

О НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТАХ В n -InSb ПРИ 77°К В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

А. М. Беляицев, В. Н. Генкин, А. М. Леонов,
Б. А. Трифонов

Экспериментальное исследование нелинейных эффектов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн представляется весьма интересным для диагностики нелинейных свойств полупроводников, связанных с внутризонным движением носителей тока. В частности, исследуя степенную зависимость плотности тока от напряженности электрического поля $j(E) = \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_n E^n$, можно получить информацию о механизмах нелинейности, действующих в полупроводнике и о функции распределения носителей тока.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования нелинейных откликов в чистом монокристаллическом n -InSb ($n = 7,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\rho = 0,12 \text{ ом} \cdot \text{см}$) при температуре жидкого азота на комбинационных частотах $f = f_2 - mf_1$ (m – целые числа от 1 до 4). Блок-схема экспериментальной установки та же, что и в работе [1]. Частоты f_1 и f_2 менялись в широких пределах (f_1 от 75 до 225 ГГц, f_2 от 75 до 400 ГГц) и подбирались таким образом, чтобы комбинационная частота f равнялась 3 ГГц¹⁾. Сигнал на частоте f снимался с нагрузки, согласованной с исследуемым образцом, размеры которого

¹⁾ При исследовании инерционности механизмов нелинейности, обуславливающих смешение частот, частота f менялась от 3 ГГц до 150 мГц

$0,25 \times 0,24 \times 0,05 \text{ мм}^3$. Конструкция смесительного узла исключала возможность эффективного умножения частоты f_1 ; поэтому отклик на комбинационной частоте $f = f_2 - mf_1$ трактовался как обусловленный $(m + 1)$ и более высокими членами в разложении j по E . В эксперименте помимо мощности сигнала на комбинационной частоте \mathcal{P}_f измерялись мощности \mathcal{P}_{f_1} и \mathcal{P}_{f_2} на входе смесительного узла, сопротивление образца на постоянном токе $R(I)$ и ток I через образец. Поглощаемые в полупроводнике мощности на частотах f_1 и f_2 контролировались по изменению сопротивления образца на постоянном токе¹⁾ ($\Delta R_1(\mathcal{P}_{f_1}, I)$, $\Delta R_2(\mathcal{P}_{f_2}, I)$).

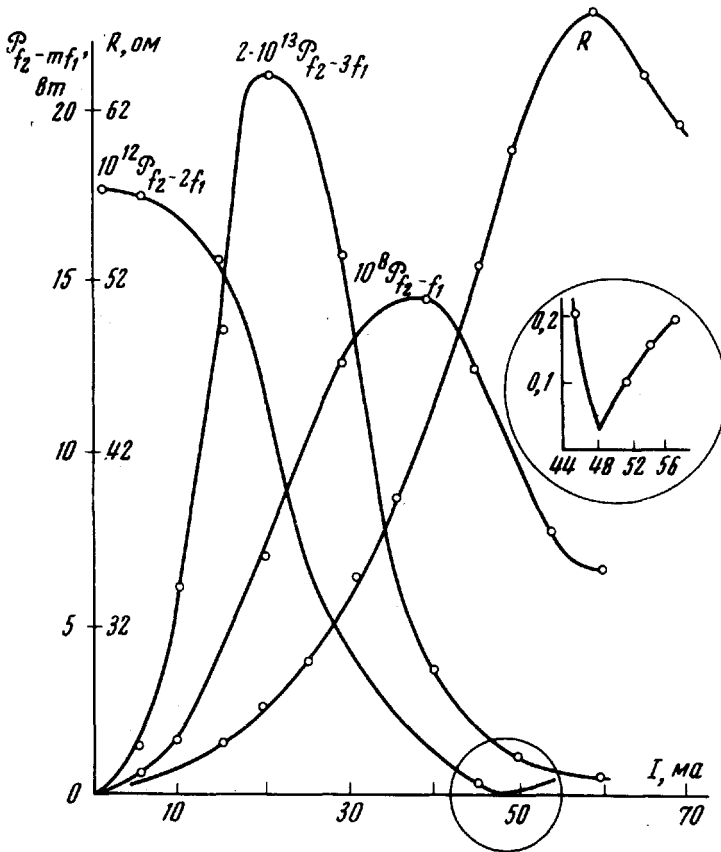


Рис. 1

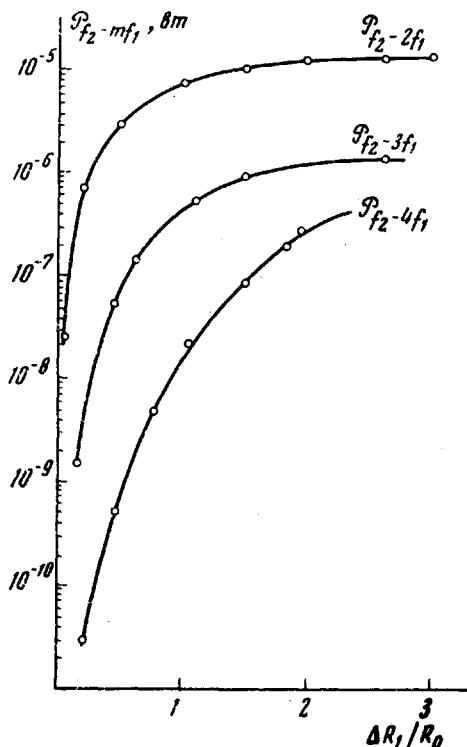
Прежде всего отметим, что нелинейный отклик на комбинационных частотах $f = f_2 - mf_1$ в случае четных m наблюдался при постоянном смещении и без него; в случае нечетных m только при постоянном смещении. Типичная зависимость мощности сигнала на комбинационной частоте $\mathcal{P}_{f_2 - mf_1}$ ($m = 1, 2, 3$) от тока I приведена на рис. 1. Изме-

¹⁾ $\Delta R_2(\mathcal{P}_{f_2}, I)$ измерялось лишь при $75 \text{ Гц} \leq f_2 \leq 300 \text{ Гц}$, тогда как $\Delta R_1(\mathcal{P}_{f_2}, I)$ во всем интервале изменения f_1 .

рения велись при фиксированных мощностях \mathcal{P}_{f_1} и \mathcal{P}_{f_2} , уровень мощности подбирался по одинаковому приращению ΔR_i при токе $I_1 = 5 \text{ ма}$ ($\Delta R_1(\mathcal{P}_{f_1}, I_1) = \Delta R_2(\mathcal{P}_{f_2}, I_1) = 10^{-2} R_0$, R_0 — сопротивление при "нулевом" токе и $\mathcal{P}_{f_1} = \mathcal{P}_{f_2} = 0$). На рис. 2 приведены данные измерения $\mathcal{P}_{f_2 - mf_1}$ ($m = 2, 3, 4$) при $I = I_1$ и фиксированной мощности \mathcal{P}_{f_2} ($\Delta R_2(\mathcal{P}_{f_2}, I_1) = 10^{-2} R_0$) для различных значений \mathcal{P}_{f_1} ($\Delta R_1(\mathcal{P}_{f_1}, I_1)$). Заметим, что пока $\Delta R_i \ll R_0$, изменение сопротивления хорошо аппроксимировалось выражением $\Delta R_i(\mathcal{P}_{f_i}, I) =$

$$= k \mathcal{P}_{f_i} \left. \frac{\partial R(I^2 R)}{\partial (I^2 R)} \right|_{I = \text{const}}, \text{ где } k \text{ — коэффициент, зависящий только}$$

от частоты f_i ¹⁾. Из графиков рис. 1 видно, что на начальном участке $\mathcal{P}_{f_2 - f_1}$ и $\mathcal{P}_{f_2 - 3f_1}$ пропорциональны I^2 , а $\mathcal{P}_{f_2 - 2f_1}$ практически не меняется с ростом I ; при малых \mathcal{P}_{f_1} ($\Delta R_1/R_0 \ll 1$) $\mathcal{P}_{f_2 - mf_1}$ пропорционально $\mathcal{P}_{f_1}^m$ (или ΔR_1^m см. рис. 2). Отношение $\mathcal{P}_{f_2 - mf_1} / \mathcal{P}_{f_2}$ не зависит от \mathcal{P}_{f_2} , если $\Delta R_2(\mathcal{P}_{f_2}, I) \ll R_0$. Таким образом, при небольших токах и мощностях ($\Delta R_i \ll R_0$) отклик на комбинационной частоте $f = f_2 - mf_1$ определяется в основном $(m + 1)$ членом разложения i по E при четных m и $(m + 2)$ членом при нечетных m .



1) Если сопротивление определяется только поглощенной мощностью, то k является коэффициентом поглощения высокочастотной мощности.

При $I \gg I_1$ и $\Delta R_1 \sim R_0$ отмеченные выше пропорциональности нарушаются. Это может быть связано с ростом потерь¹⁾, либо с увеличением вклада в отклик на комбинационной частоте нелинейностей более высокого порядка. На соизмеримость и противофазность вклада нелинейностей пятого и третьего порядков в токе на комбинационной частоте $f_2 - 2f_1$, указывает наличие "минимума" у функции $\mathcal{P}_{f_2-2f_1}$ (см. рис. 1). Минимум наблюдается при небольших мощностях \mathcal{P}_{f_1} ($\Delta R_1 \ll R_0$), но при относительно сильном постоянном поле; постоянный ток I_2 , при котором отклик был минимальным, равен 48 μa ($i_2 = 400 \text{ a/cm}^2$). Эта величина тока практически не менялась при изменении f_1 и f_2 в широких пределах (при $f_2 - 2f_1 = \text{const}$). На рис. 1 приведена и зависимость R от I . Резкое падение R соответствует пробое (росту концентрации носителей), он происходит в $n\text{-InSb}$ при 77°K в постоянном поле $E_2 = 160 \text{ в/см}$. При этом предпробойное значение $\Delta R/R_0 = (R(I) - R_0)/R_0 = 2$. В высокочастотном поле ($f_1 = 75 \text{ Гц}$) также наблюдается пробой, однако, предпробойное значение отношения $\Delta R_1/R_0$ (измеряемое при слабом постоянном токе) равно 3,5, т. е. почти в два раза больше, чем в постоянном поле.

Качественно ход $\mathcal{P}_{f_2-mf_1}$ от I (рис. 1) и $\mathcal{P}_{f_2-mf_1}$ от \mathcal{P}_{f_1} (точнее от ΔR_1 , рис. 2) можно объяснить как в рамках модели [1], основанной на неквадратичности закона дисперсии, так и с помощью модели [2], построенной на изменении эффективной частоты столкновений ν от поля. Однако, наблюдаемый в эксперименте нелинейный отклик $\mathcal{P}_{f_2-mf_1}$ несколько больше (хотя и одного порядка) максимально возможного в модели, основанной на неквадратичности закона дисперсии; к тому же расчет дает плотность тока, при которой $\mathcal{P}_{f_2-2f_1}$ обращается в нуль, примерно в два раза большую, чем i_2 . По-видимому, на комбинационных частотах $f = f_2 - mf_1 \ll \nu/2\pi$, а это условие выполнялось в эксперименте, нелинейный отклик в $n\text{-InSb}$ при 77°K определяется в основном изменением эффективной частоты столкновений от поля. В этом случае минимум $\mathcal{P}_{f_2-2f_1}$ при некотором постоянном поле предсказывался в [3] и связывался с сильной анизотропией функции распределения, которая приводит, в частности, к тому, что нелинейный отклик определяется зависимостью ν от средней скорости носителей тока. В $n\text{-InSb}$ при 77°K в присутствии сильного постоянного электрического поля функция распределения становится анизотропной в пространстве импульсов из-за неупругого рассеяния носителей на оптических фононах. Хотя точный расчет этой модели не делался, грубые оценки дают значение отклика $\mathcal{P}_{f_2-mf_1}$ близкое к экспериментальному. В этой модели можно также объяснить и разницу в $\Delta R(I)$ и $\Delta R_1(\mathcal{P}_{f_1}, I_1)$ при пробое, если предположить, что пробой

¹⁾ Разогрев решетки полупроводника практически отсутствовал. На это указывает одинаковый ход $R(I)$ и $\mathcal{P}_{f_2-f_1}(I)$ при ($\Delta R_1 \ll R_0$) в непрерывном режиме и режиме микросекунд импульсов тока с большой скважностью.

определяется только поглощенной в образце мощностью. Для этого достаточно учесть, что $\Delta R(l)$ определяется сомовоздействием, а $\Delta R_1(\mathcal{P}_{f_1}, l_1)$ воздействием.

В заключение отметим, что чистый n -InSb при 77°K представляется перспективным материалом для смесителей миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Две наиболее интересные характеристики смесителя – коэффициент преобразования $\eta_{f_2 - mf_1} = \frac{\mathcal{P}_{f_2 - mf_1}}{\mathcal{P}_{f_2}}$ (\mathcal{P}_{f_2} – мощность на частоте f_2 , поглощенная в образце ¹⁾) и инерционность исследовались экспериментально. Максимальный коэффициент преобразования при четных $m = 2, 4$ достигается, когда постоянное поле равно нулю, $\eta_{f_2 - 2f_1}^{max} \approx 2 \cdot 10^{-2}$, а $\eta_{f_2 - 4f_1}^{max} \approx 10^{-3}$; при нечетных $m - \eta_{f_2 - f_1}^{max} \approx 5 \cdot 10^{-2}$ при $l = 35$ мк и $\Delta R_1/R_0 = 1,3$, $\eta_{f_2 - 3f_1}^{max} \approx 10^{-2}$ при $l = 15$ мк и $\Delta R_1/R_0 = 2,2$. Уменьшение комбинационной частоты f от 3 Гц до 150 МГц практически не меняло коэффициент преобразования, следовательно, инерционность смешения частот в n -InSb при 77°K (см. также [4]) не более 10^{-10} сек.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
8 октября 1973 г.

Литература

- [1] А.М.Белянцев, В.А.Валов, В.Н.Генкин, А.М. Леонов, Б.А.Трифонов. ЖЭТФ, 61, 886, 1971.
- [2] А.М. Belyantsev, V.A.Kozlov, B.A.Trifonov. Phys. stat. sol(b) 48, 581, 1971.
- [3] L.Stenflo. Phys. Rev., 1, 2821, 1970.
- [4] В.М.Афиногенов, А.М.Десятков, В.В.Мигулин, В.А.Попов, В.И.Трифонов, И.Я.Яременко. Письма в ЖЭТФ, 7, 168, 1968.

¹⁾ Для оценки \mathcal{P}_{f_2} при определении η использовалась зависимость R от l (рис. 1) и предполагалось, что сопротивление образца в основном функция поглощаемой мощности.