

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.566

Г. И. АХАПКИН, А. В. КОЗАРЬ, Ю. А. ПИРОГОВ, А. Н. САНДАЛОВ

### СВЧ-ОТКЛИК ДВОЙНОГО ВОЛНОВОДНОГО Т-МОСТА НА ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ И ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СЛОЯ

При изучении электрических свойств полупроводников и диэлектриков широко применяются бесконтактные СВЧ-методы измерений, среди которых балансный метод двойного Т-моста особенно удобен. Он позволяет с высокой точностью измерять не только абсолютные значения действительной и мнимой частей диэлектрической прони-

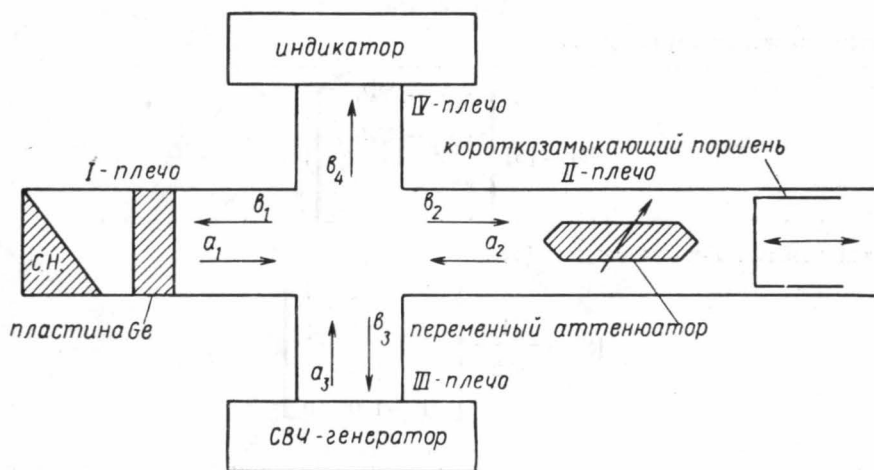


Рис. 1

цаемости материалов типа «диэлектрик с потерями» [1], но и малые изменения этих величин.

В данном сообщении рассматривается, в частности, отклик сбалансированного двойного тройника на изменения удельной проводимости плоскопараллельной полупроводниковой пластинки Ge конечной толщины (СВЧ-свойства такой пластинки описаны в [1]).

Если отражения СВЧ-волны от полупроводниковой пластинки, целиком заполняющей поперечное сечение волновода, скомпенсированы с помощью переменной нагрузки во II плече (рис. 1), то, как известно, в индикаторное плечо IV СВЧ-сигнал опорного генератора III не проходит. При изменении проводимости полупроводника

(за счет протекания тока в пластине, изменения температуры среды и т. п.) будет меняться мнимая часть диэлектрической проницаемости образца, а следовательно, модуль  $|\Gamma|$  и фаза  $\varphi$  коэффициента отражения волны от пластины I. Это приведет к разбалансу моста и появлению в плече IV СВЧ-сигнала. Найдем зависимость мощности этого сигнала от изменений проводимости образца для разных значений его толщины и постоянной составляющей удельной проводимости. Полагая индикатор IV согласованным с волноводным трактом и считая двойной T-мост взаимным, пространственно симметричным устройством без потерь, можно в соответствии с рис. 1 записать для нормированных амплитуд  $a_i$  ( $i=1, 2, 4$ ) следующие соотношения:

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1 \Gamma_1 e^{-j2\beta_0 l_1}, \\ a_2 &= b_2 \Gamma_2 e^{-j2\beta_0 l_2} = -b_2 \frac{1}{n} e^{-j2\beta_0 l_2}, \\ a_4 &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $1 \leq n < \infty$  — затухание, вносимое аттенуатором компенсационной нагрузки,  $\Gamma_2 = |\Gamma_2| e^{j\varphi_2} = -|\Gamma_2|$  (фаза волны, отраженной от короткозамыкающего поршня,  $\varphi_2 = \pi$ );  $\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_B}$ ;  $\lambda_B$  — длина волны в волноводе;  $l_1$  — расстояние от нагрузки в плече I до оси симметрии двойного T-моста;  $l_2$  — расстояние от короткозамыкающего поршня в плече II до оси симметрии двойного T-моста. Амплитуда волны  $a_3$  определяется через мощность опорного генератора  $P_3$ :

$$P_3 = \frac{|a_3|^2}{2}. \quad (2)$$

Поскольку матрица нормированных амплитуд  $[b]$  записывается через матрицу рассеяния  $[S]$  в виде [2]:

$$[b] = [S][a], \quad (3)$$

в рассматриваемом случае имеем

$$[b] = [S] \begin{bmatrix} b_1 \Gamma_1 e^{-j2\beta_0 l_1} \\ b_2 \Gamma_2 e^{-j2\beta_0 l_2} \\ a_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где для двойного T-моста матрица  $[S]$  имеет вид [2]

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Производя в (4) перемножение матриц, получаем для амплитуды  $b_4$  волны, падающей на индикатор:

$$b_4 = \frac{a_3}{2} [|\Gamma_1| e^{-j(2\beta_0 l_1 - \varphi_1)} - |\Gamma_2| e^{-j(2\beta_0 l_2 - \varphi_2)}]. \quad (5)$$

Отсюда с учетом (2) находим выражение для мощности  $P_4$  СВЧ-сигнала в индикаторном плече:

$$P_4 = \frac{b_4 b_4^*}{2} = \frac{P_3}{4} \left[ |\Gamma_1|^2 + \frac{2|\Gamma_1|}{n} \cos(2\beta_0 \Delta l - \varphi_1) + \frac{1}{n^2} \right], \quad (6)$$

где  $\Delta l = l_2 - l_1$ .

Выражение (6), в частности, показывает, что при условиях  $|\Gamma_1| = \frac{1}{n}$  и  $2\beta_0\Delta l - \varphi_1 = \pi(2k-1)$ , где  $k$  — целое число, мощность  $P_4=0$  и мост сбалансирован. При изменении проводимости образца в плече IV появляется СВЧ-сигнал мощностью  $\Delta P_4$ :

$$\Delta P_4 = \frac{P_3 |\Gamma_1|^2}{4} \left[ 2 \left( 1 + \frac{\Delta |\Gamma_1|}{|\Gamma_1|} \right) (1 - \cos \Delta \varphi_1) + \left( \frac{\Delta |\Gamma_1|}{|\Gamma_1|} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где  $\Delta |\Gamma_1|$  и  $\Delta \varphi_1$  — вариации модуля и фазы коэффициента отражения, обусловленные указанными изменениями электрических свойств полупроводника. При малых изменениях  $\Gamma_1$  ( $\Delta \varphi_1 \ll 1$  и  $\frac{\Delta |\Gamma_1|}{|\Gamma_1|} \ll 1$ ) выражение (7) упрощается:

$$\Delta P_4 \approx \frac{P_3 |\Gamma_1|^2}{4} \left[ (\Delta \varphi_1)^2 + \left( \frac{\Delta |\Gamma_1|}{|\Gamma_1|} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

В общем случае выражение (8) необходимо анализировать на ЭВМ. Однако для образцов с малой удельной проводимостью ( $\sigma \ll \epsilon' \epsilon_0 \omega$ ) и при толщине  $d$  такой, что имеет место лишь амплитудная модуляция СВЧ-сигнала при изменении проводимости, можно, используя результаты, полученные в [1], записать выражение (8) в виде

$$\Delta P_4 \approx \frac{P_3 |\Gamma_1|^2}{4} K_0(\sigma, d) (\Delta \sigma)^2, \quad (9)$$

где  $K_0(\sigma, d)$  — коэффициент, зависящий от толщины  $d$  и удельной проводимости пластинки  $\sigma$ .

Отсюда видно, что мощность сигнала разбаланса квадратичным образом зависит от изменений проводимости образца.

Используя результаты, полученные в [1], и предполагая, что количество возбужденных в зону проводимости электронов постоянно и не зависит от объема образца, (т. е.  $\frac{\Delta \sigma(d)}{\Delta \sigma_0} = \frac{1}{d}$ ), по формуле (8) на ЭВМ БЭСМ-6 был произведен расчет

зависимости мощности разбаланса  $\Delta P_4$  в плече IV двойного  $T$ -моста от толщины полупроводниковой пластинки Ge ( $\epsilon' = 16$ ,  $\sigma = 1 \text{ ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ )  $d$ . Результаты расчета представлены на рис. 2, откуда видно, что максимальная мощность СВЧ-отклика  $\Delta P_4$

наблюдается при значениях толщины пластины  $d = \frac{\lambda_g}{2} K$ ,  $K = 1, 2, 3, \dots$  ( $\lambda_g$  — длина СВЧ-волны в полупроводниковой среде), причем в этом случае величина модуля коэффициента отражения  $|\Gamma_1|$  имеет минимальное значение, а изменения  $|\Gamma_1|$  и  $\varphi_1$  максимальны [3].

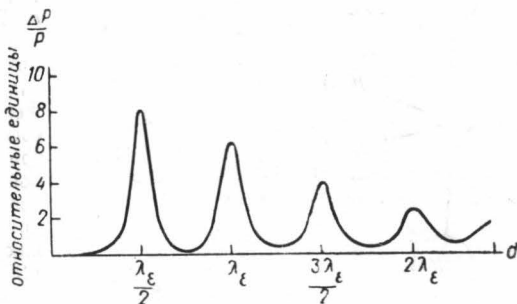


Рис. 2

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Козарь А. В., Пирогов Ю. А. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 13, № 5, 1972.
2. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ, ч. 1. М., 1970.
3. Козарь А. В., Пирогов Ю. А., Селин В. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 14, № 6, 1973.