

КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

К. Г. Батраков, А. С. Лобко

При проведении в НИИ ЯП БГУ работ по созданию объемного лазера на свободных электронах (ОЛСЭ) [1] возникает необходимость определения электродинамических свойств диэлектрических материалов, используемых в резонаторах и волноводах. В частности, при так называемом «холодном» моделировании процессов излучения в объемных дифракционных генераторах реальный электронный пучок заменяется имитатором в виде диэлектрического волновода с таким расчетом, чтобы фазовая скорость волны в волноводе совпадала со скоростью исследуемого электронного пучка [2]. Для определения геометрических параметров имитатора необходимо знать диэлектрическую проницаемость ϵ материала волновода в рабочем диапазоне частот. Информация об этой величине для различных материалов в широком диапазоне частот необходима также при выполнении работ по созданию излучателей черенковского и квазичеренковского типа. Литературных (например, [3, 4]) и справочных данных из-за обилия всевозможных диэлектрических материалов (многие из которых при идентичном химическом составе могут иметь некоторые отличия в физических параметрах из-за различных технологий синтеза) во многих случаях недостаточно. По этой причине была разработана методика, рассматриваемая в данной работе.

Ввиду важности диэлектрических материалов в технике СВЧ-диапазона применяется большое количество разнообразных методов измерений диэлектрической проницаемости. Среди них наиболее распространен и считается самым точным резонансный метод [5], однако его применение ограничено сантиметровым диапазоном длин волн. При переходе в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны применяются квазиоптические методы. Устройства на основе различных модификаций интерферометров [6–8], как правило, дают высокую точность, но для многих задач они являются избыточно сложными.

Умеренную точность и достаточную простоту имеет метод измерения коэффициентов прохождения и отражения излучения диэлектрической пластиной [9]. При формировании отраженной волны происходит интерференция вкладов от передней и задней границ диэлектрической пластинки. Как результат, кривая отражения зависит кроме угла падения от таких параметров, как частота излучения, толщина пластинки. Причем эта зависимость из-за интерференции является немонотонной. Такая немонотонность имеет место, если толщина пластинки много меньше длины поглощения ($k\chi_0''d \ll 1$). В этих условиях зависимость является тем более резкой, чем больше толщина пластинки. На рис. 1 приведены расчетные зависимости коэффициентов отражения монохроматической волны от диэлектрической проницаемости при толщине пластинок $d = 1,0$ мм и $d = 2,0$ мм на частоте $\nu = 78$ ГГц. Кривые рассчитаны по формуле

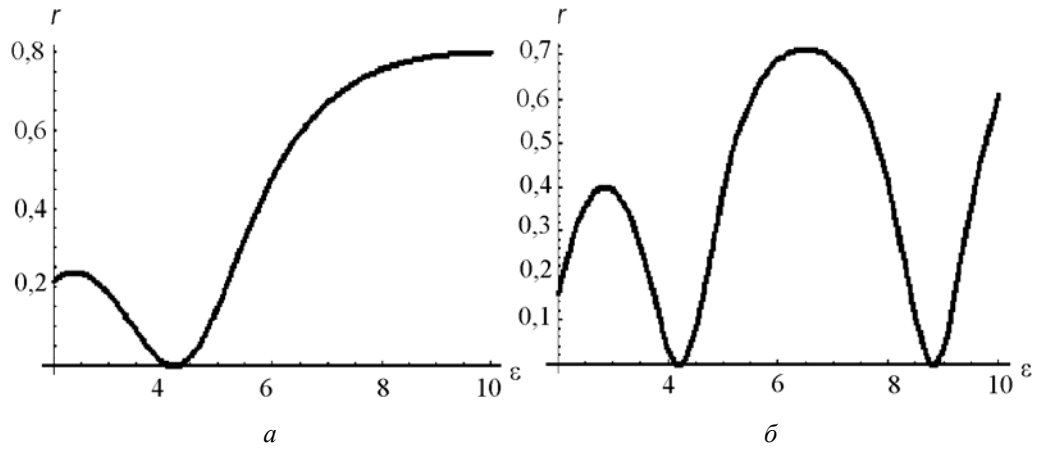


Рис. 1. Зависимости коэффициентов отражения от ε при частоте $\nu = 78$ ГГц:
 a – толщина пластины 1,0 мм, b – толщина пластины 2,0 мм

$$r = \left| \frac{(1 - \eta^2) \{ \exp[-0,2I\pi d \nu \sqrt{\varepsilon - \zeta^2} / 3] - \exp[0,2I\pi d \nu \sqrt{\varepsilon - \zeta^2} / 3] \}}{(1 + \eta)^2 \exp[-0,2I\pi d \nu \sqrt{\varepsilon - \zeta^2} / 3] - (1 - \eta)^2 \exp[0,2I\pi d \nu \sqrt{\varepsilon - \zeta^2} / 3]} \right|^2. \quad (1)$$

Здесь ν – частота излучения (ГГц); ζ – косинус угла падения; $\eta = \frac{\sqrt{\varepsilon - \zeta^2}}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$ –

при поляризации вектора электрической напряженности в плоскости падения и $\eta = \frac{\sqrt{\varepsilon - \zeta^2}}{\varepsilon \sqrt{1 - \zeta^2}}$ – при поляризации вектора электрической напряженности в плоскости, перпендикулярной плоскости падения.

Из представленных графиков видно, что для материалов с величиной $\varepsilon \sim 7 \div 10$ для первого, «пристрелочного», измерения лучше использовать пластинку меньшей толщины (для больших толщин может возникнуть многозначность при вычислении диэлектрической проницаемости по коэффициенту отражения). Постепенно увеличивая толщину пластинки, можно увеличить точность определения диэлектрической проницаемости (за счет более резкой зависимости коэффициента при больших толщинах). Если дисперсия невелика ($kd \frac{\partial \varepsilon(\omega)}{\partial \omega} \Delta \omega \ll 1$), то можно определить величину ε , измерив коэффициенты отражения для разных значений частот при одной и той же толщине пластинки.

Технически квазиоптическая методика определения диэлектрической проницаемости была основана на измерениях относительного коэффициента зеркального отражения под углом 45° линейно поляризованного СВЧ-излучения в тракте на основе лучеводов ПДЛ [10]. В ПДЛ эффективно распространяется мода EH_{11} , которая имеет линейную поляризацию и фазовый фронт, близкий к плоскому, что упрощает интерпретацию результатов. Конструктивно основным узлом измерительного стенда являлся лучеводный уголкового 90-градусный от-

ражатель, где посеребренное металлическое зеркало заменялось исследуемыми образцами. Благодаря такому решению все отраженное излучение без утечек собиралось на термисторный детектор М5-50 измерителя мощности МЗ-22А. Источником излучения служил генератор Г4-142.

Величина коэффициента отражения измерялась для СВЧ-керамики 22ХС [11]. Использовалась волна с поляризацией электрического вектора, направленного перпендикулярно плоскости падения на диэлектрическую пластинку. Частота падающего излучения изменялась от 76,0 до 78,33 ГГц. Угол падения волны по конструктивным ограничениям составлял 45°. Коэффициент отражения керамического образца определялся относительно коэффициента отражения от посеребренного металлического зеркала, принимаемого за единицу, что позволило измерять мощность только один раз для каждого образца. В таблице представлены результаты измерений коэффициента отражения 22ХС и расчета его величины ϵ по этим данным. Как следует из приведенных значений, разброс значений определяемой диэлектрической проницаемости имеет величину порядка одного процента. Наибольшее отклонение имеет место для первых трех значений, приведенных в таблице. Это объясняется тем, что эти частоты находятся в области минимума коэффициента отражения.

Коэффициенты отражения керамики 22ХС

Частота, ГГц	Коэффициент отражения	Величина ϵ , вычисленная по формуле (1)
76,0	0,003	9,21
76,2	0,003	9,17
76,4	0,003	9,22
76,6	0,014	9,24
76,8	0,028	9,24
77,0	0,041	9,23
77,2	0,063	9,23
77,4	0,090	9,24
77,6	0,117	9,24
77,8	0,147	9,24
78,0	0,175	9,24
78,2	0,213	9,25
78,33	0,228	9,25

Диапазон частот для определения диэлектрической проницаемости, приведенной в таблице, выбирался исходя из необходимости попадания в область наиболее резкой зависимости коэффициента отражения при толщине пластинки 2,0 мм (полная доступная область частот измерения составляла приблизительно 53–78 ГГц). Для иллюстрации на рис. 2, *а* приведена теоретическая зависимость коэффициента отражения от частоты, а на рис. 2, *б* – экспериментальные графики.

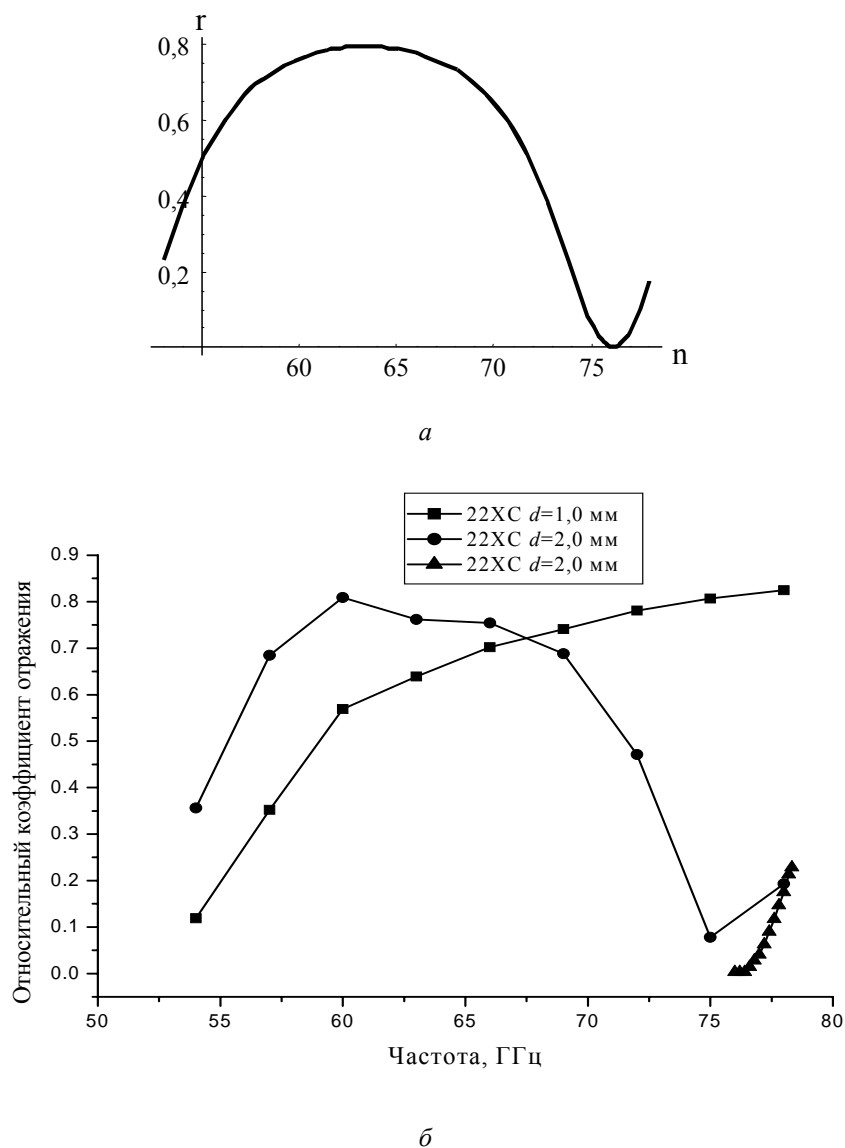


Рис. 2. Теоретическая (для $\epsilon = 9,24$) (а) и экспериментальные (б) зависимости относительного коэффициента отражения керамики 22ХС от частоты

Таким образом, видно, что способ определения диэлектрической проницаемости квазиоптическим методом с возможностью варьирования точности измерения выбором наиболее крутых участков зависимости дает результаты, достаточно приемлемые для многих применений. Кроме того, частотные зависимости коэффициента отражения пластин различной толщины могут служить основой методики измерения несущей частоты одиночного импульсного сигнала излучения прототипа ОЛСЭ.

Литература

1. *Baryshevsky V. G.* // Nucl. Instrum. Meth. 2000. Vol. A445. P. 281.
2. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В. П. Шестопалова. Киев, 1991.
3. *Meriakri V. V.* // Proc. 3rd Intern. symp. «Physics and engineering of millimeter and submillimeter waves MSMW'98». 1998. V. 1. P. 121–123.
4. *Мериакри В. В., Никитин И. П., Чигряй Е. Е.* // Радиотехника. 1995. № 6. С. 88–95.
5. ГОСТ 8.544-86. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь твердых диэлектриков. М., 1986.
6. *Юндев Д. Н., Лаш А. А., Грине В. М.* и др. // ПТЭ. 1989. № 1. С. 223–225.
7. Субмиллиметровая диэлектрическая спектроскопия твердого тела // Тр. ИОФАН. 1990. Т. 25.
8. *Krupnov A. F., Tretyakov M. Yu., Markov V. N. et al.* // Proc. 3rd Intern. symp. «Physics and engineering of millimeter and submillimeter waves MSMW'98». 1998. Vol. 1. P. 115–120.
9. *Брандт А. А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., 1963.
10. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. Киев, 1986.
11. Ситаллы, керамика: Проспект изделий. М., 1970.

QUASI-OPTICAL METHOD OF DIELECTRIC CONSTANT MEASUREMENT IN A MILLIMETER WAVEBAND

K. G. Batrakov, A. S. Lobko

Performing research on creation of the volume free electron laser, necessity of precise knowledge of electrodynamic properties of dielectric materials used in resonators and wave-guides was recognized. In many cases published data are poor, therefore described technique was developed.

Quasi-optical methods are mainly applied during dielectric measurements in millimeter and sub-millimeter bands. The devices based on the different modifications of interferometers have high accuracy, but for many objectives they are too much complicated.

Moderate accuracy together with comparative simplicity one can obtain using measurements of reflection and transmission coefficients of a dielectric wafer. Interference of the waves from front and back surfaces of a dielectric wafer exists during formation of total reflected wave. As the result, reflection function depends on besides the incidence angle also on such parameters as radiation frequency and wafer thickness. This dependence is non-monotonous, if the wafer thickness is much less than absorption length of a dielectric material. In these conditions the dependence is as more curved as thickness is larger. In Fig. 1 calculated dependencies of reflection factors of monochromatic wave as function of dielectric constant (permittivity) are shown for wafer thicknesses $d=1.0$ mm and 2.0 mm at 78 GHz.

From these curves is obvious that for materials with the value of $\epsilon \sim 7-10$ for first, 'approximate', measurement one should better use a wafer of smaller thickness. For larger thicknesses multi-valued results can originate from dielectric constant calculations out of reflection factor measurement. Scaling up the wafer thickness is possible to increase accuracy of dielectric constant determination due to more steep dependence of the reflection factor at larger thicknesses. If dispersion is insignificant, it is possible to determine the ϵ value measuring reflection factors for various frequencies at the same wafer thickness.

Technically quasi-optical method of dielectric constant definition was based on measurements of relative specular reflection factor for 45° incidence angle. Linearly polarized microwave radiation propagated in a tract on the base of PDL beam-guides, where EH_{11} mode is effectively spread. This mode has linear polarization and phase front, close to plane, that simplifies data interpretation. Structurally main component of the measuring set-up was beam-guide 90-degree reflection unit, where the silver-plated metal mirror was substituted by studied

samples. Due to such solution, total reflected radiation gathered without any leakage on the M5-50 thermistor detector of M3-22A power meter.

The value of reflection factor was measured for 22XC ceramics. The wave with perpendicular polarization was used. Reflection factor of a ceramic sample was determined relative to reflection factor of silver-plated mirror, which was taken as a unity. That has allowed measuring microwave power only once for each sample. Observed data of 22XC reflection factor and calculations of its ϵ value represented in the Table. As follows from displayed values, the accuracy of dielectric constant has the deviation about one percent.

The frequency range was selected on the assumption to use the most steep dependence of reflection factor of 2.0 mm wafer (available frequencies were approximately of 53-78 GHz range). For demonstration, the theoretical dependence of reflection factor on frequency and experimental graphics are showed in Fig. 2a and 2b.

Evidently, the proposed quasi-optical method for dielectric constant determination, due to its possibility of accuracy variation by choice of the steepest parts of frequency dependence, gives results acceptable enough for many applications.