

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ С ГОРЯЧИМИ НОСИТЕЛЯМИ

Н.И. Иванов, Т.Н. Курская, И.В. Мищенко  
(Академия гражданской защиты Украины, Харьков)

*В статье исследованы основные характеристики точечных детекторов электромагнитного излучения. Определены вольтваттная, пороговая чувствительность и влияние температуры на основные параметры детекторов слабых тепловых сигналов мм и субмиллиметрового диапазонов длин волн.*

***приемники прямого видеодетектирования, детекторы с горячими носителями, вольтваттная чувствительность***

**Постановка проблемы.** Развитие научных исследований и технических применений аппаратуры миллиметрового диапазона связано с успехами в области разработок приемников электромагнитного излучения. Повышенная потребность в высокочувствительных приемниках сигналов миллиметрового диапазона стимулирует исследования, направленные на создание мало шумящих детекторов миллиметрового излучения на основе криогенной электроники. Так, например, для решения многих задач в метрологии и диагностике плазмы необходимы приемники прямого видеодетектирования входных сигналов миллиметровых длин волн с чувствительностью  $\sim 10^{-12} - 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> и инерционностью  $\tau < 10^{-5}$  с.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Все неохлаждаемые приемники такого типа ограничены тепловыми флуктуациями по чувствительности и уже не играют сколько-нибудь серьезной роли при создании высокочувствительной измерительной аппаратуры. Для детектирования электромагнитных сигналов на уровне  $10^{-12} - 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> могут быть использованы различные явления в слабо связанных сверхпроводниках и полупроводниках при глубоком охлаждении: в сверхпроводниках – возникновение сопротивления в образце, находящемся в сверхпроводящем состоянии при нагревании его падающим электромагнитным излучением; взаимодействие сигнала с джозефсоновскими переходами и взаимодействие излучения с решеткой и носителями заряда в полупроводнике – термоэлектрический эффект (разогрев носителей или решетки) и фотовольтаический эффект [1, 2].

**Постановка задачи и ее решение.** При выполнении работы по данной теме исследовались параметры детекторов с горячими носителями, которые в настоящее время являются основой для разработки высокочувствительных приемников электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Существует два типа стабильных мало шумящих глубоко охлаждаемых детекторов электромагнитного излучения на основе полупроводников с горячими носителями: диоды с точечным контактом металл-полупроводник и диоды, использующие нелинейные объемные свойства полупроводников при низких температурах. Используемые в этих приборах нелинейные явления основаны на изменении проводимости образцов под действием излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. В точечных детекторах с неинжектирующим контактом неоднородный нагрев основных носителей, вызываемый электрической составляющей электромагнитного излучения, приводит к возникновению термо-э.д.с., пропорциональной детектируемой мощности. В объемных детекторах поглощение энергии приводит к повышению эффективной температуры свободных электронов, имеющих повышенную подвижность и оказывающих влияние на нормальное и дифференциальное сопротивление образцов. Согласно [1], вольтамперная характеристика диодов с горячими носителями, у которых неоднородный разогрев последних происходит вследствие неоднородного распределения электрического поля вблизи полусферического электронно-электронного перехода малой площади, в режиме малых сигналов может быть представлена в виде полинома третьей степени:

$$I = aU + bU^2 + cU^3, \quad (1)$$

где коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определяются параметрами полупроводника и конструкцией прибора:

$$a = R_0^{-1}; \quad b = 2\beta\alpha T_0 / R_0 \cdot i^2 = S_u R_0^{-2}; \quad c = -\beta/5 \cdot R_0 i^2 = -S_R R^{-3}.$$

В этих обозначениях  $R_0 = \rho / (2\pi r)$  – сопротивление прибора с полусферическим электронно-электронным  $n^+ - n$  переходом радиусом  $r$ , изготовленного на основе материала с удельным сопротивлением  $\rho$  в отсутствие разогрева носителей;  $\alpha$  – разность дифференциальных термо-э.д.с. горячих носителей в слабо и сильно легированной областях перехода;  $\beta$  – коэффициент, определяющий полевую зависимость подвижности носителей в слабых полях в соответствии с соотношением  $\mu(E) = \mu_0(1 - \beta E^2)$ ;  $T_0$  – температура кристалла;  $S_u$  – вольтваттная чувствительность, а  $S_R$  – омваттная чувствительность детектора. Для нелинейных элементов на основе объемных полупроводников изменение их проводимости, обусловленное горячими носителями, можно записать в виде

$$\sigma = \sigma_0(1 + \gamma U^2), \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – проводимость образца при равенстве температуры носителей и температуры решетки; коэффициент  $\gamma$  характеризует нелинейные свойства образца и детектирующую способность.

Температурная зависимость нелинейных и энергетических свойств детекторов на горячих носителях является естественным следствием того, что от температуры полупроводника зависят концентрация и подвижность носителей, время релаксации, флуктуации и т.д., что следует из выражений (1) и (2). Эти выражения позволяют определить пороговое значение мощности детектируемого сигнала  $P_n$  и флуктуационную температурную (тепловую) чувствительность  $\Delta T_n$  радиометра прямого детектирования на основе детектора с горячими носителями:

$$P_n = \frac{(4F\kappa\kappa_1\Delta f)^{1/2}}{\varepsilon S}; \quad (3)$$

$$\Delta T_n = \frac{(4FT_1R_1\Delta f)}{\kappa^{1/2}\varepsilon S\Delta\omega}, \quad (4)$$

где  $F$ ,  $T$ ,  $R_1$  и  $\Delta f$  – соответственно коэффициент шума, физическая температура входного импеданса, активная часть входного импеданса и полоса пропускания усилителя радиометра;  $\Delta\omega$  – полоса спектра детектируемого сигнала;  $\varepsilon$  – безразмерный коэффициент, характеризующий степень согласования детектора с электродинамической системой. В случае, когда мощность электромагнитного сигнала полностью поглощается детектором, коэффициент  $\varepsilon$  равен единице.

Из выражений (1) – (4) следуют зависимости параметров  $S_u$ ,  $P_n$ ,  $\Delta T_n$  от  $T$ , однако определить их аналитически в общем виде очень сложно. Эксперименты по температурной зависимости этих параметров проводились с точечными приборами. Детекторы с горячими носителями были изготовлены на основе германия и сурьмянистого индия. Для создания электронно-электронного перехода малой площади использовалась нелегированная золотая проволочка, которая в месте контакта с полупроводником имела  $\dot{r} \sim (1-2) \cdot 10^{-6}$  м, диоды монтировались в волноводные вставки. Для эксперимента отбирались детекторы, имеющие при комнатной температуре активное сопротивление  $R_0 \sim 0,1-10$  Ом. Суммарная емкость детектора была не более  $10^{-12}$  Ф. Поскольку изменение температуры влияет на величину  $R_0$ , для температурного анализа работы детекторов на горячих носителях важно выполнить согласование детектора с источником сигнала и усилителей низкой частоты схемы измерения параметров  $S_u$ ,  $P_n$ ,  $\Delta T_n$ . Для того, чтобы реализовать условия, при которых  $\varepsilon \sim 1$ , применялись детекторные секции, имеющие коэффициент стоячей волны 1,5 на частотах 100 и 150 ГГц при

$R_0 = 20, 300$  и  $500$  Ом. В экспериментах по определению вольтваттной чувствительности детекторов уровень мощности детектируемого сигнала поддерживался постоянным в пределах  $10^{-10}$  Вт. В качестве селективного вольтметра использован стандартный усилитель типа «Унипан». Измерения зависимости  $S_u$  от  $T$  представлены на рис. 1.

Как и ожидалось, с уменьшением  $T$  величина  $S$  увеличивалась для всех образцов. Заметим, что изломы «прямых» характеризующих влияние  $T$  на величину параметра  $S$ , связаны как с вымораживанием носителей, так и с изменением времени релаксации  $\tau$ , зависящим от температуры решетки полупроводника. Максимальные значения  $S$ , наблюдаемые при температуре жидкого азота были порядка  $10^4$  В/Вт, а при температуре жидкого гелия  $\sim 10^5$  В/Вт на частоте 120-150 ГГц. Вольт ваттная чувствительность детекторов была одинаковой для узкополосного и широкополосного сигналов.

**Вывод.** Разработанные высокочувствительные радиометрические устройства на основе точечных детекторов с горячими носителями могут быть использованы для различных радиофизических исследований и применений.

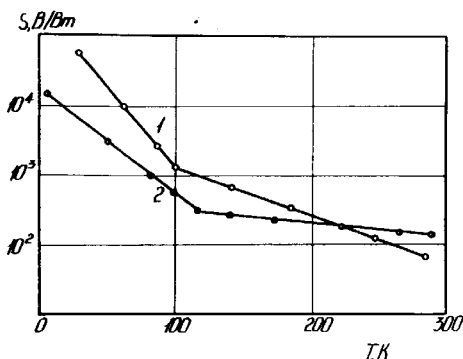


Рис. 1. Зависимость вольтваттной чувствительности детектора на горячих носителях от температуры: 1 – InSb; 2 – Ge

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Н.И. *Высокочувствительные приемники миллиметрового диапазона // Микроэлектроника.* – 1988. – № 5. – С. 112-117.
2. Иванов Н.И., Иванова Е.П., Балаклеяский А.В. *Малошумящие детекторы миллиметрового диапазона для дистанционного обнаружения разливов нефти // Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр.* – Х.: ХИПБ МВС Украины, 1999. – Вып. 5. – С. 106-109.

Поступила 19.01.2006

**Рецензент:** доктор физико-математических наук А.П. Созник,  
Академия гражданской защиты Украины, Харьков.