## интерферометр<sup>і</sup> фабри-перо для радиоволн миллиметрового диапазона

Одна из характерных особенностей микроволновой области спектра состоит в том, что наряду с радиотехническими методами и устройствами здесь оказываются применимыми устролства и методы, типичные для оптики. Использование последних связано с возможностью изготовления лицз, зеркал, диафрагм и других оптических деталей, размеры которых намного превышают длицу волцы излучения. Однако соотношение между размерами деталей оптических устройств и длиной волны в случае микроволн, вообще говоря, на несколько порядков отличается от имеющего место в обычных оптических приборах. Вследствие этого особо существенную роль приобретают диффракционные явления, игнорировать которые, как это часто допустимо в условиях обычной оптики, становится совершенно невозможным. Отсюда возникают некоторые специфические особенности, представляющие как практический, так, и теоретический интерес.

Естественно возникло стремление создать для микрорадиоволн и многолучевое интерферометрическое устройство, а именно интерферометр Фабри-Перо. Такого рода интерферометр был первоначально осуществлён для работы «в отражённом свете» <sup>1</sup> и обладал сравнительно невысокими качествами. Значительно лучший интерферометр, предназначенный для работы «в проходящем свете» с излучением миллиметрового диапазона, был построен и исследован автором реферируемой статьи <sup>2</sup>.

Интерферометр представлял собой пару отражателей, эффективный диаметр которых составлял 27,5 см. Расстояние между отражателями t могло изменяться (путём перемещения одного из них) от нескольких миллиметров до 2 метров. Перемещение это осуществлялось при помощи микрометрического винта и измерялось с точностью до 1 µ. В качестве отражателей использовались стопки из 8 полистиреновых дисков толщиной  $\lambda'$ 

 $\frac{\lambda'}{4}$  ( $\lambda'$  — длина волны излучения в полистирене), разделённых воздушными  $\lambda$ 

прослойками толщиной  $\frac{\lambda}{4}$  ( $\lambda$  — длина волны излучения в воздухе). Практически каждый из дисков имел ободок, толщина которого равнялась  $\lambda' + \lambda$ 

4; диски вплотную накладывались ободками друг на друга и крепи-

лись в общей оправе. Такой наборный отражатель, являющийся непосредственным аналогом многослойных диэлектрических отражателей, получивших за последние годы широков применение в оптике<sup>3</sup>, был использован, исходя из следующих соображений. Как известно, для получения большой разрешающей способности и большой интенсивности полос необходимы отражатели с возможно большими коэффициентами отражения R и возможно малым поглощением излучения. (В частности, разре:пающая способность интерферометра определяется значением Qn, где n — порядок интерференции и Q — величина, обратная полуширине полосы первого порядка, выраженной в долях расстояния между полосами:  $Q = \frac{\pi}{\varphi_1}$ ; соз  $\varphi_1 = \frac{2R - (1-R)^2}{2R}$ .) Этому требованию наилучшим образом удовлетворяют многослойные отражатели из диэлектрика.

Полагая для полистирена (при  $\lambda = 1,25$  см)  $\varepsilon = 2,56$  и tg  $\delta = 0,001$ ( $\delta$  — угол потерь), автор нашёл следующие значения амплитудного коэффициента отражения  $r_m$  от m четвертьволновых слоёв полистирена, разделённых четвертьволновыми слоями воздуха (табл. 1).

Таблица I

m	1	2	3	4	5	6	7	8	œ
r <sub>m</sub>	0,437	0,734	0,8861	0,9528	0,9806	0,9913	0,9961	0,9977	0,9982

Таким образом,  $r_m$  быстро растёт с ростом m и при m = 8 почти достигает предельного значения. Соответственно, энергетический коэффициент отражения  $R = r^2$  от пягнадцатислойного отражателя (восемь слоёв полистирена и 7 прослоек воздуха)  $R_{m=8} = 0,9954$  и Q = 675. (Без учёта даже столь слабых диэлектрических потерь получаются существенно отличающиеся значения  $R_{m=8} = 0,9978$  и Q = 1350.) Поскольку у плавленого кварца  $\varepsilon = 3,83$  и tg  $\delta = 0,0001$ , постольку с ним могут быть получены значительно бо́льшие значения Q. Разумеется, никакие однослойные отражатели, в том числе металлические, не могут обеспечить столь благоприятных значений R и, соответственно*q* Q.

Существенными элементами интерферометрической установки являются излучатель и приёмник радиации. В качестве источника излучения использовался клистрон. Длина волны равнялась 8 мм и стабилизировалась полостным резонатором. Степень монохроматичности излучения обеспечивала «видимость» полос при разведении отражателей интерферометра на расстояние t порядка нескольких метров, что позволило исследовать свойства самого интерферометра. От генератора волна типа H<sub>10</sub> передавалась по четырёхугольному волноводу, оканчивающемуся излучающим рупором (размером 15 см × 15 см или 8,75 см × 8,75 см), закрытым короткофокусной (F = 15 см; 50 см) полистиреновой линзой (рис. 1). Во избежание отражений периметр отверстия рупора был скошен под углом 45°. При этих условиях излучаемая волна была однородной по фазе, что же касается амплитуды, то она была одинаковой в вертикальной плоскости (вектора Е), а в горизонтальной плоскости изменялась по синусоидальному закону. В результате, помимо плоской волны, распространявшейся в направлении Ф = 0, образовывался набор плоских же диффрагированных волн, расходя-щихся веером в горизонтальной плоскости. Помимо этого имела место
 диффракция на отверстии рупора.

Приёмное устройство состояло также из рупора с линзой, переходящего в прямоугольный волловод, в котором помещался кристаллический детектор миллиметровых волн. На выходе выпрямленный ток измерялся гальванометром. Измерения сводились к постепенному изменению t (при помощи микрометрического винта) и определению зависимости показаний гальванометра от t. Одновременно при помощи полостного волномера производились контрольные измерения  $\lambda$  с точностью до нескольких единиц  $10^{-5}$ .

Учёт диффракционной структуры облучающего пучка, а также диффракции на самом интерферометре производился рядом авторов 4.5. В грубых чертах результаты этого анализа таковы. Поле излучения можно



## Рис. 1.

рассматривать как суперпозицию недиффрагированной и ряда диффрагированных плоских волн, имеющих различные направления (различные  $\vartheta$ ) и, соответственно, в различной степени проходящих через интерферометр. Угловая полуширина пропускаемого диффракционного спектра определяется соотношением

$$\cos\vartheta_{\left(\frac{1}{2}I_{\text{MAKC}}\right)} = 1 - \frac{1}{2nQ}.$$

Кроме того, если расстояние между излучателем и интерферометром или приёмником велико, то волны, диффрагированные на большие углы, не будут попадать в приёмник. Далее, интенсивность проходящего через интерферометр излучения ослабляется за счёт срезания и и ослабления диффрагированных волн. Вместе с тем наличие диффрагированных волн при малых порядках интерференции может вести к смещению максимума. Однако при больших порядках интерференции положение максимума отвечает  $\vartheta = 0$ . Наконец, с увеличением t должно уменьшаться эффективное значение Q, а следовательно, и резкость полос. Все эти явления были обнаружены на опыте.

Измерения велись при различных расстояниях от излучателя до переднего отражателя интерферометра a и от переднего отражателя интерферометра до приёмника b, а именно  $9,5 \le a \le 115$  см и 150 см  $\le b \le 300$  см. Измерения длины волны (по волномегу  $\lambda = 8,3299$  мм), произведённые при помощи интерферометра путём измерения  $\Delta t$ , соответствующего смещению на 120 полос, дали следующие значения (табл. II)

Таблица II

t в см	8	16	31	66	74	124
λвмм	8,3334	8,3326	8,3324	8,3314	8,3306	8,3299

Таким образом, при больших n точность измерений соответствует  $10^{-5}$  и уменьшается при уменьшении n за счёт систематического смещения

полос, имеющего явно диффракционный характер, о чём, в частности, свидетельствует зависимость этих величин ог выбора а и b.





Рис. 2 показывает характер наблюдаемой зависимости силы выходного тока от t и иллюстрирует резкость наблюдаемой интерференционной картины. Из рис. 3 видно, чго при  $t \sim 2 \, m$  интерференционные полосы остаются ещё достаточно резкими и фактор селективности  $\frac{Qn}{2}$  ещё очень велик, но вместе с тем Q и Qn убывают с возрастанием t (а следовательно,



Рис. 3.

и n). Рис. 4 показывает 10 последовательных максимумов, обнаруженных при начальном значении  $t = 3 \, cm$ . Малые вгоричные максимумы (сателлиты) о очевидностью имеюг диффракционное происхождение — они располагаются со стороны бо́льших значений t (т. е.  $\gg 0$ ) и удаляются от основного максимума по мере увеличения n.

Зависи мость интенсивности максимума от t показана на рис. 5 (кривая I соответствует рупору 15 см  $\times$  15 см, кривая 2 — рупору 8,75 см  $\times$  8,75 см). Из рисунка видно, что вследствие диффракционных явлений эффективное значение Q сперва возрастает, а затем убывает, причём характер этой зависимости различен для различных апертур излучателя. Удаление линз из рупоров излучателя и приёмника влекло за собой уменьшение интенсивности максимумов (на 60 дб) и одновременное увели-



Рис. 4.

чение амплитуд и числа диффракционных максимумов, как следствие расширения диффракционного спектра анализируемого излучения. Диффракционные максимумы исчезали при t > 43 см.

Аналогично полостному резонатору интерферометр Фабри-Перо может быть использован для определения диэлектрических свойств и, в частности, малых диэлектрических потерь в пластинках. Следует, однако, иметь в виду, что вследствие интерференционных явлений непосредственный результат измерений зависит от по-

ложения исследуемого слоя вещества в интерферометре.

Введение пластинки полистирена толщиной 0,865 дюйма вызывало, по свидетельству автора, смещение полосы, соответствую-щее  $\Delta t = 1,314$  см. Поскольку  $\Delta t =$ = d ( v = -1), отсюда было найдено значение : = 2,55, находящееся в согласии с данными других измерений. Точно так же для перспекса было найдено значение є = = 2,64.

Далее, в случае резонатора (если пренебречь омическими по-

 $\frac{1}{Q_{\lambda}} = B \operatorname{tg} \delta$ , где  $Q_{\lambda} =$ терями) -

1



и В — доля полной энергии, запасённая в диэлектрике и зависящая от относительного объёма диэлектрика и от отношения А амплитуд поля в диэлектрике и вне его. При перемещении диэлектрика периодически меняется А и соответственно Q (последнее на множитель є при перемещении слоя из минимума в максимум стоячей волны).

Так, например, если при n = 158 в отсутствие диэлектрика Q = 416, то при внесении слоя полистирена полосы существенно расширялись

и (в зависимости от положения слоя) Q менялось в пределах от 124 до 273. Для перспекса соответственно было найдено 11 << Q << 35, причём интенсивность полос уменьшалась на 26 дб. Соответственно были получены значения tg 8:

для полистирена — 0,0006 (по другим данным 0,0008 при  $\lambda = 1,25$  см), для перспекса — 0,009 (по другим данным 0,012 при  $\lambda = 1,25$  см).

Таким образом, применение интерферометра позволяет измерять є с точностью ~1% и даёт удовлетворительные результаты при определении tg δ.

Следует отметить, что в данном случае были достигнуты значения  $Q_{\lambda} \sim 60\,000$ , что сравнимо со значениями  $Q_{\lambda}$  для лучших полостных резонаторов. Иными словами, интерференционная методика фильтрации излучения и измерения его длины волны уже может конкурировать с другими методами. В частности, легко осуществляются измерения длины волны с точностью порядка 10<sup>-5</sup>. Применение плавленого кварца для изготовления отражателей должно существенно улучшить результаты и позволить применить эту методику даже для столь прецизионных измерений, как, например, измерение скорости света в вакууме.

Г. Р.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- M. Sachs, J. O. Artman and E. Richter, Columbia Univ. Radiation Labor. Rep. 1 июня 1952 г.
  W. Culshaw, Proc. Phys. Soc. 66, № 403, B, 597 (1953).
  См., например, Г. В. Розенберг, УФН 47, №№ 1 и 2, 3 (1952).
  Ф. А. Королёв, Труды ФИАН, 2, № 1, 3 (1940).

- 5. H. G. Booker and P. C. Clemmow, J. Inst. Electr. Eng., u. III, 97, 11 (1950) и др.