

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1972

УДК 538.566

А. В. КОЗАРЬ, Ю. А. ПИРОГОВ

ОТРАЖЕНИЕ СВЧ-СИГНАЛА ОТ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАСТИНЫ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Рассчитаны и экспериментально измерены модуль и фаза коэффициента отражения СВЧ-сигнала от плоскопараллельной пластины полупроводника, помещенной в волновод прямоугольного сечения.

В исследовании свойств полупроводниковых материалов в диапазоне сверхвысоких частот представляет интерес, во-первых, применение полупроводников в качестве детектирующего элемента в приемниках излучений и, во-вторых, бесконтактное измерение параметров таких материалов. И в том и в другом случае бывает необходимо знать величину модуля $|\Gamma|$ и фазы φ коэффициента отражения $\Gamma = |\Gamma|e^{j\varphi}$ СВЧ-сигнала от полупроводника. Поскольку $|\Gamma|$ и φ непосредственно связаны с электрофизическими параметрами полупроводниковых материалов, расчет коэффициента отражения как функции проводимости и размеров образца представляет интерес для широкого круга исследователей полупроводников и полупроводниковых приборов. Об этом свидетельствует и появление в последнее время ряда работ [1—4, 9], в которых обсуждаются проблемы измерений параметров полупроводниковых материалов СВЧ-методами. Обычно, однако, речь идет об измерении коэффициента отражения либо от очень тонких стержней или пластин [1—3], либо от тонких пленок на подложке [4], помещенных в волновод. В то же время простые и достаточно точные методы инженерного расчета отражения СВЧ-сигнала от полупроводниковой пластины конечных размеров (в том числе и резонансных: $\lambda/2$, λ и т. п.) подробно не рассматриваются. В настоящем сообщении на основе теории цепей рассчитан коэффициент отражения от плоскопараллельной полупроводниковой пластины, помещенной в волновод перпендикулярно его оси. В отсутствие магнитного поля и при комнатной температуре (для СВЧ-электродинамики) моделью однородного полупроводника является «диэлектрик с потерями», имеющий комплексную диэлектрическую проницаемость

$$\epsilon_k = \epsilon' + j\epsilon'', \quad (1)$$

где ϵ' — относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon'' = -\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$, σ — удельная проводимость полупроводника, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ω — круговая частота СВЧ-сигнала.

Таким образом, предполагается, что диэлектрическая (с проницаемостью ϵ_k) пластинка конечной толщины d_0 заполняет по всему сечению волновод с идеальными стенками, бесконечный по обе стороны от пластины. Такой случай реализуется при развязке генератора с линией передачи, подводящей СВЧ-сигнал, и при подключении согласованной нагрузки к фланцам линии за образцом. В эквивалентном представлении это соответствует полубесконечной линии передачи с волновым сопротивлением Z_0 , нагруженной на сопротивление $Z_{вх}$. Последнее представляет собой сопротивление отрезка регулярной линии длиной d_0 с волновым импедансом Z_ϵ , заполненной диэлектриком и нагруженной в свою очередь на некоторое сопротивление Z , представляющее собой импеданс волновода, к фланцам которого подключена нагрузка Z_H (если эта нагрузка является согласованной, то $Z_H = Z_0$ и $Z = Z_0$).

Коэффициент отражения СВЧ-сигнала от нагрузки определяется известным выражением [5] (для немагнитного диэлектрика $\mu = 1$):

$$\Gamma = \frac{Z_{вх} - Z_0}{Z_{вх} + Z_0} = \frac{(Z_\epsilon^2 - Z_0^2) \operatorname{th} \gamma d_0}{2Z_\epsilon Z_0 + (Z_\epsilon^2 + Z_0^2) \operatorname{th} \gamma d_0}, \quad (2)$$

где

$$Z_\epsilon = \rho_0 [\epsilon_k (1 - \lambda^2/4\epsilon_k a^2)]^{-1/2} = \rho_0 (c + jd);$$

$\rho_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} \simeq 377 \text{ ом}$; a — размер широкой стенки волновода; λ — длина волны в свободном пространстве;

$$c = (\sqrt{\Lambda^2 + \epsilon''^2} + \Lambda)^{1/2} [2(\Lambda^2 + \epsilon''^2)]^{-1/2};$$

$$d = \sqrt{\Lambda^2 + \epsilon''^2} - \Lambda)^{1/2} [2(\Lambda^2 + \epsilon''^2)]^{-1/2};$$

$$\Lambda = \epsilon' - \lambda^2/4a^2; \quad Z_0 = \rho_0 (1 - \lambda^2/4a^2)^{-1/2}; \quad \gamma = \alpha + j\beta;$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}\pi}{\lambda} (\sqrt{\Lambda^2 + \epsilon''^2} - \Lambda)^{1/2};$$

$$\beta = \frac{\sqrt{2}\pi}{\lambda} (\sqrt{\Lambda^2 + \epsilon''^2} + \Lambda)^{1/2}.$$

После ряда преобразований получаем следующие выражения для модуля и фазы коэффициента отражения:

$$|\Gamma| = \left| \left(\frac{K^2 + L^2}{M^2 + N^2} \right)^{1/2} \right|, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{LM - KN}{KM + LN}, \quad (4)$$

где

$$K = m(c^2 - d^2 - Z_0'^2) - 2ncd, \quad L = n(c^2 - d^2 - Z_0'^2) + 2mcd,$$

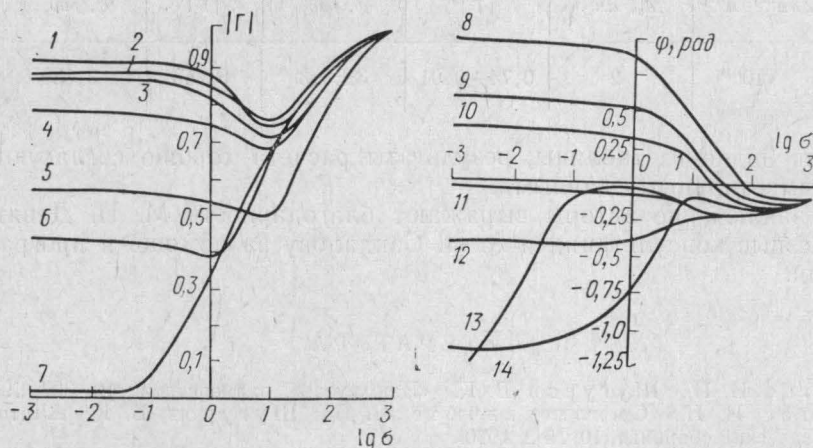
$$M = m(c^2 - d^2 + Z_0'^2) - 2ncd + 2cZ_0'$$

$$N = n(c^2 - d^2 + Z_0'^2) + 2mcd + 2dZ_0',$$

$$m = \frac{[1 + \operatorname{tg}^2(\beta d_0)] \operatorname{th}(\alpha d_0)}{1 + \operatorname{th}^2(\alpha d_0) \operatorname{tg}^2(\beta d_0)}, \quad n = \frac{[1 - \operatorname{th}^2(\alpha d_0)] \operatorname{tg}(\beta d_0)}{1 + \operatorname{th}^2(\alpha d_0) \operatorname{tg}(\beta d_0)},$$

$$Z'_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

Выражения для $|\Gamma|$ и $\text{tg}\varphi$ позволяют исследовать характер и величину изменений модуля и фазы коэффициента отражения с изменением удельной проводимости σ и толщины пластинки d_0 . Измеренные спосо-



Зависимость модуля $|\Gamma|$ и фазы φ коэффициента отражения от удельной проводимости полупроводниковой пластины при различных значениях ее толщины: 1 — d_0 , 2 — $d_0=0,3$; 3 — $d_0=1$; 4 — $d_0=0,2$; 5 — $d_0=0,1$; 6 — $d_0=1,2$; 7 — $d_0=2,54$ мм и 8 — $d_0=0,1$; 9 — $d_0=0,2$; 10 — $d_0=0,3$; 11 — $d_0=2$; 12 — $d_0=1$; 13 — $d_0=2,54$; 14 — $d_0=1,2$ мм

бом волноводной измерительной линии [6] и ϵ' и σ для исследуемого образца оказались равными $\epsilon'=16$ и $\sigma=10 \text{ ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Вычисления зависимости коэффициента отражения от проводимости были проведены по формулам (3) и (4) на ЭВМ «БЭСМ-6» для случая $\epsilon'=16$ (для Ge). На основе полученных результатов были построены в полулогарифмическом масштабе графики $|\Gamma|=f_1(\sigma, d_0)$ и $\varphi=f_2(\sigma, d_0)$, где d_0 — параметр (см. рис.).

Наиболее интересные участки построенных кривых, очевидно, те, где наблюдается резкое изменение параметров $|\Gamma|$ или φ в зависимости от проводимости образца. Можно подобрать сочетание $\sigma_{1,2}$ и $d_{01,2}$ таким образом, что полученная точка $f_1(\sigma_1, d_{01})$ или $f_2(\sigma_2, d_{02})$ окажется на участке со значительной крутизной изменения параметра с проводимостью. Такой полупроводниковый элемент будет с высокой чувствительностью реагировать на изменение проводимости образца изменением коэффициента отражения в СВЧ-тракте и может использоваться как детектор электромагнитных излучений [7, 8].

Проведенные расчеты дают возможность выбрать оптимальные параметры образца для такого приемника.

Рисунок показывает также, что в зависимости от проводимости и толщины образца основную роль в формировании отклика в СВЧ-тракте могут играть как фазовые, так и амплитудные изменения, т. е. модуляция проводимости образца может быть преобразована либо в фазовую, либо в амплитудную модуляцию СВЧ-сигнала. Выбор того или иного способа преобразования модуляций определяется, очевидно, конкретной схемой и назначением приемника.

В таблице приведены результаты экспериментальных измерений, проведенных с помощью измерительной линии в условиях, когда за диэлектрической пластиной ставилась согласованная нагрузка. Измерения проведены в сантиметровом диапазоне волн на пластинке Ge с удельной проводимостью $\sigma=10 \text{ ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $\epsilon'=16$ и толщиной $d_0=2 \text{ мм}$.

Эксперимент				Расчет	
$\sigma \text{ ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$	$d_0, \text{ мм}$	$ \Gamma $	$\varphi, \text{ рад}$	$ \Gamma $	$\varphi, \text{ рад}$
10	2	$0,74 \pm 0,01$	$3 \pm 0,3$	0,743	3,039

Как видно из таблицы, результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В заключение авторы выражают благодарность М. Н. Девяткову за полезные консультации и А. Н. Сандалову за помощь в программировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григас И. П., Шугуров В. К. «Изв. вузов», радиофизика, **12**, 307, 1969.
2. Григас И. П., Смильгавичюте Л. П., Шугуров В. К. «Литовский физический сборник», **10**, № 2, 1970.
3. Skeikh R. H., Gunn M. W. IEEE Trans. Microwave Theory and Techn., **16**, No. 2, 117—121, 1968.
4. Bichara M. R. E., Poitevin J. P. R. IEEE Trans. Instrum. and Measur., **13**, No. 4, 323—328, 1965.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М., «Высшая школа», 1970.
6. Валитов Р. А., Сретенский В. Н. Радиоизмерения на СВЧ. М., «Высшая школа», 1958.
7. Electronics, **32**, No. 5, 70, 1959.
8. Sommers H. S., Teutsh W. B. Proc. IEEE, No. 2, 1964.
9. Поплавко Ю. М. «Изв. вузов», радиотехника, **6**, № 1, 83—86, 1963.

Поступила в редакцию
30.4 1971 г.

Кафедра
радиотехники