



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Д.Р. Канделов, А. А. Кононов,
Г. К. Усков, С.П. Скулкин

Аннотация

В работе было проведено аналитическое исследование модели волноводной измерительной линии, в результате которого получена аналитическая формула для определения параметров диэлектриков по коэффициентам прохождения. В ходе эксперимента было продемонстрировано, что данная модель хорошо согласуется с экспериментом. На основе полученного математического описания предложен метод для быстрого определения электрофизических параметров. В качестве примера проведено измерение параметров ABS пластика.

Введение

3D-печать или “аддитивное производство” - относительно новая, но быстро развивающаяся технология, уже нашедшая свое применения в архитектуре, строительстве, промышленном дизайне, автомобилестроении, медицине, аэрокосмической отрасли и множестве других сфер [1]. 3D-печать может быть также использоваться для производства микроволновых и терагерцевых компонентов, охватывающих широкий спектр приложений (поглотители, волноводы, антенны, линзы) и работающих в широком диапазоне частот [2-3]. Традиционно эти компоненты изготавливаются путем механической и химической обработки.

Одним из необходимых условий для синтеза СВЧ компонентов является необходимость знания электрофизических параметров исходных материалов, для определения которых существует множество различных методов. Выбор наиболее подходящего метода измерения определяется свойствами конкретного материала (размерами и формой образца, диапазоном частот), необходимой точностью, удобством измерения, стоимостью. Существующие методы определения диэлектрической проницаемости материалов и потерь в них предполагают сложную калибровку. Кроме того, дополнительная сложность возникает в связи с тем, что используемые для 3D- печати материалы (FDM filament) от разных производителей (не смотря на одинаковые названия материалов) могут значительно отличаться по своим параметрам. Поэтому при печати СВЧ компонентов необходимо измерить параметры используемого диэлектрика для внесения корректировок в печатаемую модель. Исходя из вышесказанного данная работа посвящена разработке метода измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектрических материалов, используемых при FDM 3D-печати.



Рис. 1. Схема измерительной линии

Волновое сопротивление волновода:

$$R(\varepsilon, f) = \frac{2b}{a} \cdot \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{c}{2fa}\right)^2}}, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала внутри волновода, f – частота сигнала, b – высота поперечного сечения волновода, a – ширина поперечного сечения волновода, c – скорость света в вакууме.

Длина волны в волноводе:

$$\lambda(f, \varepsilon) = \frac{c}{f \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{c}{2fa}\right)^2}}, \quad (2)$$

$$\theta(\varepsilon, f, L) = \frac{2\pi L f}{\lambda(f, \varepsilon)} = \frac{2\pi L f}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{c}{2fa}\right)^2}. \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = S \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ a_1 \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix}, T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

$$T_{11} = \frac{-\det(S)}{S_{21}}; T_{12} = \frac{S_{11}}{S_{21}}; T_{21} = \frac{-S_{22}}{S_{21}}; T_{22} = \frac{1}{S_{21}}, \quad (6)$$

где $\det(S)$ – определитель матрицы S .

$$S_{11} = \frac{T_{12}}{T_{22}}; S_{12} = \frac{-\det(T)}{T_{22}}; S_{21} = \frac{1}{T_{22}}; S_{22} = \frac{-T_{21}}{T_{22}} \quad (7)$$

$$S_{11}(R_1, R_2) = \frac{\frac{R_2-1}{R_1}}{\frac{R_2+1}{R_1}} = \frac{R_2-R_1}{R_2+R_1}, \quad (8)$$

где R_1 – волновое сопротивление первой, а R_2 – волновое сопротивление второй линии передачи

$$S_{21}(R_1, R_2, \theta) = \frac{2\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}}{\frac{R_2+1}{R_1}} e^{-i\theta} = \frac{2\sqrt{R_1 R_2}}{R_2+R_1} e^{-i\theta}, \quad (9)$$

где θ – сдвиг фазы при прохождении второй линии передачи.

$$T = T^1 T^2 T^3 T^4 T^5, \quad (10)$$

где T^1 - T^5 – матрицы Т-параметров, соответствующие номерам блоков в обозначениях рисунка 1.

$$S_{21} = \frac{1}{T_{22}} = \frac{4R_1 R_2}{e^{2i\theta_2} (4R_1 R_2 \cos\theta_3 + 2i(R_2^2 + R_1^2) \sin\theta_3)}, \quad (11)$$

где θ_2 – прирост фазы при прохождении прямоугольного волновода, заполненного воздухом (блок 2 и 4 в обозначениях рисунка 1), θ_3 – прирост фазы при прохождении прямоугольного волновода, заполненного исследуемым диэлектриком.

$$S_{21} = \frac{\sqrt{(2fa)^2 - c^2} \cdot \sqrt{(2fa)^2 \varepsilon - c^2} \cdot e^{-2iQ_1}}{\sqrt{(2fa)^2 - c^2} \sqrt{(2fa)^2 \varepsilon - c^2} \cos Q_2 + i \sin Q_2 (2(fa)^2 (\varepsilon + 1) - c^2)} \cdot \quad (12)$$

где ε – искомая диэлектрическая проницаемость, в общем случае являющаяся комплексной величиной.

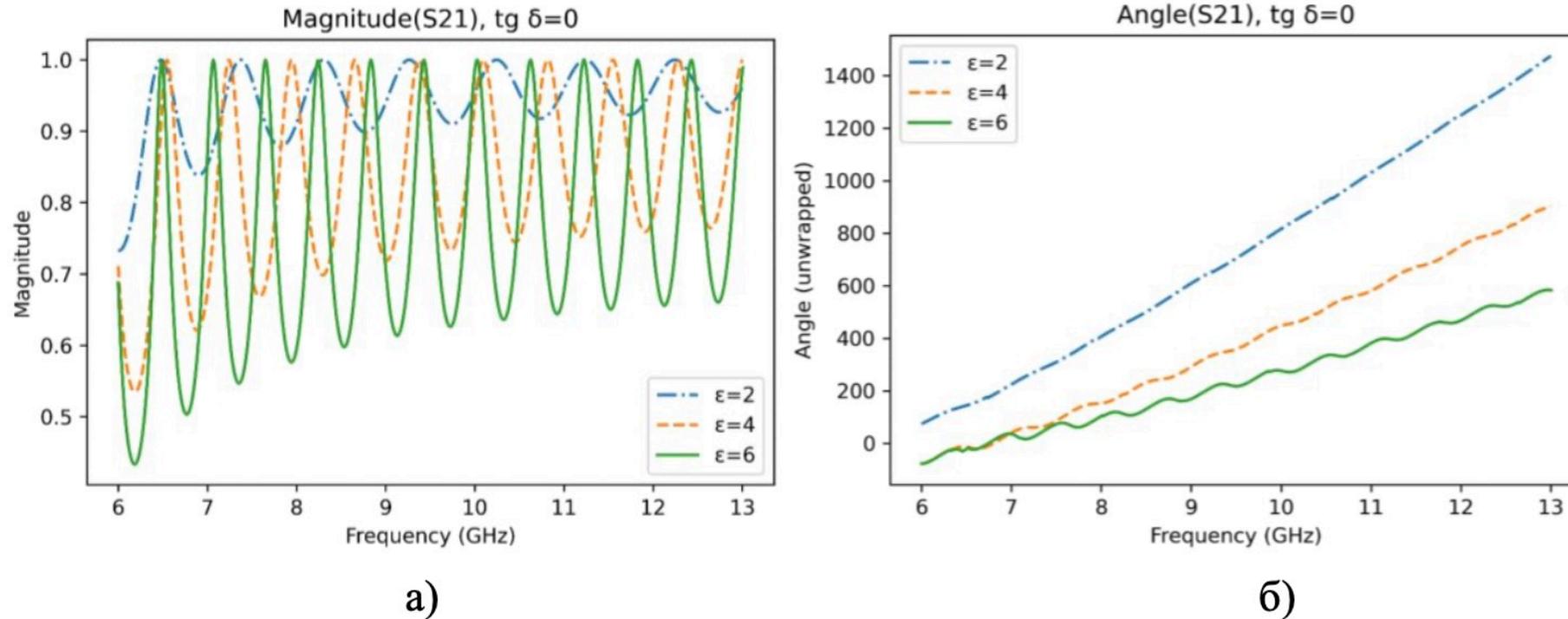
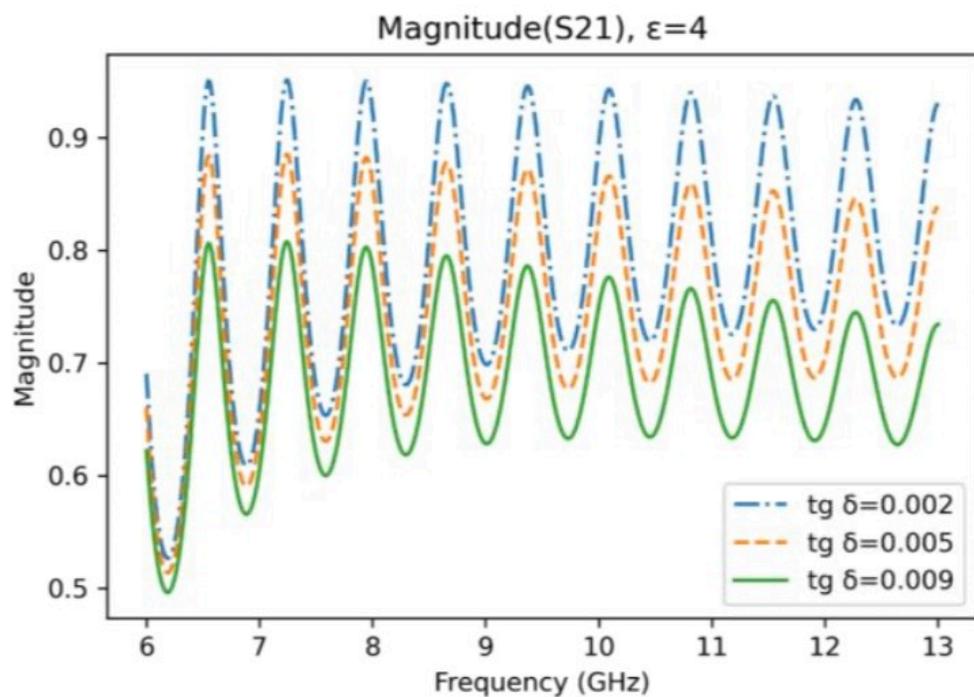
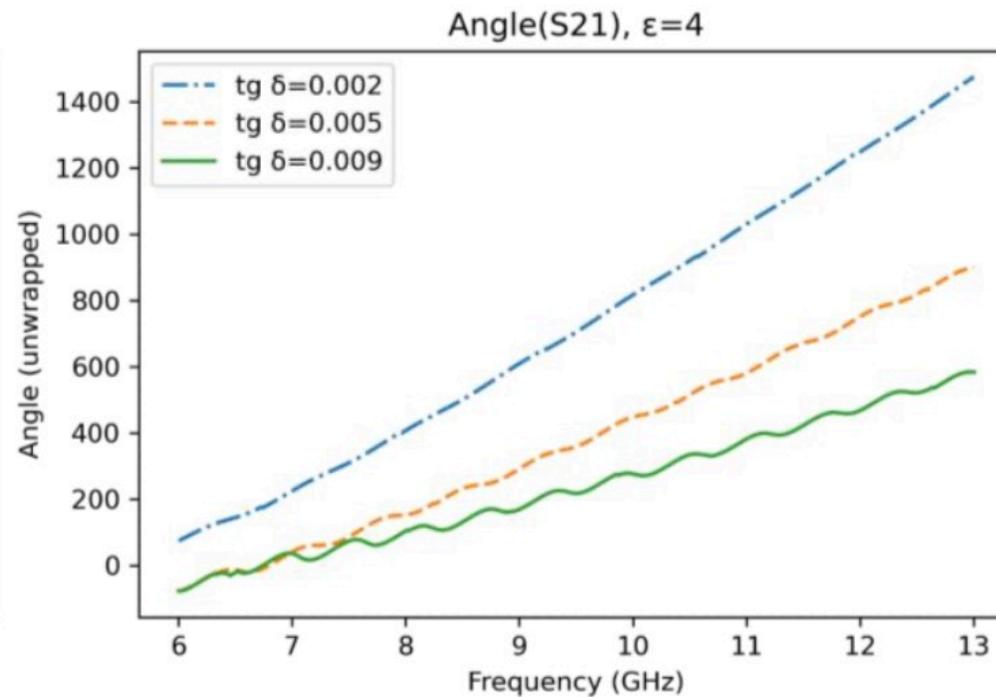


Рис. 2. Рассчитанные по формуле (11) модуль (а) и аргумент (б) S_{21} для линий передачи без потерь для различных диэлектрических проницаемостей.



а)



б)

Рис. 3. Рассчитанные по формуле (11) модуль (а) и аргумент (б) S_{21} для линий передачи при различных потерях в диэлектрике и фиксированной $\epsilon = 4$.



Рис. 3. Фотография измерительного тракта.

$$f(\epsilon, \delta) = \sum_i (y_i - f_i(\epsilon, \delta))^2, \quad (13)$$

где y_i – значение, полученное в эксперименте для i -й частоты, f – функция, представляющая теоретическую модель для частоты, ϵ – диэлектрическая проницаемость, δ – тангенс угла потерь, i – индекс частоты.

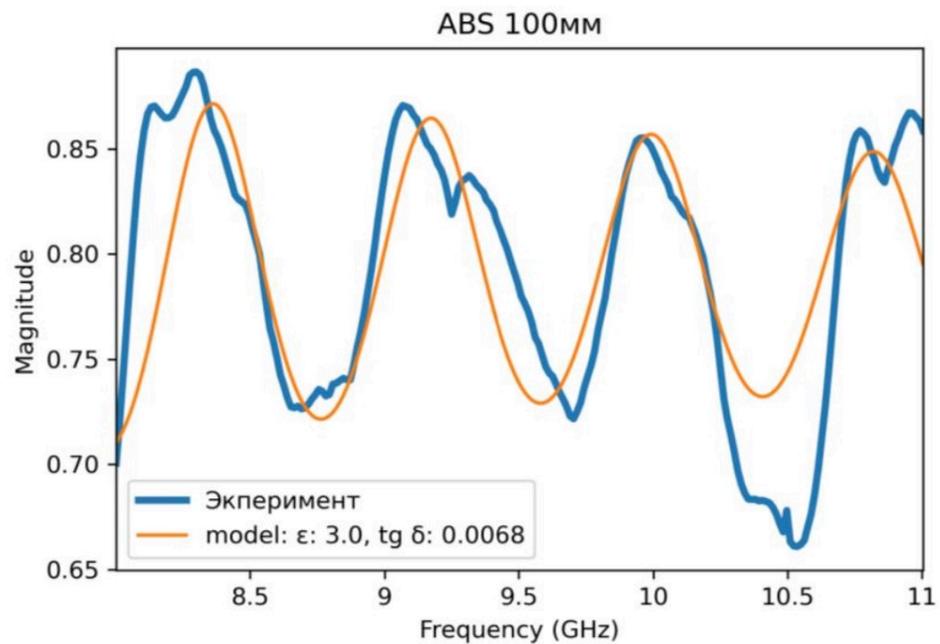


Рис.4. Экспериментальное измерение $|S_{21}|$ для образца из ABS пластика длиной 100 мм и результат полученный на основе предложенной модели.

Таблица 1. Результаты измерений

Тип пластика	ABS
Длина образца, мм	100
Диэлектрическая проницаемость	0.3
Тангенс угла потерь	$6.8 \cdot 10^{-3}$

Заключение

В работе было проведено аналитическое исследование модели измерительной линии, в результате которого получена аналитическая формула для определения параметров материала. В ходе эксперимента было продемонстрировано, что данная модель довольно хорошо согласуется с экспериментом, что позволяет использовать основанный на данной модели метод для быстрого измерения электрофизических параметров материалов. В частности, он может быть использован для оценки характеристик диэлектриков в СВЧ диапазоне при изготовлении диэлектрических линзовых антенн методом 3D-печати.

Спасибо за внимание!