в использованных образцах число электронов на донорных уровнях одного порядка с числом электронов в зоне проводимости. Частичное перекрытие примесных состояний приведет к образованию примесной зоны, проводимость по которой, по-видимому, будет меньше, чем по зоне проводимости. Переход электронов в зону проводимости в результате фотоэффекта приведет к увеличению σ и появлению отклика. На основе механизма II в рассматриваемых образцах может быть удовлетворительно объяснена [1] зависимость фотоотклика от взаимной ориентации полей $E_\sim$ и E_0 и от величины E_0. Ввиду малой энергии связи электронов на примесных уровнях, уже очень небольшие магнитные поля будут сильно влиять на состояние электронов, что может объяснить наблюдаемые зависимости отклика от магнитного поля.

Авторы выражают благодарность Ю.В.Гуляеву за полезные обсуждения экспериментальных результатов и предоставление возможности ознакомления с работой [1] до ее опубликования и Л.Б.Безыменской, И.А.Долгих и В.С.Ивлевой за предоставленные образцы сурьмянистого индия.

Институт радиотехники
и электроники
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
29 декабря 1967 г.

Литература

[1] Ю.В.Гуляев. Письма ЖЭТФ, 7, 171, 1968.
[2] А.Н.Выставкин, В.Н.Губанков, В.Н.Листвин. ФТТ, 8, 443, 1966.
[3] H.Miyazawa, H.Ikoma. J.Phys. Soc. Japan, 23, № 2, 1967.