

Измерение диэлектрической постоянной и тангенса угла потерь керамических окон для ввода мощности в сверхпроводящий резонатор

А.Н.Ворновский, Н.П.Собенин, А.А.Сулимов, А.И.Фадин
Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), Россия

А.А.Завадцев
Московский радиотехнический институт, Россия

P.Proch, G.Kreps
DESY, Germany

Приведены результаты расчетов и экспериментальных исследований с целью создания установки для определения диэлектрической постоянной и тангенса угла потерь керамических образцов цилиндрической формы. Из анализа точности измерений и удобства использования установки в условиях серийных измерений образцов с разными геометрическими размерами на фиксированной частоте был выбран вариант с цилиндрическим резонатором на виде колебаний E_{010} с запредельным волноводом, присоединенным к одному из торцов резонатора.

Введение

При создании вводов мощности в сверхпроводящие резонаторы линейного электрон-позитронного коллайдера TESLA [1] требуется отбраковка керамических окон по диэлектрической постоянной и тангенсу угла потерь. Выбрана методика определения комплексной диэлектрической проницаемости по результатам измерения частоты и добротности резонатора с исследуемым диэлектриком и без него [2]. Были рассмотрены цилиндрические резонаторы с колебаниями E_{010} и H_{011} , а также резонаторы коаксиального типа. Для обработки результатов измерения использовались данные расчета программы SUPERFISH [3].

Исследования параметров диэлектриков проводились на частоте 1300 МГц, диэлектрическая постоянная менялась в пределах 8–10, а тангенс угла потерь — в пределах $(2 - 4)10^{-4}$. Хотя резонатор с видом колебаний H_{011} не требует дроссельного сочленения, его габариты значительно больше, и в качестве рабочего варианта были выбраны резонаторы с колебанием E_{010} . Рассматривались два варианта резонаторов: с дроссельным соединением между корпусом резонатора и сменными крышками, и с запредельным цилиндрическим волноводом, подсоединенным к торцу резонатора. Отработка методики определения параметров диэлектриков проводилась на фторопластовых образцах в цилиндрическом резонаторе на частоте 3 ГГц. В табл. 1 приведены размеры исследуемых керамических и фторопластовых образцов (L — длина, D — диаметр, t — толщина цилиндра).

Таблица 1: Размеры керамических и фторопластовых образцов.

Образец	Керамических			Фторопластовых		
	L, мм	D, мм	t, мм	L, мм	D, мм	t, мм
1	33	47.1	6	15.7	22.4	3
2	49	75	6	23.3	35.7	3
3	45	90	8	21.4	42.9	4
4	51.6	92.6	6	24.6	44.1	3

1. Методика и точность определения комплексной диэлектрической постоянной

Погрешность определения диэлектрической постоянной по результатам измерения разности частот $\Delta f(\varepsilon)$ пустого резонатора f_0 и резонатора с образцом f_ε

$$\Delta f(\varepsilon) = f_0 - f_\varepsilon \quad (1)$$

прежде всего зависит от величины функции чувствительности $df_\varepsilon/d\varepsilon$ выбранного резонатора.

Для определения тангенса угла потерь диэлектрика ($tg\delta$) необходимо оценить мощность СВЧ, теряемой в образце (P). Запишем выражения для добротности пустого резонатора (Q_0) и резонатора с диэлектриком (Q_ε) в виде

$$Q_0 = \omega_0 \frac{W_0}{P_0}, \quad Q_\varepsilon(\varepsilon, tg\delta) = (\omega_0 - \Delta\omega(\varepsilon)) \frac{W_\varepsilon(\varepsilon)}{P_0 + P(tg\delta)}, \quad (2)$$

где ω_0 , W_0 , P_0 — резонансная частота, запасенная энергия и мощность потерь в стенках пустого резонатора, $\Delta\omega(\varepsilon)$, W_ε — абсолютная расстройка частоты при внесении образца, запасенная энергия резонатора с образцом. Введем безразмерную величину P' , характеризующую потери в диэлектрике, как:

$$P'(\varepsilon, tg\delta) = \frac{P}{\omega_0 W_0} = \frac{K(\varepsilon)}{Q_\varepsilon(\varepsilon, tg\delta)} - \frac{1}{Q_0}, \quad (3)$$

$$K(\varepsilon) = \left[1 - \frac{\Delta f(\varepsilon)}{f_0} \right] \frac{W_\varepsilon(\varepsilon)}{W_0}. \quad (4)$$

Величина $K(\varepsilon)$ определяется расчетным путем и зависит только от действительной части диэлектрической проницаемости. Тангенс угла потерь находится по рассчитанному семейству зависимостей $P'(\varepsilon, tg\delta)$ для найденного значения $\varepsilon(\Delta f)$. Точность определения тангенса угла потерь зависит также от функции чувствительности $dQ/d(tg\delta)$ резонатора.

Влияние качества контакта между крышкой и обечайкой резонатора удается значительно уменьшить использованием либо дроссельного сочленения, либо запредельного волновода. Центровка образца осуществляется за счет использования канавок на торцевой поверхности устройства измерения. Измерения проводились с использованием прибора HP Network Analyzer.

На первом этапе было проведено сравнение расчета по программе SUPERFISH с аналитическим для цилиндрического резонатора с радиусом $R = 59.23$ мм и длиной $L = 25.10$ мм, заполненного по длине диэлектриком цилиндрической формы с внутренним и наружным радиусами $r_1=23.40$ мм и $r_2=27.50$ мм. Результаты отличались по частоте в пределах 0.1%, а по добротности — 5%. Эти цифры позволяют оценить точность определения f и Q для указанной программы.

2. Апробация методики с фторопластовыми образцами

Апробация методики проводилась на примере цилиндрического резонатора в 10-см диапазоне с размерами $R = 40.22$ мм и $L = 104.10$ мм и четырех фторопластовых образцов (размеры указаны в табл. 1). Согласно справочным данным $\varepsilon=2.0-2.1$ и $tg\delta=0.0002$.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости $\Delta f(\varepsilon)$ и $P'(tg\delta)$ с нанесенными на них экспериментальными точками. Результаты измерения (табл. 2) совпадают в пределах погрешности для разных образцов.

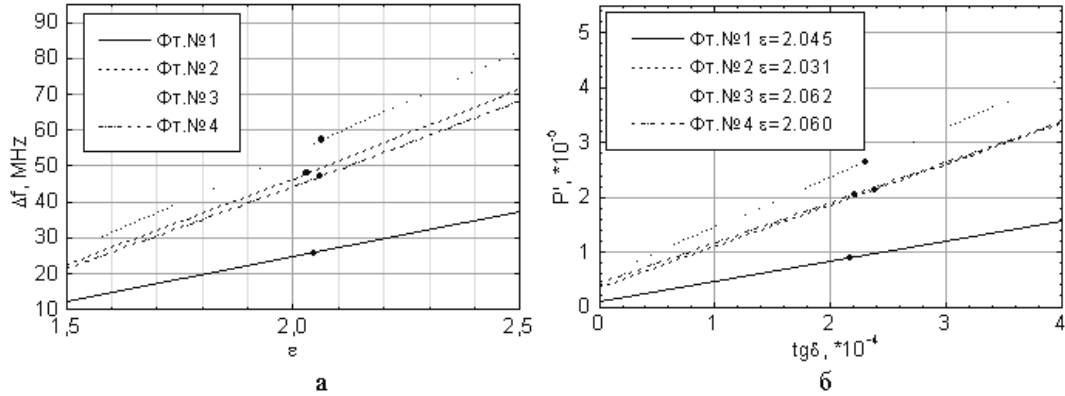


Рис. 1: Зависимости частоты от диэлектрической постоянной (а) и обобщенного параметра потерь от тангенса угла потерь (б) для фторопластовых образцов.

Таблица 2: Результаты измерений для фторопластовых образцов.

Фторопластовый образец	ε	$tg\delta, 10^{-4}$
1	2.05 ± 0.03	2.17 ± 0.15
2	2.03 ± 0.03	2.39 ± 0.15
3	2.06 ± 0.03	2.31 ± 0.15
4	2.06 ± 0.03	2.21 ± 0.15

3. Определение параметров керамических образцов

На рис. 2 изображены два варианта цилиндрических резонаторов, использованных при определении диэлектрических постоянных керамических образцов 1 и 2 из табл. 1. Оба резонатора рассчитаны на вид колебаний E_{010} . Резонатор, изображенный на рис. 2а, с запердельным волноводом круглого сечения, а резонатор, изображенный на рис. 2б, с дросселем в обечайке. В табл. 3 приведены соответствующие функции чувствительности $df_\varepsilon/d\varepsilon$ и $dQ_\varepsilon/d(tg\delta)$. Поскольку точность определения диэлектрической постоянной по результатам измерения частоты достаточно высокая для обоих вариантов конструкций, то окончательный выбор рабочего устройства определяется в значительной мере простотой конструкции и легкостью эксплуатации. Исходя из этого, предпочтение отдается для варианта рис. 2а.

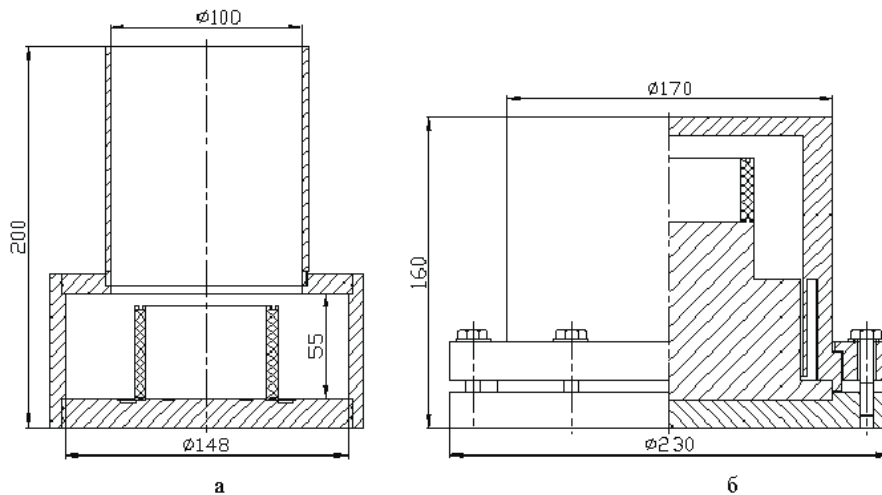


Рис. 2: Конструкции цилиндрических резонаторов: (а) – с запердельным волноводом; (б) – с дроссельным сочленением.

Таблица 3: Чувствительности характеристик резонаторов.

Керамические образцы	Резонатор с запредельным волноводом		Резонатор с дросселем	
	$df_{\varepsilon}/d\varepsilon$, МГц	$dQ_{\varepsilon}/d(tg\delta)$, 10^4	$df_{\varepsilon}/d\varepsilon$, МГц	$dQ_{\varepsilon}/d(tg\delta)$, 10^4
1	15.52	1.75	15.19	1.18
2	24.44	1.51	22.74	1.13

В табл. 4 приведены значения диэлектрической постоянной и тангенса угла потерь двух типов образцов керамик, полученные при использовании данной методики. Причем каждый из образцов был в двух экземплярах. Резонатор с дросселем был изготовлен с одной крышкой, рассчитанной для второго образца. Поэтому при помещении в него первого образца дроссель теряет свои свойства, и потери в нем увеличиваются, что, в свою очередь, влияет на точность определения добротности, а следовательно, и на точность определения $tg\delta(*)$.

Таблица 4: Результаты измерений.

Керамические образцы	Резонатор с запредельным волноводом		Резонатор с дросселем	
	$\varepsilon \pm \Delta\varepsilon$	$tg\delta \pm \Delta(tg\delta)$, 10^{-4}	$\varepsilon \pm \Delta\varepsilon$	$tg\delta \pm \Delta(tg\delta)$, 10^{-4}
1	9.41 ± 0.01	3.19 ± 0.09	9.40 ± 0.02	$3.49 \pm 0.2^*$
1'	9.29 ± 0.02	3.23 ± 0.07	9.25 ± 0.04	$4.07 \pm 0.4^*$
2	9.78 ± 0.03	2.24 ± 0.08	9.77 ± 0.02	2.30 ± 0.09
2'	9.41 ± 0.01	3.19 ± 0.06	9.41 ± 0.05	3.15 ± 0.05

Заключение

Установка на основе цилиндрического резонатора с видом колебаний E_{010} позволяет определять диэлектрические параметры керамических цилиндрических образцов с высокой точностью. А использование запредельного волновода для уменьшения влияния контактных поверхностей позволяет повысить производительность, так как смена образцов в установке происходит без дополнительных операций сборки-разборки, которые необходимы в случае применения резонатора с дросселем.

Список литературы

- [1] Brinkmann J.R. Linear Collider Projects at DESY. – Proceedings of the EPAC-98, pp.53-57, Stockholm, Sweden, 1998.
- [2] Брант А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. Изд-во физико-математической литературы. – Москва, 1963, 400 с.
- [3] Halbach K., Holsinger R.F. SUPERFISH Computer Programs for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry. Particle Accelerators, 1976, vol. 7, p.213-222.