

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы

4.6.1

Интерференция электромагнитных волн миллиметрового диапазона

Соболевский Федор Александрович

Старокожко Иван Георгиевич

Б05-111

Апрель 2023

Аннотация

В данной работе были изучены электромагнитные волны миллиметрового диапазона, их проникающая способность и интерференция. Для исследования явления интерференции были применены два различных интерферометра. На основе полученных данных экспериментально определена длина волны излучения, а также коэффициент преломления диэлектрической пластины. Также экспериментально проверен закон Малюса.

Теоретические сведения

Когерентные электромагнитные волны миллиметрового диапазона, как и световые волны, интерферируют между собой. Если в некоторой точке пространства происходит суперпозиция двух когерентных одинаково поляризованных волн с интенсивностями I_1 и I_2 и с разностью фаз φ , то интенсивность I результирующего колебания определяется соотношением

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (1)$$

Интенсивность максимальна при $\varphi = 2\pi m$, минимальна при $\varphi = (2m + 1)\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$).

Для получения когерентных электромагнитных волн чаще всего применяют установки, с помощью которых излучение от одного источника раскладывается на две составляющие с некоторой разностью хода между ними. Оптическая разность хода Δ и разность фаз связаны соотношением

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}. \quad (2)$$

В настоящей работе оптическая разность хода определяется геометрией установок, а также оптическими плотностями сред, через которые проходит свет: оптический ход луча прямо пропорционален коэффициенту преломления среды.

В случае, когда линейно поляризованная электромагнитная волна падает на зеркало, интенсивность отражённой волны может уменьшаться в зависимости от угла падения. Эта зависимость определяется *законом Малюса*: результирующая интенсивность I зависит от интенсивности падающей волны I_0 и угла падения α как

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

Ход работы, результаты

Установка

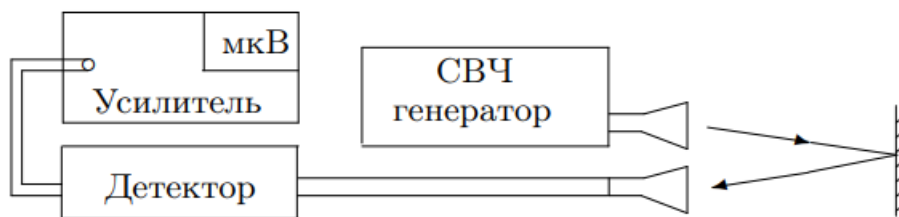


Рис. 1: Схема приёмно-передающей системы СВЧ-диапазона

Для генерации и приёма волн СВЧ-диапазона использовалась установка, изображённая на рис. 1. Применяемый в настоящей работе передатчик излучает линейно поляризованную волну с частотой $\nu \approx 36$ ГГц, электрический вектор \mathbf{E} которой направлен вертикально. Приёмник также может принимать только линейно поляризованную волну, причём в ходе опытов он работал

в квадратичном режиме, поэтому полученные на усилителе сигналы были пропорциональны интенсивности излучения. Для изменения угла отражения волны зеркало (металлическая пластинка) было установлено на вращающейся подставке.

Установка была настроена и отъюстирована, на вольтметре приемника был получен максимальный сигнал. Затем на пути СВЧ волн были помещены различные препятствия для исследования их проницаемости:

- Бумажный лист незначительно ослабил сигнал.
- Диэлектрическая пластинка более значительно изменила сигнал, чем бумага, но не погасила совсем.
- Металлический лист полностью перекрыл волны, отразив и частично поглотив их.

Проверка закона Малюса

При изменении угла падения в пределах от 0° до 37° между выходным напряжением приемника и квадратом косинуса угла действительно наблюдалась примерно линейная зависимость, что позволяет утверждать о выполнимости закон Малюса и линейной поляризованности волн в эксперименте. Результаты измерений представлены в таблице 1 и графике 2.

$\theta, ^\circ$	$\cos \theta$	$\cos^2 \theta$	$I, \text{мкВ}$
37	0,800	0,64	0
32	0,849	0,72	8
27	0,892	0,80	20
22	0,927	0,86	36
17	0,957	0,92	46
12	0,977	0,96	59
7	0,992	0,99	68
0	1	1,00	76

Таблица 1: Зависимость интенсивности отражённого луча от угла падения

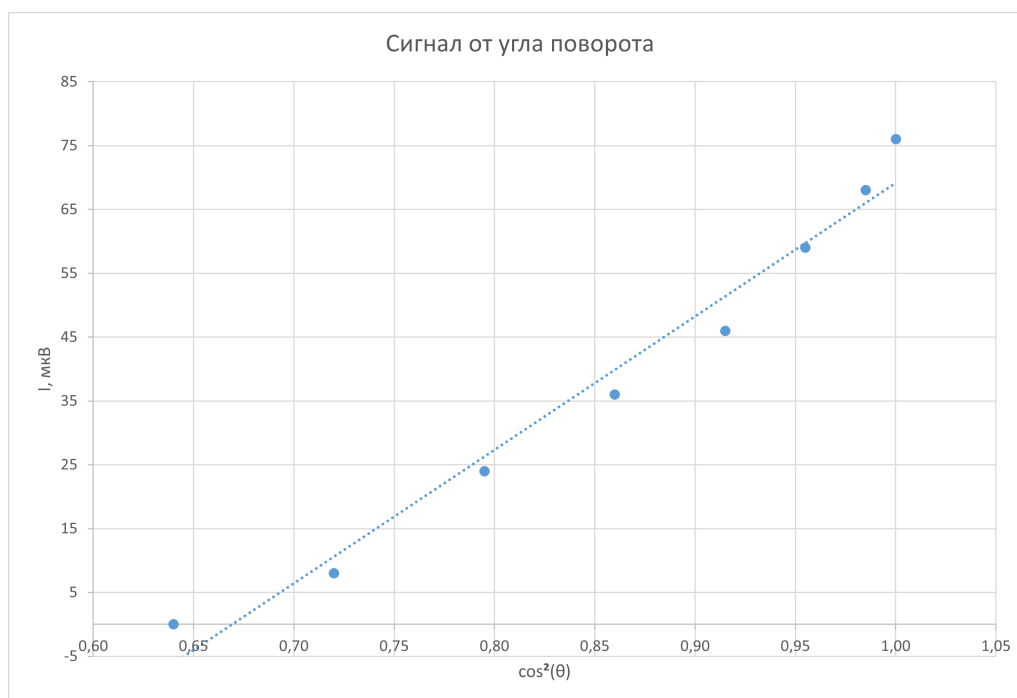


Рис. 2: График зависимости интенсивности отраженной волны от угла падения

Интерференция волн, отражённых от зеркала и решётки

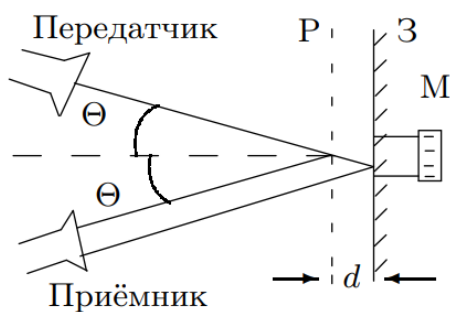


Рис. 3: Схема №1 с зеркалом и решёткой для наблюдения интерференции радиоволн

Для исследования интерференции миллиметровых волн была собрана и отъюстирована на максимальный сигнал установка с рис. 3. Между приемником и излучателем была помещена металлическая решетка Р, частично пропускающая сигнал до зеркала З, в результате чего получались две компоненты излучения с разностью хода между ними, равной $\Delta = 2d \cos \theta$.

Изменяя расстояние между зеркалом и решеткой при помощи микрометрического винта, мы измерили зависимость интенсивности принимаемого сигнала от координаты x подвижного зеркала. Результаты представлены на графике 4 ниже и таблице 2 в приложении.

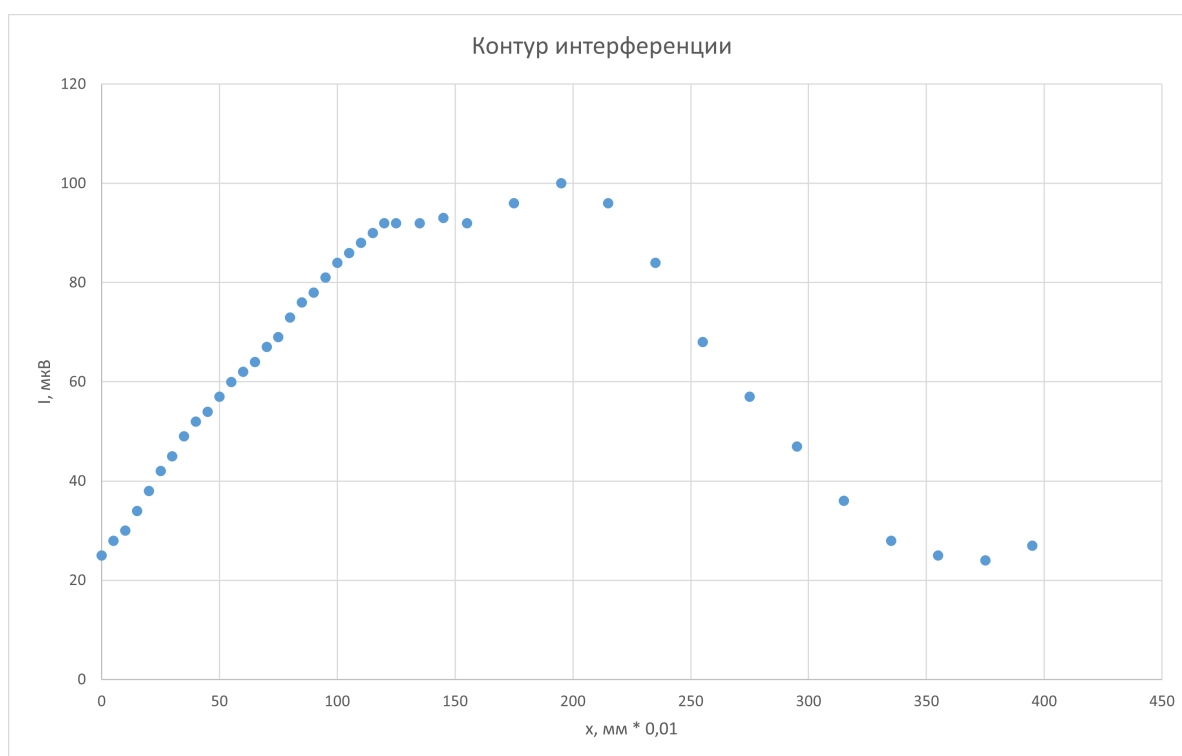


Рис. 4: График зависимости интенсивности от расстояния между зеркалом и решёткой

По графику видно, что период изменения интенсивности равен $x = (4,3 \pm 0,2)$ мм, где погрешность определяется преимущественно погрешностью измерения длины. Отсюда с учётом $\theta \approx 0^\circ$ длина волны составляет $\lambda = (8,6 \pm 0,4)$ мм. При этом частота волн, генерируемых в установке соответствует длине волны $\lambda_{\text{ген}} \approx 8,3$ мм, что совпадает с полученным экспериментально значением в пределах одного стандартного отклонения.

Интерферометр Майкельсона

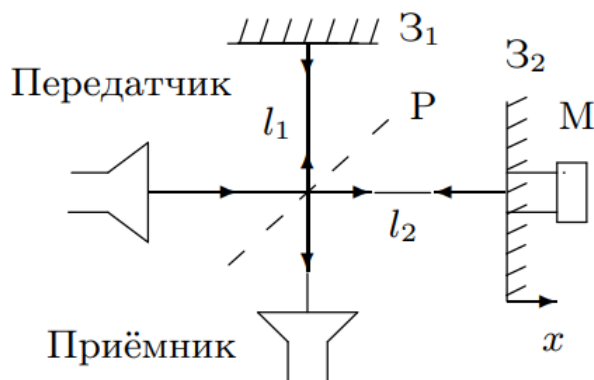


Рис. 5: Интерферометр Майкельсона

В данной части работы использовалась установка, представленная на рис. 5 — интерферометр Майкельсона. Изменение координаты отражающей подвижной пластинки приводит к изменению интерференционной картины и чередованию максимумов и минимумов на приемнике. Снятая зависимость номера максимума от координаты представлена на графике 6 и в таблице 3 приложения.

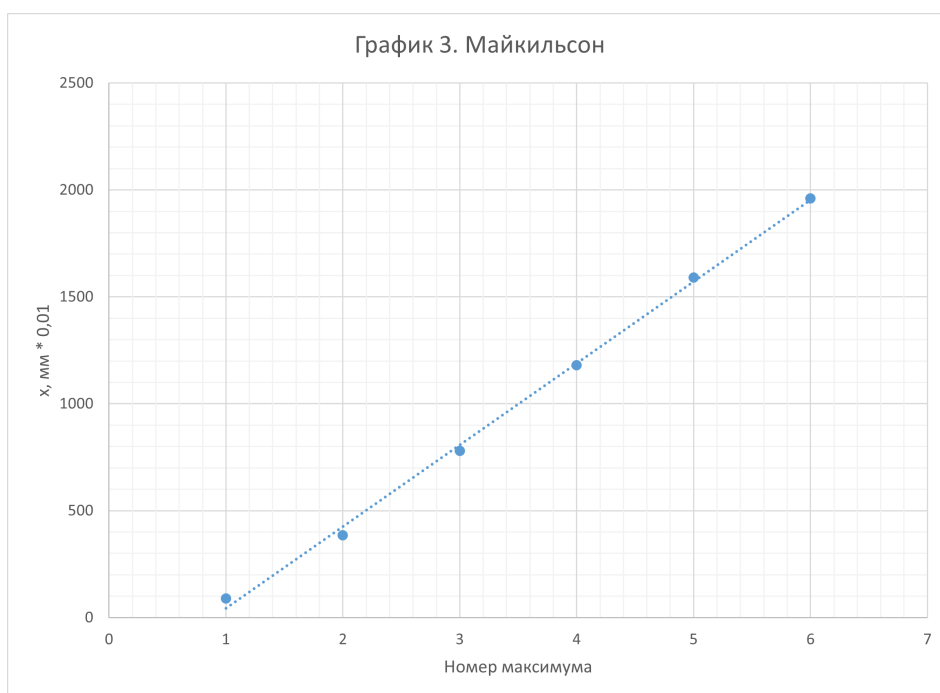


Рис. 6: График зависимости координаты интерференционного максимума от его номера

Из графика по коэффициенту наклона определяется длина волны излучения: $\lambda_M = (7,6 \pm 0,4)$ мм. Погрешность определяется методом наименьших квадратов и погрешностью измерения длины.

Определение показателя преломления пластинки

Поместив в точку интерференционного максимума перед подвижным зеркалом пластинку из диэлектрика, мы наблюдали уменьшение напряжения на вольтметре, что свидетельствует об

изменении разности хода лучей. Компенсируя его смещением отражающей пластинки, мы измерили добавочную разность хода: $\Delta = (1,13 \pm 0,02)$ мм. Данное значение было измерено по графику 7 как смещение интерференционного максимума относительно начала измерений.

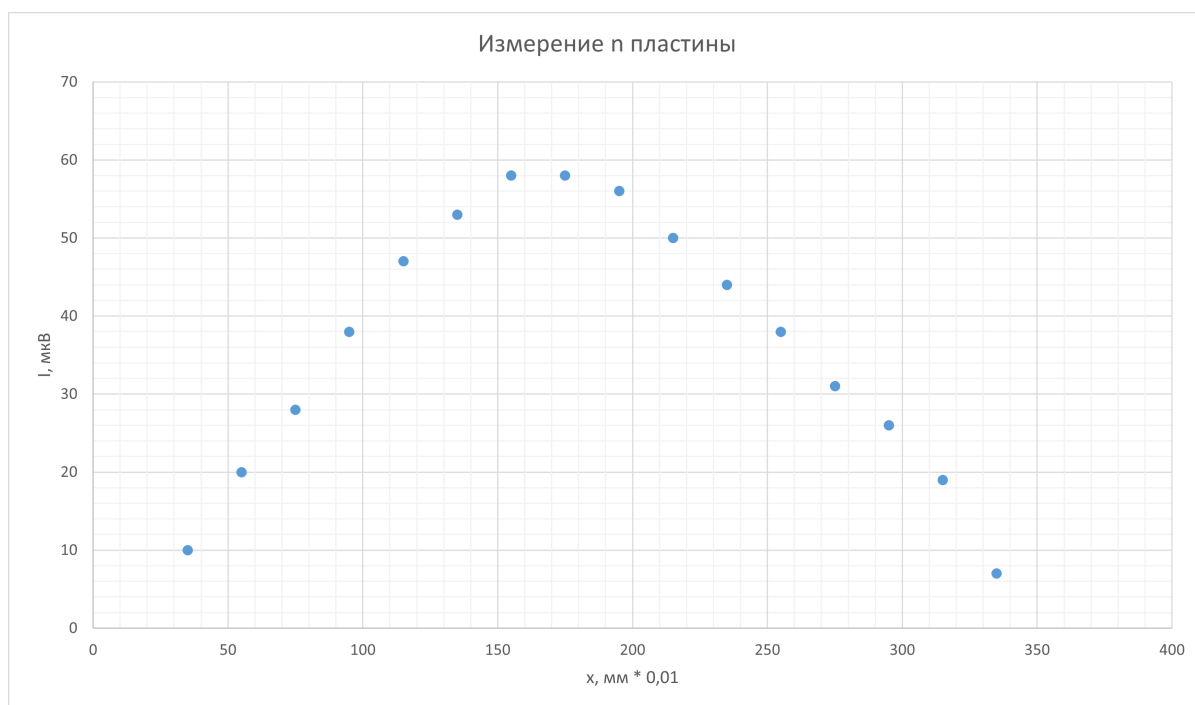


Рис. 7: График зависимости зависимости интенсивности от смещения зеркала при добавлении диэлектрика

Используя формулу $\Delta = h(n - 1)$, где толщина пластинки $h = 3,25$ мм (здесь старый ход лучей — $l_0 + h$, новый — $l_0 + nh$), получаем показатель преломления материала пластинки: $n = 1,34 \pm 0,03$. Табличное значение — $n_{\text{tab}} = 1,34$ — совпадает с измеренным в пределах погрешности.

Выводы

При помощи оптических схем можно изучать радиоволны СВЧ-диапазона. При с достаточно высокой точностью можно определить такие параметры излучения, как длина волны. При помощи интерферометра Майкельсона можно также определить показатель преломления пластинки из диэлектрического материала.

Приложение

$x, \text{ мм} \cdot 10^{-2}$	U, мВ	$x, \text{ мм} \cdot 10^{-2}$	U, мВ
0	25	100	84
5	28	105	86
10	30	110	88
15	34	115	90
20	38	120	92
25	42	125	92
30	45	135	92
35	49	145	93
40	52	155	92
45	54	175	96
50	57	195	100
55	60	215	96
60	62	235	84
65	64	255	68
70	67	275	57
75	69	295	47
80	73	315	36
85	76	335	28
90	78	355	25
95	81	375	24
100	84	395	27

Таблица 2: Зависимость интенсивности от расстояния между зеркалом и решёткой

№	$x, \text{ мм} \cdot 10^{-2}$
1	90
2	385
3	780
4	1180
5	1590
6	1960

Таблица 3: Зависимость координаты интерференционного максимума от его номера