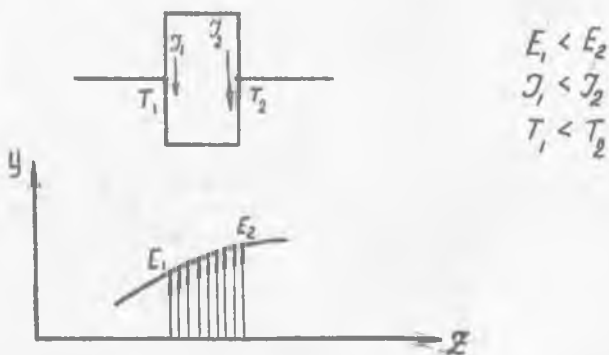


В. В. ПАХОМОВ, И. ФЕДОРОВА,
В. А. МОРОЗОВ, В. Г. ЭТЕНКО

К ВОПРОСУ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕРМО-ЭДС НА ДАТЧИКЕ ХОЛЛА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МОЩНОСТИ СВЧ

Идея применения эффекта Холла в полупроводниках для измерения активной проходящей мощности СВЧ была высказана в 1955 г. [1] и в дальнейшем исследователи неоднократно возвращались к попытке технического воплощения данной идеи в различных конструкциях СВЧ ваттметров [2, 3, 4].

Сложным вопросом, с которым пришлось столкнуться разработчикам СВЧ ваттметров, является выделение эффекта Холла из других сопутствующих ему эффектов. Наиболее трудно отделимой от ЭДС Холла является термо-ЭДС.



$$\begin{aligned} E_1 &< E_2 \\ J_1 &< J_2 \\ T_1 &< T_2 \end{aligned}$$

Рис. 1. Распределение токов смещения в датчике Холла

В датчике Холла, помещенном в волноводный тракт, имеющий КСВН отличный от единицы, величина амплитуды напряженности электрического поля различна у противоположных граней датчика (рис. 1), следовательно, различны и токи, текущие вдоль этих граней. Это приводит к неравномерному распределению джоулева тепла в датчике и возникновению поперечного градиента температуры [3].

При наличии градиента температуры между холловскими контактами, на выходе датчика, кроме ЭДС Холла появится термо-ЭДС U_T , определяемая следующим выражением [5]

$$U_T = \alpha_T \Delta T, \quad (1)$$

где α_T — коэффициент термо-ЭДС, *в/град*;

ΔT — перепад температуры между холловскими контактами, *град*.

В общем случае в линии существует режим смешанных волн, и распределение токов по сечению датчика определяется выражением

$$I(z) = I_0 \sin \beta z = \frac{E_0 d}{R} \sin \beta z, \quad (2)$$

где I_0 — амплитудное значение тока, *а*;

d — размер датчика, *м*;

R — сопротивление датчика, *ом*.

Учитывая, что $R = \rho \frac{d}{st}$, значение тепловой мощности, рассеиваемой в датчике Холла, определится

$$P(z) = \frac{E_0^2}{2\rho} d s t \cdot \sin^2 \beta z, \quad (3)$$

где d, s, t — размеры датчика, *м*;

ρ — удельное сопротивление материала датчика, *ом·м*;

β — постоянная распространения.

Выражая мощность тепловых потерь в датчике через падающую мощность $P_{пад}$ и коэффициент отражения k , получим

$$P(z) = \left(2 \frac{k-1}{k+1}\right)^2 \frac{P_{пад} \cdot z \cdot b}{a \cdot b} \cdot \frac{d \cdot s \cdot t}{\rho} \sin^2 \beta z, \quad (4)$$

где a, b — размеры волновода, *м*.

Поперечный градиент температуры определяется путем решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье для системы с источниками энергии в стационарном режиме $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0\right)$ [6]

$$\frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{1}{\lambda_T} q(z) = 0. \quad (5)$$

Задача рассматривается одномерная $\left(\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0\right)$, т. к. толщина датчика весьма мала, а продольный градиент $\frac{\partial T}{\partial y}$ мало влияет на поперечную термо-ЭДС [5].

Предполагая, что датчик Холла используется для измерения малых уровней мощности, нагрев его мал и теплообменом за счет излучения можно пренебречь. В этом случае удобно воспользоваться граничными условиями третьего рода

$$\alpha = (T_1 - T_c) = \lambda_T \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0}; \quad \alpha (T_2 - T_c) = -\lambda_T \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=s}, \quad (6)$$

где α — конвективный коэффициент теплообмена $вт/м^2град$;
 S — поперечный размер датчика, $м$;
 T_1 — температура грани, соответствующая $Z=0$, $град. С$;
 T_2 — температура грани, соответствующая $Z=S$, $град. С$;
 T_c — температура окружающей среды, $град. С$.
 В результате решения уравнения (5) получено

$$\Delta T = \frac{1}{\frac{\alpha S}{\lambda_T} + 2} \left[S \int_0^S \frac{q(z)}{\lambda_T} dS - 2 \int_0^S \int_0^z \frac{q(z)}{\lambda_T} dz dz \right]. \quad (7)$$

Значение термо-ЭДС определяется выражением:

$$U_T = \frac{\alpha_T}{\frac{\alpha S}{\lambda_T} + 2} \left[S \int_0^S \frac{q(z)}{\lambda_T} dz - 2 \int_0^S \int_0^z \frac{q(z)}{\lambda_T} dz dz \right]. \quad (8)$$

Выражение для удельной мощности источника энергии в преобразователе Холла имеет вид:

$$q(z) = \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 \frac{4P_{пад} \rho \cdot b}{a (St)^2 z^2 g} \cdot 120\pi \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_B}{2a} \right)^2 \sin^2 \beta z}, \quad (9)$$

где k — коэффициент стоячей волны;
 $P_{пад}$ — падающая мощность, $вт$;
 Z_d — сопротивление датчика на СВЧ, $ом$;
 λ_B — длина волны в волноводе, $м$.

С учетом (9) значения интегралов

$$S \int_0^S \frac{q(z)}{\lambda_T} dz \text{ и } 2 \int_0^S \int_0^z \frac{q(z)}{\lambda_T} dz dz \quad (10)$$

получено выражение для термо-ЭДС в датчике Холла

$$U_T = \frac{48 \cdot P_{пад} \alpha_T b}{\alpha \cdot a (st)^2 z^2 g \lambda_T} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2 \lambda_B \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_B}{2a} \right)^2} \times \\ \times \left\{ \sin \frac{2\pi}{\lambda_B} S \left[\frac{\lambda_B}{2\pi} \sin \frac{4\pi}{\lambda_B} X_0 - S \cos \frac{4\pi}{\lambda_B} z_0 \right] - \right. \\ \left. - S \sin \frac{4\pi}{\lambda_B} \left(z_0 - \frac{S}{2} \right) \right\}. \quad (11)$$

Расчет значений термо-ЭДС был произведен для датчика Холла из антимонида индия, помещенного в волноводный тракт сечением 10×23 $мм$.

Параметры датчика:

$$\begin{aligned} d &= 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} & \rho &= 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ ом} \cdot \text{м}; \\ S &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} & \lambda_T &= 62,8 \text{ вт/м} \cdot \text{град}; \\ t &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} & \alpha_T &= 210 \text{ мкв/град}. \end{aligned}$$

Результаты расчета приведены в виде графиков на рис. 3, 4.

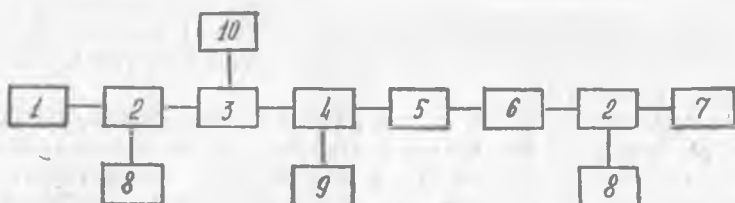


Рис. 2. Блок-схема установки:

1 — генератор ГЗ-14А; 2 — направленный ответвитель 25 дБ; 3 — измерительная линия ИВЛ-140; 4 — измерительная головка с датчиком Холла; 5 — волноводные отрезки различной длины; 6 — реактивная нагрузка; 7 — согласованная нагрузка; 8 — измеритель мощности М4-1; 9 — микрольтметр постоянного напряжения В2-15; 10 — измерительный усилитель У4-2.

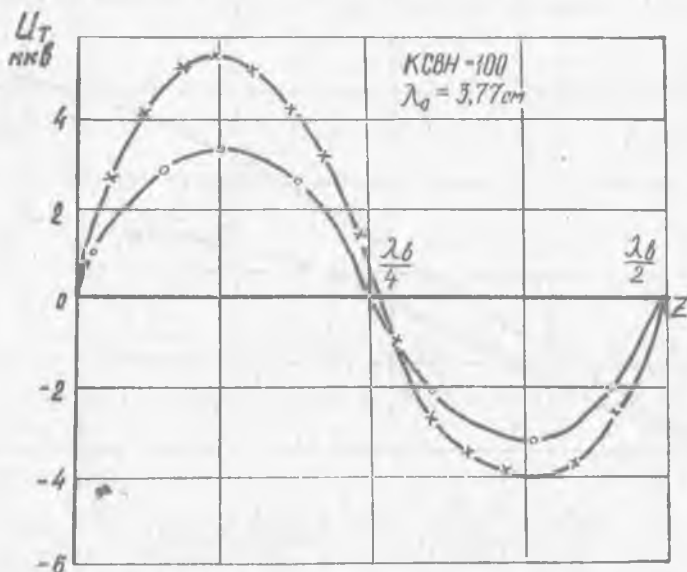


Рис. 3. Зависимость термо-ЭДС от положения короткозамыкающего поршня.

—○—○— расчетная зависимость;
—×—×— экспериментальная зависимость.

Экспериментальные исследования термо-ЭДС проводились по блок-схеме, показанной на рис. 2. Величина КСВН линии изменялась путем введения в линию передачи металлического штыря.

Определение термо-ЭДС осуществлялось по следующей методике. При полном согласовании нагрузки с генератором, т. е. когда КСВН линии равно 1,00, термо-ЭДС на выходе датчика отсутствует. Составляющая выпрямления определяется по методике, указанной в (3).

При изменении КСВН линии датчик Холла устанавливается в узел E стоячей волны. В этом положении датчика определяются холловская составляющая U_x и напряжение выпрямления U_v . Затем датчик перемещается на $\lambda_v/4$ и определяется максимальное значение термо-ЭДС U_T . Результаты экспериментов приведены на рис. 5.

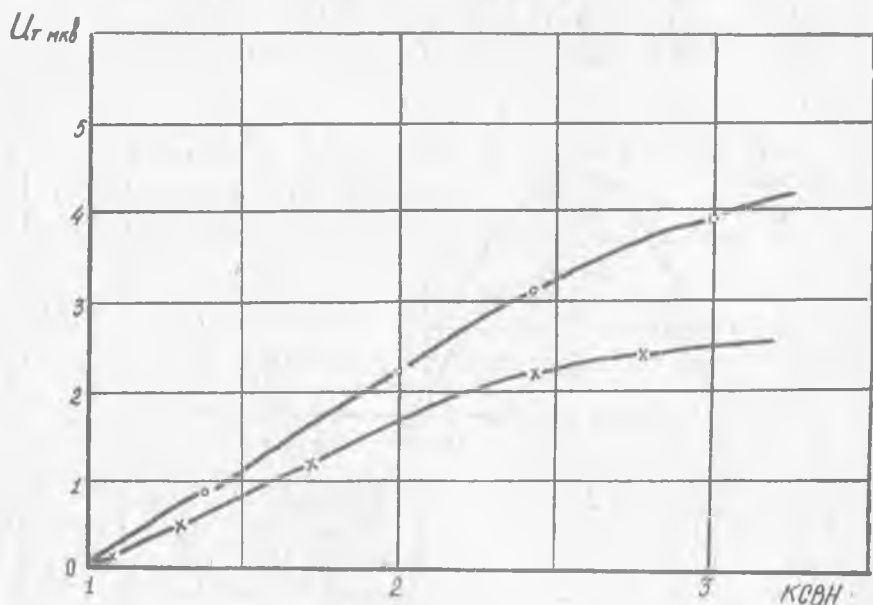


Рис. 4. Влияние КСВН на величину термо-ЭДС:

—○—○— расчетная зависимость;
—○—○— экспериментальная зависимость;

Результаты проведенной работы позволяют сделать следующие выводы:

1. Напряжение Холла не зависит от КСВН линии передачи.
2. При перемещении датчика вдоль стоячей волны термо-ЭДС изменяется с удвоенной частотой.

3. При значительных рассогласованиях линии передачи в выходном сигнале датчика появляется составляющая термо-ЭДС, которая по величине может превосходить напряжение Холла.

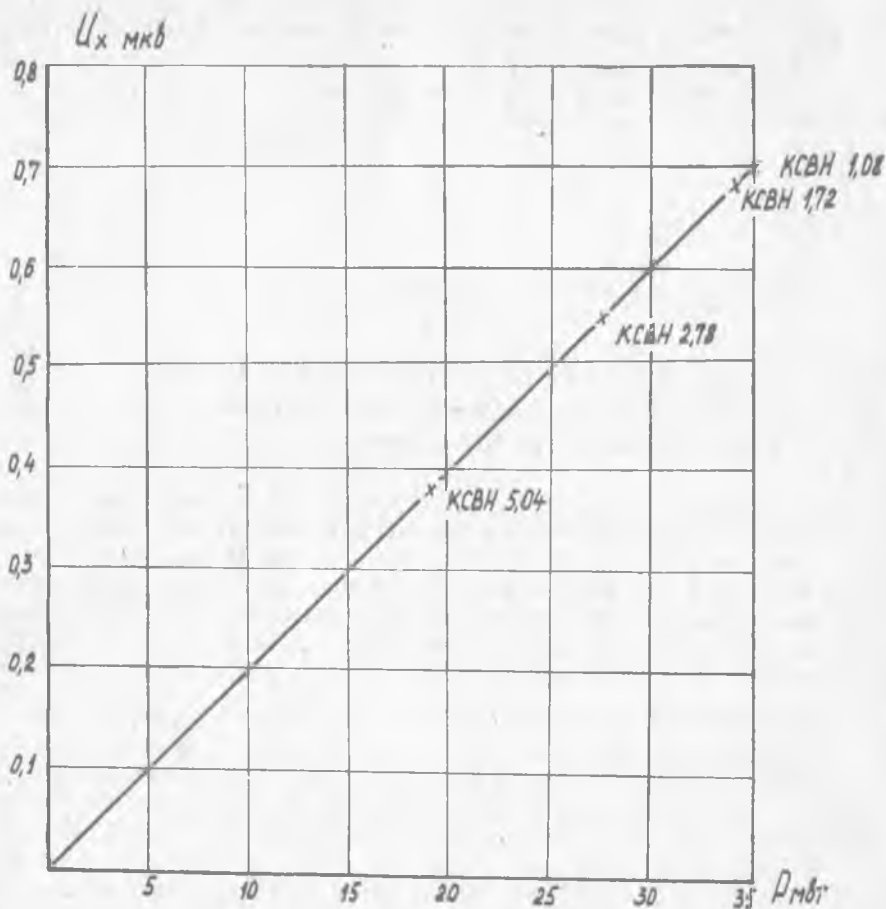


Рис. 5. Зависимость напряжения Холла от поглощенной мощности при изменении КСВН линии передачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barlow H. E. M. The application of the Hall effect in a semiconductor to the measurement of power in an electromagnetic field—Proc. Instn Electr. Engrs, B, 1955.
2. Barlow H. E. M. and Kataoka S. The Hall effect and its application to power measurement at 10 Gc/S. Proc. Instn Electr. Engrs, B, 1958.
3. Rugari A. D. For microwaves a Hall effect power meter. Electr. Inds, 1962.
4. Скорик Е. Т. К использованию эффекта Холла в полупроводниках для измерения мощности в электромагнитном поле. Изв. Киев. политех. ин-та, 1956.
5. Шалабутов Ю. К. Введение в физику полупроводников. Изд. «Мир», М., 1969.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности, изд. «Высшая школа», М. 1967.