

## **КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ**

### **Введение**

В современной радиофизике особо важное значение приобретает диапазон волн, имеющих длину волны меньшую, чем стандартный СВЧ диапазон. Это диапазон миллиметровых и субмиллиметровых (ММ и СБММ) волн. Уже из названия видно, что длина волны этого излучения лежит в диапазоне  $\lambda=0,1 \dots 1,0$  мм. Настоящая задача посвящена ознакомлению с техникой и методикой работы с этим излучением.

Исторически в силу ряда причин освоение ММ и СБММ диапазона оказалось не совсем простым. Главная проблема связана с созданием генераторов и усилителей ММ и СБММ излучения, способов эффективной передачи и с методикой работы с таким излучением. Попытки распространить простым масштабированием на эти частоты методы генерации, передачи и детектирования, традиционных для более длинноволнового сантиметрового диапазона, натолкнулись на ряд трудностей. Прежде всего, ясно, что объемные резонаторы и замедляющие системы на которых основано действие усилителей и генераторов, должны иметь размеры порядка половины длины волны  $\lambda/2$ . На практике, однако, оказывается довольно трудно обеспечить точность, требуемую при механическом изготовлении соответствующих деталей и фокусировку электронного луча. Для мощных приборов обеспечение теплоотвода также является проблемой.

Передача энергии ММ и СБММ волн по традиционному для сантиметрового диапазона полному волноводу с размерами  $\sim \lambda$  также затруднена из-за роста коэффициента затухания энергии с уменьшением сечения волновода, который на длине волны  $\lambda \sim 0,2$  мм достигает совершенно неприемлемых величин  $\sim 100$  дБ/м [1,2]. Вдобавок, реальное затухание в волноводах оказывается еще большим, примерно в 2 раза [1,2], из-за дефектов и шероховатостей их поверхности. Один из путей уменьшения затухания при передаче излучения высокого уровня мощности состоит в использовании сверхразмерных волноводов, поперечные размеры которых много больше  $\lambda$ . Однако из-за этого структура поля в таких волноводах оказывается чересчур сложной. Поэтому приходится применять специальные меры, снижающие потери мощности, возникающие в результате преобразования рабочего типа волны в другие типы волн в многомодовой системе. Для передачи излучения небольшой мощности в настоящее время в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах широкое применение получили полосковые линии передачи, частично или полностью заполненные диэлектриком для улучшения их характеристик.

Перечисленные факторы стали причиной того, что ММ и СБММ диапазоны оставались практически неосвоенными по сравнению с соседними микроволновым и инфракрасным. Не случайно этот диапазон получил название "субмиллиметрового провала". Среди всех путей "наступления" на этот провал (см. [3]) наибольший успех выпал на долю последовательно развиваемой методики, основанной на использовании специальных генераторов ММ и СБММ излучения - ламп обратной волны (ЛОВ) и диодных генераторов. Так же как клистроны и магнетроны, ЛОВ является классическим электровакуумным микроволновым генератором, обладающим двумя важными особенностями: она способна генерировать монохроматическое излучение очень коротких длин волн (до 0,2 мм) и плавно перестраивать частоту рабочего излучения в широких пределах - до  $\pm 30$  % от величины центральной частоты [3].

Для исследований в этом диапазоне была разработана весьма удобная методика работы с ММ и СБММ излучением, которая основана на применении пучков, распространяющихся в открытом пространстве без металлических или диэлектрических волноводов. При этом для управления излучением используются "обычные оптические" элементы - линзы, металлические зеркала, призмы, дифракционные решетки и т. д. В силу аналогии с оптическими методами соответствующие методики работы в области ММ и СБММ получили название квазиоптических. С применением этой методики были решены и продолжают с успехом решаться многие важные физические задачи фундаментального и прикладного плана.

Будучи квазиоптическими, эти методики по своей сути полностью идентичны оптическим: излучение распространяется в свободном пространстве, может преломляться при прохождении через призмы, фокусироваться линзами, отражаться от зеркал и т. д. С другой стороны, в отличие от видимого диапазона, где длина волны составляет несколько сот ангстрем, длина волны в ММ и СБММ области значительно больше, что значительно упрощает изготовление приборов и проведение экспериментов. Так, например, для изготовления дифракционной решетки уже нет необходимости соблюдать оптические точности при нанесении штрихов. Достаточно, скажем, располо-

жить в плоскости 10-20 параллельно установленных металлических проволочек с периодом в несколько миллиметров, или нанести на прозрачную пленку металлические полосы шириной порядка длины волны. Именно такая конструкция решеток используется в настоящей задаче. Упрощаются и требования к механической обработке деталей, где допустимы погрешности порядка  $0,1 \lambda$ .

### Экспериментальная установка

В данной задаче используются практически все вышеперечисленные элементы. Они закрепляются на общем металлическом основании (плите) с помощью резьбовых отверстий, просверленных по всей площади плиты с шагом 2,5 см. Миллиметровое излучение, излучаемое генератором в открытое пространство, формируется линзой в плоскопараллельный пучок, распространяющийся над плитой. Вторая линза фокусирует излучение на приемник. Между генератором и приемником располагаются различные экспериментальные объекты: интерферометр Фабри-Перо, преобразователь поляризации излучения, дифракционная решетка, диэлектрическая пластинка переменной толщины.

В качестве генератора излучения используется лавинно-пролетный диод (ЛПД) [4]. В данной работе частота ЛПД не перестраивается. Выбор был обусловлен тем, что генераторы на ЛПД по сравнению с ЛОВ намного более просты в эксплуатации, дешевы, более компактны и не требуют для питания высоких напряжений. Мощность излучения используемого ЛПД составляет несколько мВт, длина волны  $\lambda=2,14$  мм. На выходном волноводе генератора установлен ферритовый вентиль, изолирующий генератор от отраженного излучения. В открытое пространство излучение выходит через рупор. Ширина диаграммы направленности на выходе из рупора  $\pm 10^\circ$  на уровне половины интенсивности. Поляризация излучения линейная, электрический вектор перпендикулярен широкой стенке волновода и направлен вертикально.

В качестве детектора излучения используется пироэлектрический приемник [5] на основе кристалла  $\text{LiTaO}_3$ . Пироприемник преобразует изменения температуры, связанные с периодическим импульсным нагревом пироэлектрического элемента на основе кристалла в переменное напряжение этой же частоты, причем это напряжение пропорционально мощности излучения. Являясь тепловым приемником излучения, пироприемник обладает широкой спектральной областью чувствительности от миллиметрового диапазона частот до оптического диапазона и одновременно имеет достаточно малую постоянную времени.

Электронная система питания генератора и синхронного детектирования сигнала собрана в виде отдельного блока. Напряжение с пироприемника усиливается предварительным усилителем и преобразуется синхронным детектором в постоянное напряжение, пропорциональное мощности излучения, падающего на пироприемник. Электронный блок содержит также источник импульсного напряжения 20 Гц для питания ЛПД и генератор опорного напряжения той же частоты для синхронного детектора. Кроме того, в электронном блоке сигнал с предусилителя дополнительно усиливается, причем коэффициент усиления может меняться плавно потенциометром и дискретно 1:10, 1:100, 1:1000 переключателем входного аттенюатора, ручки которых выведены на переднюю панель блока. Там же для регистрации сигнала расположено табло вольтметра. На задней панели электронного блока имеются гнезда для подключения внешнего вольтметра.

Для устранения насыщения при усилении сигнала в электронном блоке (при напряжении на выходе более 13 В), а также для улучшения развязки между исследуемым устройством и генератором, в тракт может вводиться пленочный аттенюатор, выполненный в виде тонких (много меньше скин слоя для ММ-излучения) металлических пленок, нанесенных на тонкую (много меньше  $\lambda$ ) лавсановую пленку. Аттенюатор содержит набор из 4 пленок, помещенных в кассету. Эффективный рабочий диаметр аттенюаторов около 70 мм. Ослабление - ступенчатое, с шагом 8-10 дБ.

В работе рекомендуется установить дискретный переключатель аттенюатора в положение 1:100 ( $10^2$ ) и юстировкой элементов установки добиться максимального сигнала на детекторе (6-12 В). В случае уменьшения сигнала переключить аттенюатор в положение 1:10 ( $10^1$ ) и при необходимости плавно отрегулировать потенциометром.

Для фокусировки излучения применяются линзы, изготовленные из тефлона. Этот материал имеет практически нулевые потери на миллиметровых волнах, легко обрабатывается механически, что делает его весьма удобным для изготовления различных элементов квазиоптической техники.

## Упражнение 1. Измерение длины волны генерации в открытом волноводном тракте с помощью интерферометра Фабри-Перо.

Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) образуют две полупрозрачных плоских отражающих поверхности (зеркала) [6]. Если излучение падает нормально на такую систему, то оно оказывается "замкнутым" между двумя зеркалами, многократно переотражаясь от одного к другому. При этом происходит частичное поглощение излучения в материале зеркал, частичное прохождение сквозь ИФП и отражение от него. Если зеркала имеют не бесконечные поперечные размеры, то имеют место дифракционные потери.

Коэффициент пропускания ИФП дается следующим выражением:

$$T = \frac{t^2}{(1-r)^2 + 4r \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (1)$$

где  $t$  и  $r$  есть коэффициенты пропускания и отражения отдельно взятого зеркала, соответственно,  $\delta=4\pi d/\lambda$ ,  $d$  - расстояние между зеркалами и  $\lambda$  - длина волны излучения. Из формулы видно, что при  $\delta/2=2\pi m$  ( $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) наблюдается максимум пропускания. В этом состоит наиболее известное и часто используемое свойство ИФП: он прозрачен для излучения с длиной волны  $\lambda$ , если расстояние  $d$  между зеркалами кратно  $\lambda/2=\Delta d$ . Если это условие нарушается, то ИФП непрозрачен для излучения и отражает его назад. В результате на зависимости пропускания от длины волны наблюдаются пики при  $\lambda=2\Delta d/m$ , которым соответствуют минимумы в спектре коэффициента отражения. Как следует из формулы (1), такие же максимумы (минимумы) будут наблюдаться, если длина волны остается постоянной, но изменяется расстояние между зеркалами  $d$ , что демонстрирует Рис.1. (Именно это свойство ИФП будет использовано ниже).

К важнейшим характеристикам ИФП относятся *резкость*  $F$ , *контрастность*  $\xi$  и пропускание в максимуме  $\tau_{\max}$ . Можно показать, что эти величины выражаются так:

$$F = \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r} = \frac{\Delta d}{\delta d} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \left(\frac{1+r}{1-r}\right)^2 = 1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \quad (3)$$

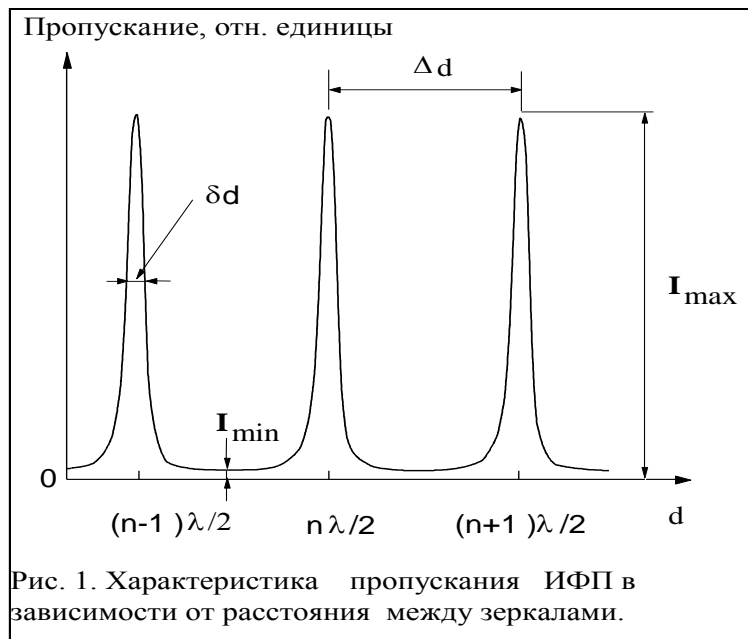
$$\tau_{\max} = \frac{t^2}{(1-r)^2} = \frac{t^2}{(t+a)^2} \quad (4)$$

где  $a$  есть коэффициент поглощения отдельного зеркала - величина, дополнительная к  $r$  и  $t$ :  $r+t+a=1$ , и  $\Delta d$  есть полуширина отдельного максимума.

Будучи одним из наиболее популярных приборов современной оптики, радиофизики и квантовой электроники, в 80-х годах ИФП был освоен также и в области ММ и СБММ квазиоптики. Здесь основными функциями ИФП являются измерение длины волны, спектральная фильтрация излучения, диэлектрические измерения, газовая спектроскопия и диагностика плазмы [1,2,3]. По сравнению с оптическим диапазоном, в области миллиметровых волн требования на механические точности изготовления ИФП намного ниже, что делает этот прибор простым в конструкции и удобным для использования. Настоящее упражнение посвящено измерению длины волны излучения с его помощью.

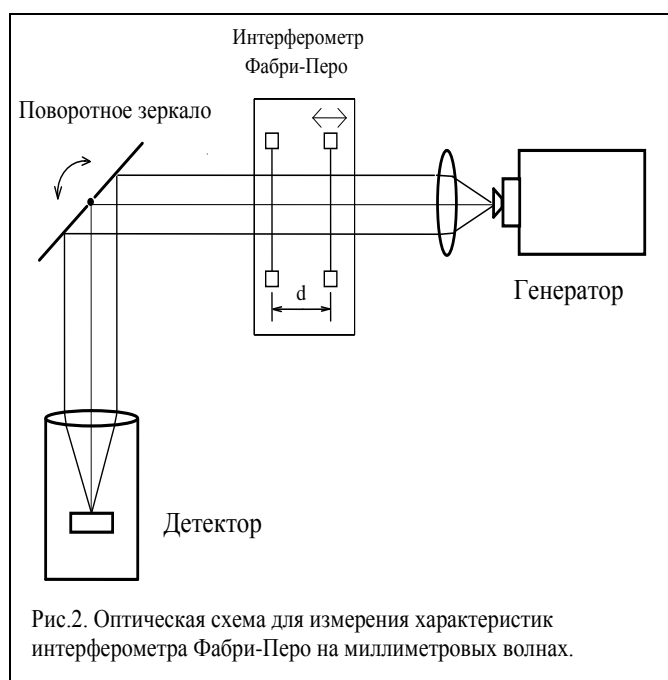
В данном эксперименте используется квазиоптический ИФП, зеркалами которого служат двухмерные изотропные металлические сетки с эффективным диаметром отражающей поверхности 40 мм и с периодом, много меньше длины волны рабочего излучения. Такие сетки изотропны, имеют высокий коэффициент отражения и малые потери [1,2,6], т.е. они весьма удобны для использования в качестве зеркал на миллиметровых волнах. Сетки установлены в специальные оправки с параллельностью не хуже 0,02 мм. Расстояние между сетками можно изменять в пределах 0-20 мм. Каждая сетка состоит из тонких (порядка 10 мкм) проводников. **ВНИМАНИЕ! Во избежание повреждения ИФП запрещается трогать пальцами поверхность сеток.**

**ВНИМАНИЕ! Во избежание повреждения ИФП запрещается трогать пальцами поверхность сеток.**



Для проведения экспериментов собирается квазиоптическая схема, показанная на Рис.2. Выходящий из генератора расходящийся пучок излучения формируется в плоскопараллельный пучок тefлоновой линзой. После прохождения через исследуемый ИФП излучение при использовании поворотного зеркала вновь фокусируется другой линзой на приемник.

При сборе и юстировке схемы генератор и приемник излучения, а также тefлоновые линзы должны быть расположены на одной линии (оптической оси) и обеспечивать максимально возможный сигнал на приемнике. Для измерения коэффициента пропускания ИФП он устанавливается приблизительно посередине между генератором и приемником. Положение ИФП также необходимо отъюстировать, ориентируясь на максимальный прошедший сигнал. Величина сигнала может оказаться недостаточно большой, что может быть связано с тем, что расстояние между отражателями ИФП соответствует не максимуму, а минимуму (см. формулу (1)). В таком случае необходимо изменить расстояние между отражателями до получения сигнала достаточного для проведения юстировки.



### Измерение длины волны излучения.

Вращая микрометрический винт ИФП, снимите зависимость интенсивности прошедшего сигнала (относительные единицы) от расстояния между отражателями ИФП. Определите длину волны излучения. Для увеличения точности измерений следует пройти  $k$  расстояний между максимумами  $(\Delta d)k$ , тогда  $\lambda=2(\Delta d)/k$ . Рассчитайте соответствующее значение частоты излучения в гигагерцах.

### Измерение характеристик ИФП

Руководствуясь формулами (1) и (2), рассчитайте величины резкости  $F$  и контраста интерферометра. Рассчитайте величины коэффициента отражения  $\gamma$  зеркала ИФП отдельно, через величины  $F$  и  $\xi$ , сравните полученные значения  $\gamma$ .

### Упражнение 2. Изучение дифракции миллиметрового излучения на металлической дифракционной решетке.

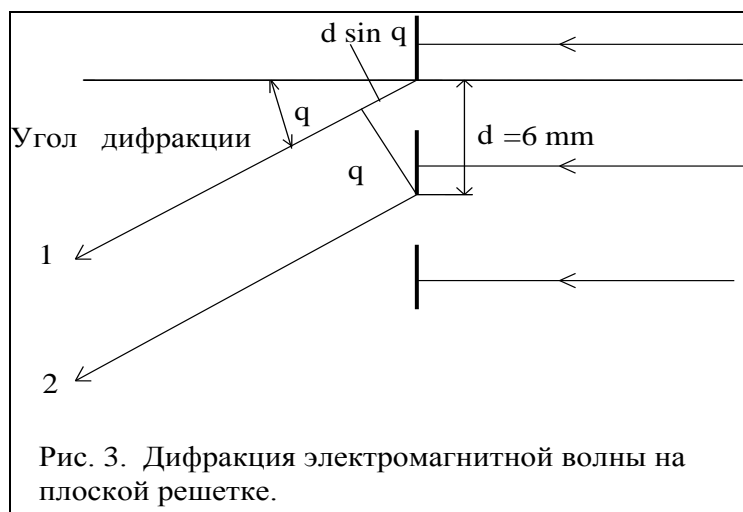
Схематически действие дифракционной решетки, состоящей из полосовых элементов, показано на Рис.3. При нормальном падении плоской монохроматической электромагнитной волны на решетку каждый ее элемент становится излучателем вторичных волн. Если период решетки  $d$ , а длина волны излучения  $\lambda$ , то вторичные волны будут переизлучаться в фазе в направлении относительно нормали к плоскости решетки, который определяется соотношением [6,8]:

$$d \sin(\theta) = \pm m\lambda \quad (5)$$

где  $m$  - целое число, определяющее порядок дифракционного максимума. Из выражения (5) видно, что при  $d < \lambda$  существует только нулевой порядок дифракции ( $m=0$ ), распространяющийся в направлении падающей волны за решеткой. Существует также отраженная волна нулевого порядка дифракции, распространяющаяся в обратном направлении под углом отражения, равным углу падения излучения на решетку. При  $d > \lambda$  возникают дифрагированные волны более высоких порядков ( $m > 0$ ), как перед решеткой, так и за ней, углы распространения которых определяются выражением (5).

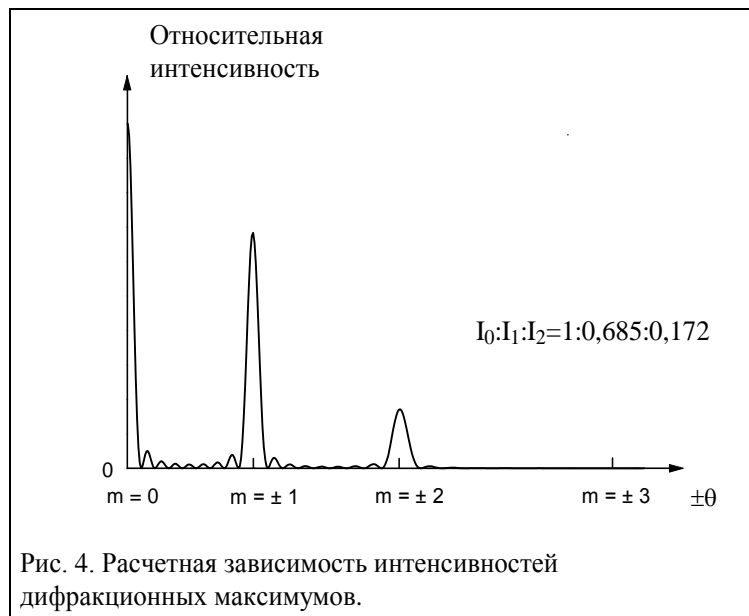
Можно показать [6], что угловое распределение интенсивности дифрагированного излучения за плоскостью решетки выражается следующей формулой

$$I(\theta) \sim \frac{\sin^2(u)}{u^2} \frac{\sin^2(Nv)}{\sin^2(v)} \quad (6)$$

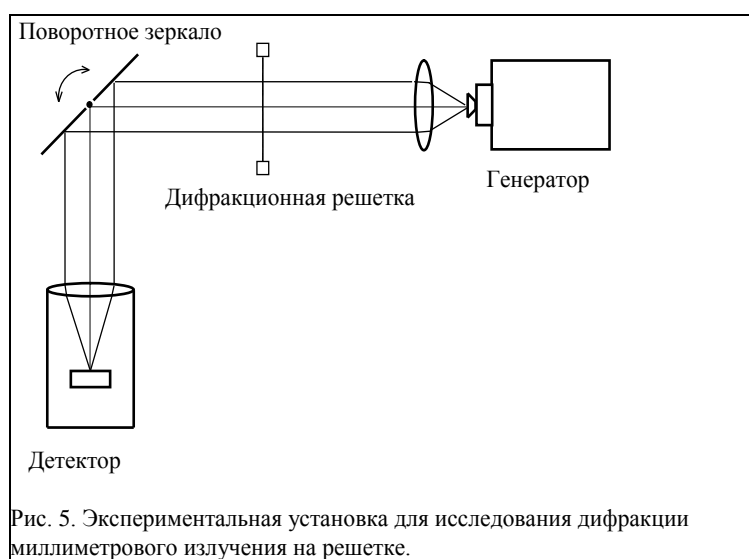


где  $u = \pi d \sin(\theta) / \lambda$ ,  $v = \pi d \sin(\theta) / \lambda$ ,  $N$  - число щелей решетки. Первый множитель описывает дифракцию на одной щели, второй — интерференцию  $N$  волн дифрагированных на  $N$  щелях. Как следует из (6), возрастание  $N$  ведет к росту добротности максимумов и разрешающей силы дифракционной решетки  $\lambda / \Delta \lambda = mN$ .

Из выражения видно также, что под углами  $\sin\theta = \pm m\lambda/d$  наблюдаются так называемые основные максимумы, между которыми при  $\sin\theta = \lambda/dN, 2\lambda/dN, \dots, (N-1)\lambda/dN$ , наблюдаются вторичные максимумы. Интенсивность вторичных максимумов по отношению к главным не превышает несколько процентов. Сказанное демонстрирует Рис.4, где показана расчетная зависимость интенсивности излучения дифрагированного под различными углами, полученная для нашего конкретного случая  $d=3a$  (период решетки  $d$  в 3 раза превышает ширину щели  $a$ ,  $\lambda=2,14$  мм,  $N=9$ ).



Дифракционная решетка изготовлена в виде металлических (Al) полос, напыленных на тонкую лавсановую пленку, натянутую на металлическую оправку. Период решетки  $d=6$  мм, ширина полос 4 мм (ширина щели  $a=2$  мм). Блок - схема экспериментальной установки показана на Рис.5. В схеме используется поворотное зеркало, что позволяет обеспечить компактность установки при сохранении возможности снятия распределения интенсивности дифрагированного излучения по углу: при неподвижных генераторе и детекторе, вращение зеркала обеспечивает попадание на детектор лучей, дифрагирующих на различные углы  $\theta$ . При этом необходимо учитывать, что, как следует из простого геометрического рассмотрения, для направления на детектор двух лучей, идущих под углом  $\theta$ , необходимо повернуть поворотное зеркало на угол  $\psi$  в два раза меньший, т.е.,  $\psi=\theta/2$ . Таким образом, искомая угловая диаграмма направленности дифрагированного излучения, полученная с помощью поворотного зеркала, будет выражаться через угол поворота зеркала  $\psi$  как  $I(\psi)=I(\theta/2)$ .



### Определение угловой диаграммы направленности рабочего излучения.

Соберите и отъюстируйте (по максимально возможному сигналу на детекторе) схему согласно Рис.5, не устанавливая дифракционную решетку. Вращая поворотное зеркало, определите угловую диаграмму направленности рабочего пучка.

### Исследование работы дифракционной решетки

В схему установите дифракционную решетку (полоски — вертикально), располагая ее по возможности ближе к поворотному зеркалу, чтобы обеспечить попадание на детектор дифрагированных волн.

Определите угловую зависимость интенсивности дифрагированного излучения  $I(\theta)$ .

Определите количество главных дифракционных максимумов. Объясните полученный результат. Определите относительную интенсивность главных максимумов и сравните полученный результат с теоретическим (см. Рис.4).

Для каждого угла  $\theta_m$  вычислите соответствующие длины волны излучения.

Разверните решетку так, чтобы полоски располагались горизонтально. Определите количество главных дифракционных максимумов.

### Упражнение 3. Методика измерения коэффициента преломления прозрачного материала

В качестве образца в данном упражнении выбран плавный кварц, практически прозрачный в данном диапазоне. Для измерения коэффициента преломления воспользуемся пластинкой, толщину которой можно менять. Такая пластинка представляет собой фактически интерферометр Фабри-Перо, зеркалами которого являются ее грани. В отличие от ИФП, использовавшегося в упражнении 1, данный ИФП "заполнен диэлектриком". Поэтому длина волны *внутри* данного ИФП будет определяться формулой:  $\lambda_{\text{диэл.}} = \lambda_{\text{вак.}}/n$ , где  $n$  - показатель преломления диэлектрика (кварца). Если теперь каким-либо способом изменять расстояние между отражателями такого ИФП (толщину пластинки), то, как и в Упражнении 1, будут наблюдаться изменение коэффициента пропускания, расстояние между максимумами которого

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2N} \quad (7)$$

Таким образом, измерив расстояние  $d$ , можно рассчитать коэффициент преломления  $n$ . Как и в случае ИФП в упражнении 1, можно определить контраст и остроту ИФП, представленного плоскопараллельной диэлектрической пластинкой:

$$\xi = \frac{T_{\text{max}}}{T_{\text{min}}} = \left( \frac{1+R}{1-R} \right)^2 \quad (8)$$

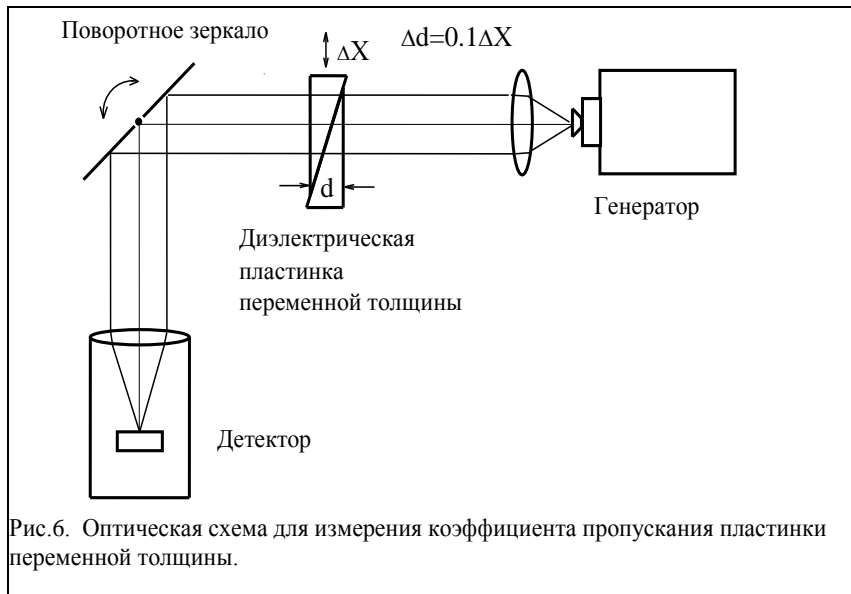
$$F = \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r} = \frac{\Delta d}{\delta d} \quad (9)$$

где  $T_{\text{max}}$  и  $T_{\text{min}}$  есть пропускание пластинки в максимуме и минимуме, соответственно,  $\Delta d$  есть расстояние между соседними максимумами,  $\delta d$  - полуширина отдельного максимума,  $R$  есть коэффициент отражения "зеркала", в данном случае представленного гранью пластинки. Величина  $R$  фактически представляет собой коэффициент отражения от границы раздела кварц - воздух и дается следующим выражением [6]:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (10)$$

Плоскопараллельная пластинка переменной толщины выполнена в виде двух кварцевых клиньев, которые могут перемещаться относительно друг друга. Один из клиньев неподвижен,

второй может перемещаться с помощью микрометрического винта. При этом угол клиньев подобран так, что изменение толщины пластинки  $\Delta d$  вычисляется как  $\Delta d = 0.1 \Delta X$ , где  $\Delta X$  - ход микрометрического винта.



Блок-схема эксперимента показана на Рис.6. Генератор, детектор и линза юстируются вдоль оптической оси системы по максимальному сигналу при помощи поворотного зеркала. После этого юстируется оправка с пластиной переменной толщины.

#### Определение коэффициента преломления плавленого кварца.

Вращая микрометрический винт, постройте зависимость пропускания пластинки от ее толщины. Определите расстояние  $\Delta d$  между соседними максимумами коэффициента пропускания. Используя величину длины волны  $\lambda = 2,14$  мм, определите величину коэффициента преломления кварца.

Определите величину контраста  $\xi$  и остроты  $F$  согласно выражениям (8-9). Используя (10), вычислите величину показателя преломления  $n$ . Сравните результаты между собой и с результатом предыдущего определения  $n$  через  $\Delta d$ .

#### Упражнение 4. Преобразование типа поляризации электромагнитного излучения.

Тип поляризации электромагнитного излучения определяется траекторией, которую описывает в пространстве конец электрического вектора  $\mathbf{E}$ . Для двух взаимно ортогональных  $x$ - и  $y$ -компонент электрического поля  $E_x$  и  $E_y$  с одинаковыми амплитудами  $a$  и с соответствующими фазами  $\delta_x$  и  $\delta_y$  соответствующая траектория вектора  $\mathbf{E}$  записывается в плоскости  $x$ - $y$  так [6,8]:

$$E_x^2 + E_y^2 - 2E_x E_y \cos(\delta_x - \delta_y) = a^2 \sin^2(\delta_x - \delta_y) \quad (11)$$

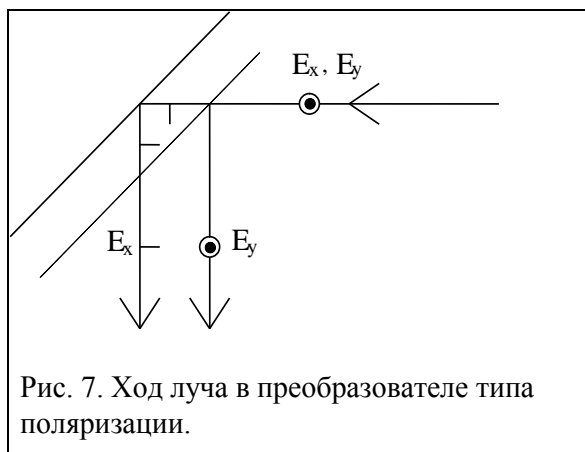
Из уравнения (11) видно, что в зависимости от разности фаз  $\delta_x - \delta_y$  между двумя компонентами поляризация будет *линейной*  $E_x = (-1)^m E_y$  при  $\delta_x - \delta_y = m\pi$  ( $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), *круговой*  $E_x^2 + E_y^2 = a^2$  при  $\delta_x - \delta_y = \pm \pi/2$  и *эллиптической* во всех остальных случаях.

Основным поляризационным элементом миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн является одномерная проволочная решетка [3]. Решетки состоят из натянутых на круглую металлическую оправку тонких (порядка 15 мкм) проводников с периодом много меньшим длины волны рабочего излучения.



**ВНИМАНИЕ! Во избежание повреждения запрещается трогать пальцами поверхность проволочных решеток поляризатора и анализатора.**

Излучение с поляризацией  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{l}$ , где  $\mathbf{l}$  - направление проволочек, будет индуцировать токи в проводниках и эффективно отражаться от решетки. Это так называемый случай E - поляризации (индуктивная решетка). В случае H - поляризации, когда вектор  $\mathbf{E}$  волны перпендикулярен проводникам (емкостная решетка), коэффициент отражения будет мал, и волна будет проходить сквозь решетку практически невозмущенной. В промежуточном случае, когда вектор  $\mathbf{E}$  направлен под углом  $\alpha$  по отношению к проводникам, компонента  $\mathbf{E} \cos \alpha$  отразится от решетки, а компонента  $\mathbf{E} \sin \alpha$  пройдет сквозь решетку.



На основе решеток строятся самые различные приборы, предназначенные для анализа, управления и преобразования миллиметрового и субмиллиметрового излучения: поляризаторы, анализаторы, делители пучка, зеркала, компенсаторы, преобразователи поляризации. В рамках настоящего упражнения описывается работа преобразователя поляризации.

Преобразователь поляризации дает возможность получать различные типы поляризации излучения путем плавного изменения разности фаз между двумя взаимно ортогональными компонентами электрического поля излучения (см. формулу (11)).

Преобразователь поляризации (Рис.7) состоит из двух параллельных зеркал, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга, одно из которых, подвижное, является сплошным металлическим, а другое, неподвижное, представляет собой проволочную решетку, проводники которой направлены вертикально. Расстояние между зеркалами может варьироваться в пределах от 0 до 6 мм с помощью микрометрического винта. При измерениях перед преобразователем поляризации устанавливается поляризатор (проволочная решетка), проводники которого направлены под углом  $45^\circ$  по отношению к вертикали. В таком случае излучение, прошедшее через преобразователь будет линейно поляризованным, и вектор  $\mathbf{E}$  будет направлен под углом  $45^\circ$  относительно проводников решетки преобразователя поляризации. Компонента вектора  $\mathbf{E}$ , параллельная проводникам, будет отражаться по направлению к детектору (Рис.7), в то время как перпендикулярная компонента пройдет сквозь проволочное зеркало, отразится от сплошного металлического зеркала и вновь пройдет сквозь решетку по направлению к детектору. Разность оптических путей этих двух лучей с ортогональными компонентами вектора  $\mathbf{E}$  составляет  $d\sqrt{2}$ , где  $d$  - расстояние между зеркалами. Таким образом, излучение, приходящее на детектор, состоит из двух волн со взаимно ортогональными поляризациями и имеющими разность фаз

$$\Delta\varphi = 2\pi d \frac{\sqrt{2}}{\lambda} \quad (12)$$

Изменяя  $d$ , можно реализовать различные величины разности фаз и различные типы поляризации излучения.

### **Исследование типа поляризации излучения генератора миллиметрового излучения**

В данном упражнении используется схема, показанная на Рис.2. Вместо ИФП устанавливается проволочная решетка-поляризатор. Она закреплена в оправке, допускающей вращение вокруг нормали к ее плоскости. Решетку следует развернуть примерно на  $5^\circ$  вокруг вертикальной оси по отношению к направлению распространения излучения, чтобы ослабить условия для возникновения нежелательных стоячих волн в квазиоптическом тракте.

Вращая решетку в оправке, убедитесь в том, что излучение генератора является линейно поляризованным. Постройте зависимость прошедшего сигнала от угла поворота (закон Малюса). Определите направление пространственного изменения амплитуды вектора электрического поля миллиметрового излучения генератора.

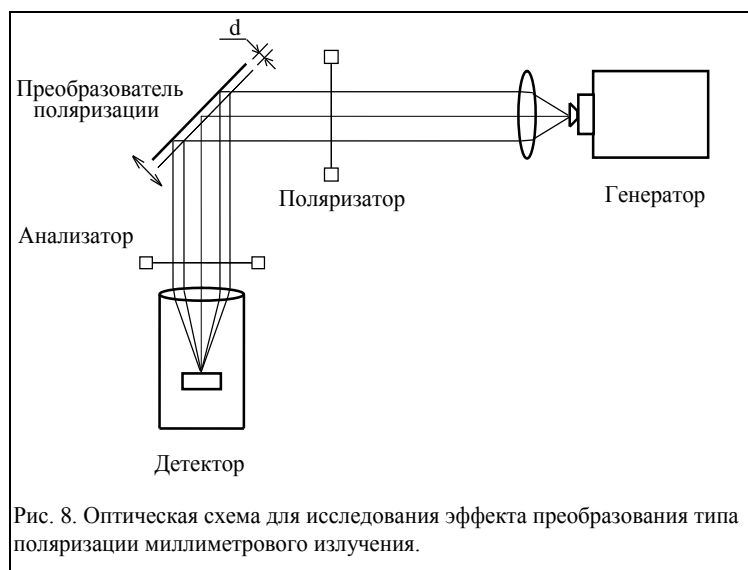
### **Исследование работы преобразователя поляризации миллиметрового излучения.**

Соберите блок-схему, показанную на Рис.8. Плоскость зеркал преобразователя поляризации должна составлять угол  $45^\circ$  с направлением распространения излучения. Проводники преобразователя поляризации должны быть направлены вертикально. Не устанавливая поляризатор и анализатор, добейтесь максимального сигнала на приемнике, юстируя линзу перед генератором и (слегка) угол поворота зеркал преобразователя поляризации вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Установите поляризатор и анализатор. Их проводники должны быть взаимно ортогональны и составлять угол  $45^\circ$  с проводниками преобразователя поляризации. Разверните поляризатор и анализатор на угол порядка  $5^\circ$  вокруг вертикальной оси для устранения стоячих волн в тракте.

Постройте зависимость сигнала на приемнике (логарифмический масштаб) от положения подвижного зеркала (линейный масштаб) преобразователя поляризации. Определите положения минимумов и максимумов данной зависимости, которые соответствуют линейной поляризации излучения, когда  $\mathbf{E}$  направлен, соответственно, параллельно и перпендикулярно проводникам анализатора. Определите положение микрометрического винта, соответствующее круговой поляризации (см. формулы (11,12)).

Убедитесь, что найденные положения действительно соответствуют линейной и круговой поляризациям. Для этого установите микрометрический винт в соответствующие позиции и, вращая анализатор, определите зависимости интенсивности от угла поворота анализатора. Определите величины отношений  $I_{\max}/I_{\min}$  в каждом случае. Для линейной поляризации это отношение должно быть по возможности большим, для круговой поляризации - по возможности близким к единице.

Установите микрометрический винт в промежуточное (между линейной и круговой поляризациями) положение и определите величины полуосей эллипса поляризации и коэффициент эллиптичности излучения.



## При сдаче задач должны быть представлены следующие результаты

### Упражнение 1.

- График зависимости коэффициента пропускания интерферометра Фабри-Перо от расстояния между его зеркалами. Значение найденной длины волны и частоты (в гигагерцах) излучения миллиметрового генератора.
- Величины контраста и резкости ИФП и соответствующих коэффициентов отражения отдельного зеркала.

### Упражнение 2.

- График углового распределения интенсивности излучения, выходящего из генератора и сфокусированного стоящей перед ним линзой в квазипараллельный пучок.
- График углового распределения интенсивности излучения, дифрагированного на решетке.
- Длина волны излучения.
- Анализ количества главных дифракционных максимумов для решетки с полосками расположенными вертикально и горизонтально.

### Упражнение 3.

- График зависимости коэффициента пропускания плоскопараллельной пластинки плавленого кварца от ее толщины. Величина коэффициента преломления плавленого кварца.
- Величины контраста  $\xi$  и резкости  $F$  интерферометра Фабри-Перо, представленного пластинкой. Величины коэффициента преломления, определенные через  $F$  и  $\xi$ .

### Упражнение 4.

- График зависимости интенсивности излучения прошедшего сквозь металлическую решетку от угла поворота решетки.
- График зависимости интенсивности на приемнике от положения подвижного зеркала преобразователя поляризации. Точки на графике, соответствующие линейной, круговой и эллиптической поляризациям.
- Величины отношений  $I_{\max}/I_{\min}$ , характеризующие степень линейной, круговой и эллиптической поляризаций.

## Литература

1. Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра. // Москва. Мир. 1970.
2. Р.А.Валитов, С.Ф.Дюбко, В.В.Камышин, В.М.Кузьмичев, Б.И.Макаренко, А.В.Соколов, В.П.Шейко. // Техника субмиллиметровых волн. Москва. "Советское радио". 1969.
3. Труды Иститута общей физики АН СССР, // т.25, Москва, Наука, 1990.
4. Электронные приборы сверхвысоких частот. // Сборник под ред. В.Н.Шевчика, М.А.Григорьева. Изд. Саратовского университета. 1980.
5. В.В.Лебедева. // Экспериментальная оптика. Изд. МГУ, 1994.
6. М.Борн, Э.Вольф. // Основы оптики. Перевод с англ. Москва, Наука, 1970.
7. В.П.Шестопапов, Л.Н.Литвиненко, С.А.Масалов, В.Г.Сологуб. // Дифракция волн на решетках. Изд. Харьковского университета, Харьков 1973.
8. Г.С.Ландсберг. // Оптика. Москва. "Наука", 1976.