

УДК 621.396 96;621.391.26.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю. Н. Берозашвили, С. Э. Мачавариани, А. Г. Нацвлишвили,
А. А. Чиракадзе

Описан оптический метод диагностики СВЧ излучения, допускающий абсолютное измерение мощности электромагнитной волны. Приводятся теоретические зависимости величины линейного электрооптического эффекта, коэффициента отражения СВЧ и среднего эффективного поля модуляции от частоты электромагнитной волны, поступающей в приемный преобразователь. Даются рабочие формулы. Производится оценка чувствительности, величины КСВ, погрешности измерений. Экспериментально доказана достоверность метода.

Диагностика СВЧ излучения в настоящее время может быть достаточно полно осуществлена множеством методов с применением серийных измерителей мощности, волномеров, частотомеров и др. Однако в некоторых отдельных случаях традиционные средства измерения не удовлетворяют предъявляемым требованиям, что вынуждает экспериментаторов искать новые способы получения информации. В частности, это касается диагностики кратковременных непериодических импульсов СВЧ излучения, сопровождающихся сильными электрическими и магнитными помехами. В этом случае пригодны только малоинерционные электронные методы (метод вольтметра, метод с использованием эффекта Холла, метод, основанный на измерении «термо» ЭДС «горячих» электронов) [1], однако сильное влияние электрических помех затрудняет их применение. Кроме того, эти методы допускают большую погрешность из-за наличия многих мешающих факторов (качество контактов, сопутствующие эффекты, сильная температурная зависимость и т. д.).

Предлагаемый метод диагностики СВЧ излучения, основанный на линейном электрооптическом эффекте, свободен от этих недостатков. Он позволяет осуществить гальваническую развязку и тем самым значительно уменьшить уровень электрических помех. Применение высокоомных полупроводников и диэлектриков с малыми диэлектрическими потерями дает возможность абсолютного измерения мощности и почти полностью исключает нагрев образцов за счет поглощения поля, расширяя тем самым верхний предел измеряемых мощностей вплоть до прорыва волновода.

Привлекает внимание еще одно преимущество этого метода: увеличение объема информации однократного измерения (высокое быстродействие, 10^{-12} — 10^{-13} с, дает принципиальную возможность разрешения структуры радиопульса и измерения его частоты).

Метод основан на модуляции света, пропускаемого через электрооптический кристалл, полем СВЧ волны. Величина модуляции зависит от характеристик образца (оптического показателя преломления n_0 , электрооптических коэффициентов r_{ij} , размеров), его ориентации и напряженности электрического поля в кристалле. Измерив величину модуляции света, можно вычислить эффективное модулирующее поле в кристалле (\bar{E}), а также и поле падающей СВЧ волны (E).

Из большого многообразия электрооптических кристаллов нами был выбран фосфид галлия — кристалл кубической симметрии без цен-

тра инверсии (класс $\bar{4}3m$), так как в силу изотропности его оптических свойств значительно упрощается юстировка оптической системы. Из-за малых диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta < 10^{-4}$) и высокого удельного сопротивления ($\rho > 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) образцы хорошо выдерживают импульсные мощности до 200—250 кВт при длительности импульсов до 2,5 мкс.

Важнейшим узлом приборов для диагностики СВЧ излучения является приемный преобразователь, в котором осуществляется преобразование (желательно пропорциональное) мощности СВЧ волны в сигнал, удобный для индикации.

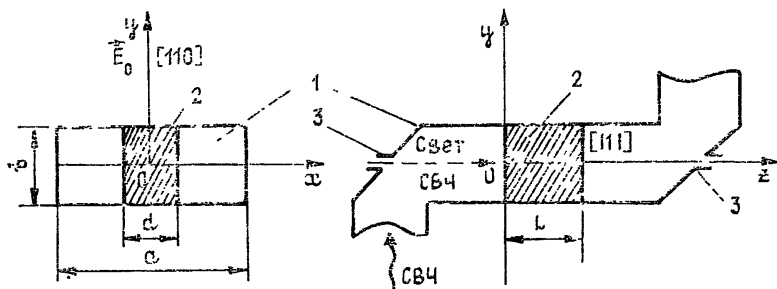


Рис. 1.

Кристалл GaP, вырезанный в виде прямоугольного параллелепипеда, помещается в центре металлического волновода прямоугольного сечения, заполняя его по высоте (рис. 1, 1 — волновод, 2 — кристалл, 3 — отверстия). Свет, поляризованный вдоль кристаллографического направления $[110]$ (ось y), распространяется нормально плоскости $[111]$ вдоль продольной оси волновода z . Анализатор, расположенный за волноводной секцией, ориентирован перпендикулярно плоскости поляризации падающего света (ориентирован «на затемнение»). При поступлении в волновод СВЧ волны в кристалле, вследствие линейного электрооптического эффекта, возникает разность фаз $\Gamma(E)$ между двумя ортогонально-поляризованными компонентами пучка света и оптическая система просветляется. Интенсивность модулированного света равна $[2]$

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Gamma(E)}{2}, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность падающего на анализатор света.

Как видно из (1), интенсивность света, прошедшего через анализатор, зависит от разности фаз, а следовательно, и от величины электрического поля СВЧ в волноводе (E_0). В рассматриваемом случае $[2]$

$$\Gamma(E) = 2 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} E_0 \bar{\alpha} L, \quad (2)$$

где λ — длина волны света в вакууме, n_0 — оптический показатель преломления, r_{41} — электрооптический коэффициент, L — длина образца вдоль направления распространения света, $\bar{\alpha}(t) = E'(t)/E_0$, $E'(t)$ — мгновенное значение эффективного поля СВЧ волны в кристалле, зависящее от диэлектрической проницаемости ϵ и размеров образца, а также от скоростей распространения в нем СВЧ волны и света.

Значение $\bar{\alpha}(t)$ можно получить, воспользовавшись численными методами расчета СВЧ поля в волноводе с частичным диэлектрическим заполнением (например, методом частичных областей). Подробнее эти расчеты рассматриваются в работе $[3]$.

Следовательно, измеряя безынерционным фотоприемником ($\tau < 10^{-10} \text{ с}$) относительную интенсивность света $I(t)/I_0$ и зная величины n_0 , r_{41} и $\bar{\alpha}(t)$, можно вычислить амплитуду напряженности электрического поля E_0 и мощность P падающей СВЧ волны. Как известно,

$$P = \frac{ab}{4} \sqrt{\frac{1 - (\Lambda/2a)^2}{\mu_0 \epsilon_0}} E^2, \quad (3)$$

где Λ — длина волны СВЧ в вакууме, $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $a = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м и $b = 10^{-2}$ м — размеры волновода.

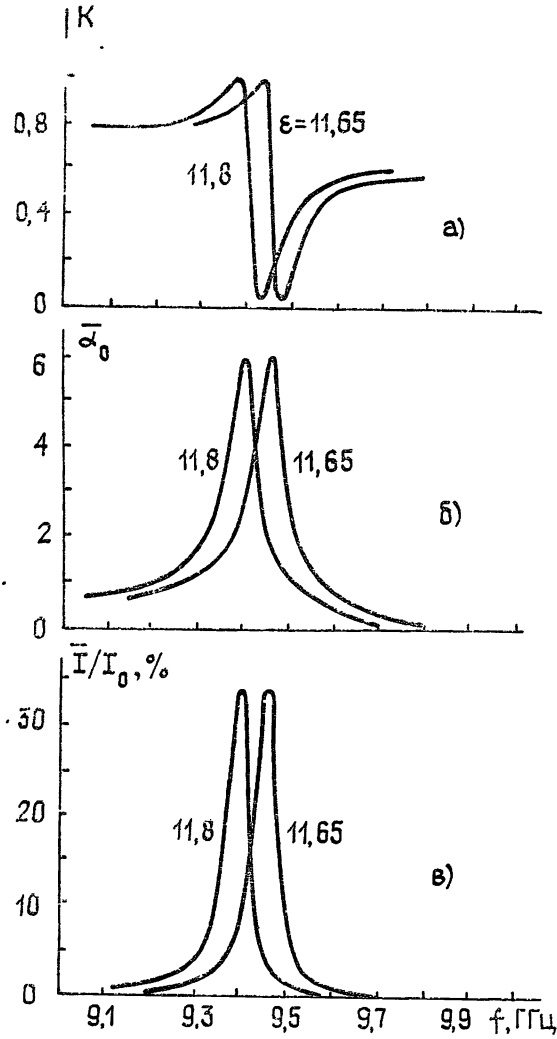


Рис. 2.

Подстановка этих значений в (3) для частоты $f = 9,45$ ГГц дает

$$P = 1,104 \cdot 10^{-7} E^2. \quad (4)$$

Применение безынерционных фотоприемников (например, ЭОК «АГАТ») позволяет также наблюдать структуру сигнала СВЧ. Однако обычно более доступным бывает использование инерционных ($\tau \geq 10^{-9}$ с) фотоприемников. Сигнал, снимаемый с них, является результатом усреднения выражений (1) и (2) по времени:

$$\frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I(t)}{I_0} dt = \frac{1}{2} [1 - J_0(\Gamma(E))], \quad (5)$$

где T — период колебаний СВЧ, J_0 — функция Бесселя нулевого порядка. В этом случае

$$\Gamma(E) = 2 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} E_0 \bar{\alpha}_0 L, \quad (6)$$

где $\bar{\alpha}_0 = \bar{E}'_0 / E_0$, \bar{E}'_0 — эффективное поле СВЧ в кристалле.

Значение $\bar{\alpha}_0$, так же как и $\bar{\alpha}(f)$, дается численным интегрированием. Расчет показывает, что при ширине кристалла $d > 10$ мм могут наблюдаться резонансы.

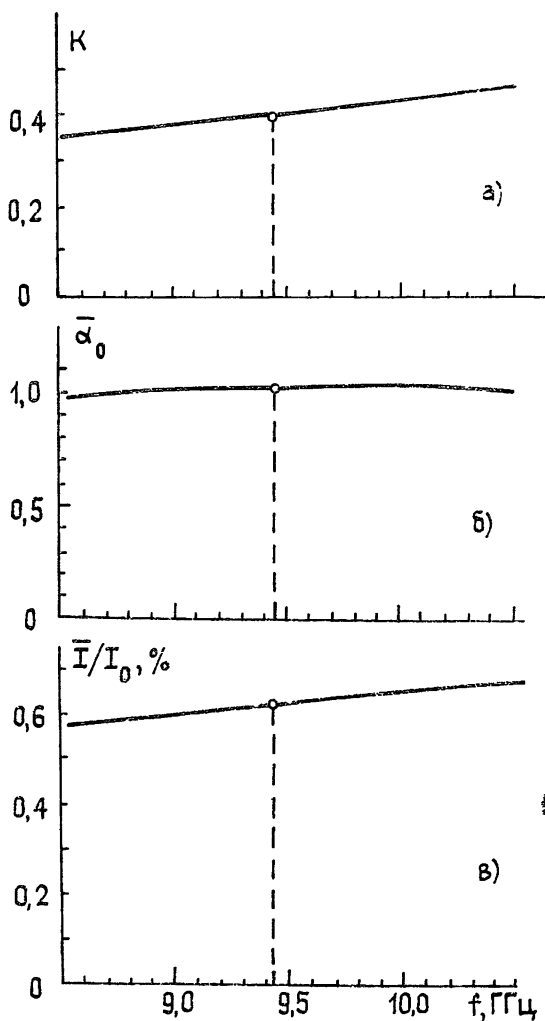


Рис 3.

На рис. 2а, б, в и рис. 3а, б, в приводятся частотные зависимости $K(f)$, $\bar{\alpha}_0(f)$ и $\bar{I}_0/I_0(f)$ (K — коэффициент отражения мощности СВЧ волны) для двух образцов: с $d=14$ мм и $L=3,62$ мм (резонансный случай) и с $d=2,05$ мм и $L=2,55$ мм (нерезонансный случай). Значения параметров: $n_0=3,31$ [2], $r_{41}=0,82 \cdot 10^{-12}$ м/В [3], $\epsilon=11,65$. Расчет производился для поля СВЧ мощностью $P=13,5$ кВт.

Как видно из рис. 2, образцы с резонансными размерами можно применять для приемных преобразователей, работающих в узкой полосе частот (например, при $d=14,0$ мм и $L=3,62$ мм и $f_0=9,45$ ГГц с полушириной $\Delta f=5,5 \cdot 10^{-2}$ ГГц). При этом достигается относительно высокая чувствительность ($\sim 2,5 \cdot 10^{-5}$ Вт $^{-1}$) и малый коэффициент стоячей волны ($K_{СВН} < 1,2$). По спектру отражения приемного преобразователя с образцом резонансных размеров можно определять диэлектрическую

проницаемость этого кристалла, так как резонансная частота существенно зависит от ϵ (рис. 2а). Измерение диэлектрической проницаемости используемого образца дает возможность повысить точность расчетов α и α_0 .

С целью достижения широкополосности применялся образец GaP с $d=2,05$ мм и $L=2,55$ мм. Ширина полосы в этом случае более 3 ГГц (от 8 ГГц до 11,25 ГГц при отклонении от среднего значения не более чем 0,7 дБ, рис. 3), однако чувствительность почти на два порядка ниже, чем при резонансе ($\sim 0,5 \cdot 10^{-6}$ Вт $^{-1}$).

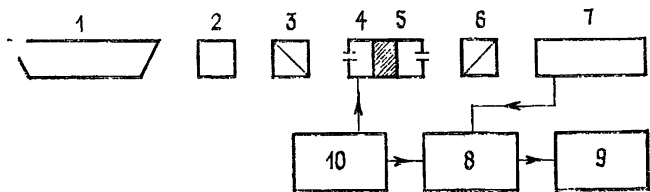


Рис. 4

Расчетная относительная погрешность абсолютных измерений составляет $\Delta P/P = (15-20)\%$ и в основном определяется погрешностью в величине электрооптического коэффициента.

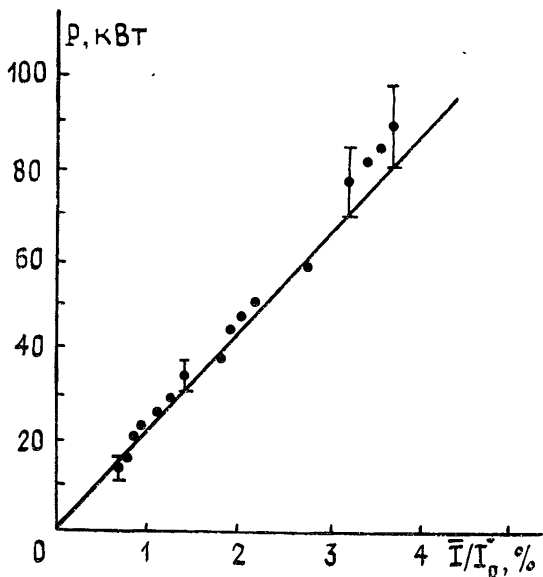


Рис. 5.

Электрооптический метод применялся для диагностики СВЧ излучения мощностью в импульсе $P=(0,5-90)$ кВт. В качестве эталонного прибора применялся калориметрический измеритель мощности МЗ-13. Блок-схема установки приведена на рис. 4. Свет, испускаемый лазером ЛГ-126 (1), проходит через волноводную секцию (4) с кристаллом (5), анализатор (6) и попадает на фотоприемник (7). Сигнал, пропорциональный интенсивности света, поступает на осциллограф С7-9 (8) со стробоскопическим АЦП (9). Источником радиоимпульсов служит генератор импульсов СВЧ (10) с максимальной мощностью до 90 кВт, частотой радиоимпульса $f=9,45$ ГГц, длительностью радиоимпульсов от 0,05 мкс до 2,5 мкс, частотой следования импульсов от нуля (одиночный импульс) до 400 Гц. (Форма импульсов длительности 2,5 мкс близка к прямоугольной.) Пластина $\lambda/4$ (2) и поляризатор (3) предназначены для выбора нужного направления поляризации света. Измерение I_0 производилось с применением калиброванных светофильтров при ориентации анализатора (6) параллельно плоскости поляризации падающего света. Для получения импульсов

света в этом случае использовался механический прерыватель со скважностью, равной скважности импульсов СВЧ.

Результаты измерений приведены на рис. 5. Там же приводится теоретическая кривая. Видно, что в пределах погрешности эксперимент совпадает с теорией. Это позволяет проводить абсолютные измерения, используя результаты численных расчетов.

Как видно из рис. 5, зависимость относительной интенсивности модулированного света от мощности СВЧ волны в этом диапазоне мощностей можно считать линейной. (Расчет показывает, что линейность в пределах 5% сохраняется вплоть до 900 кВт.) Это дает возможность значительно упростить рабочую формулу (5) и записать ее в более удобном виде:

$$\frac{\bar{I}}{I_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2, \quad (7)$$

где Γ дается выражением (6). Подставляя (6) в (7), для частоты поля $f = 9,45$ ГГц (в этом случае $\alpha_0 = 1,032$) получаем

$$E_0 = 4,5 \cdot 10^6 \sqrt{\bar{I}/I_0} \text{ В/м} \quad (8)$$

или при подстановке (8) в (4) —

$$P = 2,2 \cdot 10^6 (\bar{I}/I_0) \text{ Вт.} \quad (9)$$

Учитывая, что α_0 слабо зависит от частоты волны (рис. 3б), можно считать, что формулы (8) и (9) применимы в диапазоне 8,5 ГГц — 10,5 ГГц. При этом погрешности в определении E_0 и P по сравнению с точными вычислениями (подстановкой табличных значений $\alpha_0(f)$) увеличиваются на 5 и на 10% соответственно.

В силу малой инерционности эффекта (10^{-12} с — 10^{-13} с) электрооптический метод диагностики может быть применен не только в сантиметровом, но и в миллиметровом диапазоне волн.

Полученные в данной работе результаты позволяют с уверенностью сказать, что электрооптический эффект, ранее применявшийся для измерения постоянного напряжения [4], а также напряженности электрических импульсов [5], может успешно применяться для диагностики СВЧ излучения в волноводе. При этом с большей полнотой реализуются все преимущества электрооптического метода измерений (осуществление гальванической развязки, высокое быстродействие). Особенно важно то обстоятельство, что при указанном расположении кристалла в волноводе наблюдается отличное согласие эксперимента и теории и обеспечивается достаточно высокая точность абсолютных измерений мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П., Баймуратов Е. А. Измерение мощности на СВЧ. — М.: Сов радио, 1976.
2. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. — М.: Наука, 1970, с. 13; 50.
3. Берозашвили Ю. Н., Мачавариани С. З., Нацвлишвили А. Г., Чиракадзе А. А. В кн.: Оптика и спектроскопия полупроводников и диэлектриков. — Тбилиси, 1986, с. 137.
4. Namba S. — Rev Sci Instr, 1956, 27, p. 336.
5. Георгобидани А. Н., Иванов Л. Н., Куземченко Ю. Н., Тодуа П. А., Шестакова Е. Ф. — ПТЭ, 1981, № 1, с. 172.

Тбилисский государственный университет

Поступила в редакцию
16 июля 1985 г.

APPLICATION OF THE LINEAR ELECTROOPTICAL EFFECT FOR THE DIAGNOSTICS OF MICROWAVE RADIATION

Yu. N. Berozashvili, S. Z. Machavariani, A. G. Natsvlishvili, A. A. Chirakadze

The optical diagnostic method of microwave radiation, allowing absolute measurement of the electromagnetic wave power has been described. Theoretical dependence of the linear electrooptical effect, the microwave reflection index and the effective field of modulation on the electromagnetic wave frequency in receiving transformer has been presented. Working formulas have been given. Sensibility, volume of standing wave index and inaccuracy of measurements have been estimated. The authenticity of the method has been experimentally proved.