ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО МАЛЫХ ПОГЛОЩЕНИЙ В ДИЭЛЕКТРИКАХ И АТМОСФЕРЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 45-200 ГГЦ

Паршин В.В., Крупнов А.Ф., Мясникова С.Е., Третьяков М.Ю., Шанин В.Н. ИПФ РАН ул. Ульянова 46, Н.Новгород, Россия тел. 8312-384566.

Аннотация — Создана установка нового поколения диапазона 45 — 200 ГГц для исследования поглощения в диэлектриках, включая атмосферу. Особое внимание уделено как исследованиям сверхмалюто поглощения в современных высококачественных дизлектриках, включая тонкие плёнки, так и исследованиям поглощения в атмосфере, включая линии поглощения кислорода и воды.

Выявлено, что кремниевые и алмазные окна вывода энергии мегаваттных гиротронов ММ диапазона имеют значительное поглощение в тонком, $<<\lambda$, поверхностном слое, приводящее к пробоям по поверхности окна.

Практически все рулонные пленочные материалы обладают заметной анизотропией диэлектрических параметров, которые зависят также от изготовителя.

Проведено сравнение результатов измерений атмосферного поглощения с теоретическими моделями.

I. Введение

Бурное развитие техники микроволнового диапазона, происходящее в поспедние годы, особенно электроники больших мощностей, потребовало уточнения сведений о параметрах существующих диэлектриков как среды распространения электромагнитного излучения и соэдания новых материалов с уникальными электро и теплофизическими свойствами

Так, например уже получены алмазные диски с величиной $tg\delta < 10^{-5}$ и теплопроводностью ~ 20 Вт/см² для окон вывода энергии сверхмощных генераторов — гиротронов [1], которые используются в установках управляемого термоядерного синтеза для нагрева плазмы. (Окно вывода энергии до сих пор является "узким местом", сдерживающим рост выходной мощности единичного гиротрона.)

Другое направление - развитие интегральной техники микроволнового диапазона, для которой пленки являются в прямом смысле основой построения интегральных микросхем. Величина поглощения в пленочных материалах, явпяется одним из основных параметров для отбора материалов для подложек микросхем (несмотря на её ничтожную величину).

Информация о величине поглощения в реальной атмосфере необходима не только для расчета дальности действия радаров и систем связи, но также для определения влагосодержания, сведения о которой необходимы как для прогнозирования обледенения самолетов на больших высотах, так и для технологических процессов получения мелкодисперсных веществ, будь то мукомольная промышленность или производство оптического волокна.

Однако все эти проблемы требуют создания аппаратуры нового поколения, с чувствительностью на порядок большей, также как и новых методов расчета поглощения из измеряемых величин.

II. Установка

Для исследования поглощения микроволнового излучения в диэлектриках и в атмосфере в месте наблюдения создана установка [2] диапазона 45-200 ГГц, блок-схема которой приведена на Рис. 1. Измерительным элементом является открытый резонатор Фабри-Перо, длиной ~300 мм, Q~600000, в котором размещается пластина диэлектрика или исследуемый газ. Источниками излучения являются ЛОВ-ы, стабилизированные системой ФАПЧ.

Информация о величине поглощения в образце содержится в разности добротностей пустого и нагруженного резонатора, т.е. в разности ширин резонансных кривых, поэтому записи и обработке резонансной кривой уделялось особое внимание.

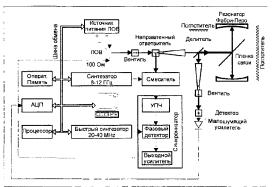


Рис.1 Блок-схема установки для исследования поглощения в диапазоне 45-200 ГГц. Fig.1 Block diagram of the setup for the absorption measuring at the range 45-200 GHz.

Запись резонансной кривой осуществляется с помощью быстрого синтезатора частоты (время переключения частоты 200 нс, время между переключениями ~ 60 мкс). Причем принципиальным отличием быстрого синтезатора является то, что переключение происходит без потери фазы, поэтому минимальное время сканирования (записи) резонансной кривой определяется фактически постоянной времени резонатора. Характерное время двустороннего скана составляет ~ 30 мс.

Определение ширины включает автоматическое описание экспериментально измеренной формы резонанса лоренцевой кривой. При усреднении ~ 500 сканов точность измерения ширины резонансной кривой составила ~ 20 Гц при ширине контура ~ 200 кГц. Для газа, заполняющего резонатор, это соответствует чувствительности ~ 0.0018 дБ/км.

Для пластины из алмаза толщиной ~ 0.5 мм (наименее поглощающий материал) эта же точность соответствует величине $tg\delta {< 10}^{-7}$.

Такая чувствительность вполне достаточна для исследования всех современных диэлектриков, включая плёнки микронной толщины, и более чем на порядок превосходит мировой уровень.

Установка позволяет в полуавтоматическом режиме получать запись атмосферного поглощения в диапазоне работы ЛОВ-ов типа ОВ-70, ОВ-71, ОВ-87 шагами по собственным модам резонатора ~500 МГц, без механической перестройки длины резонатора и определять абсолютное поглощение на любой фиксированной частоте методом вариации длины пути поглощения (длины резонатора).

Время перестройки длины резонатора и записи величины поглощения существенно меньше времени изменения метеопараметров в лабораторных условиях. Это позволяет реализовать метод вариации дальности в чистом виде, недоступном для реальных трассовых измерений.

В режиме измерения влагосодержания, на частоте 183 ГГц чуствительность установки составляет ~ 1 мг/м³. (Максимальная влажность лимитируется конденсацией паров на зеркалах)

III. Результаты исследований

Проведены исследования поглощения в серии дисков из легированного золотом кремния и ряда алмазных дисков предназначенных для изготовления окон вывода энергии мегаваттных гиротронов. Разработана технопогия обработки поверхностей как кремниевых, так и алмазных дисков не вносящая дополнительных потерь по сравнению с "объёмным" поглощением. Однако выявлено, что после процесса высокотемпературной пайки дисков в сопутствующую арматуру плоскости дисков (как это свойственно полупроводникам) "набирают" избыточное (по сравнению с объёмом) количество свободных носителей заряда, приводящее, соответственно, к добавочному поглощению. Причем величина добавочного поглощения составляет 30%-60% от общей поглощаемой в окне мощности. Но это поглощение в тонком (порядка нескольких микрон) поверхностном слое приводит как к перегреву поверхности, вызывающему избыточные механические напряжения в окне, (вплоть до его разрушения) так и к поверхностному пробою, нарушающему режим работы гиротрона.

Интерес к исспедованию диэлектрических параметров плёночных материалов вызван широким использованием тонких (много меньше длины волны) плёнок для всевозможного рода квазиоптических делителей мощности, а также для подложек интегральных микросхем микроволнового диапазона.

В результате проведенных исследований $tg\delta$ и показателя преломления популярных плёночных материалов, таких как тефлон, лавсан, полиамид и т. д. выявлено, что диэлектрические параметры этих материалов различаются до 10% -15% у разных фирм изготовителей. Наибольшее различие в величине $tg\delta$ для разных рулонов отмечено для материала с минимальным поглощением - тефлона.

Кроме того, практически все "рулонные" плёнки обладают анизотропией показателя преломления вдоль и поперёк рулона, доходящую до 15%.

Поглощение в атмосфере исследовалось при различных комбинациях метеопараметров в лабораторных условиях. Исследования охватили полосу поглощения кислорода в районе 60 ГГц, отдельную линию кислорода на 118 ГГц и линию поглощения воды на 183 ГГц.

На Рис.2 приведен спектр поглощения атмосферы в диапазоне 44-98 ГГц. (Профиль попосы поглощения кислорода рассчитан по Розенкранцу.) Внизу – ошибка восстановления умноженная на 10.

На Рис.3 - в диапазоне 113-200 ГГц. Профиль линии воды хорошо описывается формой по Ван Флеку-Вейскопфу при расстройке до 20 полуширин линии. Совпадение расчетной и экспериментальной интегральных интенсивностей ~2%. Найденный отсюда параметр уширения линии воды сухим воздухом = 3.985±0.04 МГц/Торр.

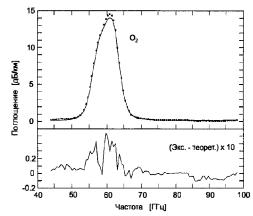


Рис.2 Спектр поглощения атмосферы 44-98 ГГц Fig.2 Atmosphere absorption spectre at 44-98 GHz.

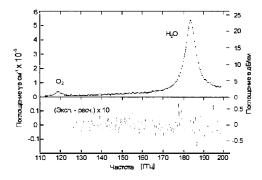


Рис.3 Спектр поглощения атмосферы 113-200 ГГц. Fig.3 Atmosphere absorption spectre at 113-200 GHz.

Методом вариации длины резонатора было измерено абсолютное поглощение в атмосфере на частоте 140.286 ГГц равное 0.4301(27) дБ/км. Результат измерения сравнивается с моделью Г. Либе (МРМ-89, МРМ-92), и последней версией П.В. Розенкранца. Расчет поглощения для данных атмосферных условий дает 0.443 дБ/км.

Проведенные широкодиапазонные исследования атмосферного поглощения дают реальную оценку применимости существующих моделей атмосферы для расчёта поглощения на протяженных трассах.

IV. Заключение

Аппаратура для исследования поглощения в газе и конденсированных средах диапазона 45–200 ГГц создана. Чуствительность установки, как минимум на порядок превосходящая мировой уровень, открывает новые возможности для исследований.

Создаётся установка на диапазон 200—400 ГГц, используя те же принципы построения аппаратуры.

V. Список литературы

- V.V.Parshin, V.G.Ralchenko and V.I.Konov. "Diamonds for High-Power Gyrotron Window" Conf. Digest of the 23rd International Conference on Infrared and Millimetre Waves, pp.232-233, Colchester, UK, 1998
- [2] A.F.Krupnov, M.Yu.Tretyakov, V.V.Parshin, V.N.Shanin and S.E.Myasnikova. Modern Millimeter-Wave Resonator Spectroscopy of Broad Lines. Accepted for publication to the Journal of Molecular Spectroscopy. V. 201, 2000.

THE ULTRA-LOW ABSORPTIONS INVESTIGATION IN DIELECTRICS AND ATMOSPHERE WITHIN 45-200 GHZ FREQUENCY BAND

V.V. Parshin, A.F. Krupnov, S.E. Myasnikova, M.Yu. Tretyakov, V.N. Shanin Applied Physics Institute RAS 46 Ulyanov st., N.Novgorod - 603600, Russia Ph. 8312-384566

Abstract- The new generation set of 45 – 200 GHz band for the investigation of dielectric absorption, including atmosphere is created. A special attention is paid both to the investigation of ultralow absorption in the modern high-quality dielectrics, including thin films and to the atmosphere absorption, including the lines of oxygen and water absorption.

It was found out that Si and diamond output windows for the megawatt microwave gyrotrons have the essential absorption in thin, $<<\lambda$, surface layer, leading to the surface discharges.

Practically all the rolled film materials have the distinct anisotropy of dielectric parametres, which also depend upon the producer.

The results of atmosphere absorption measurement have been compared with the theoretical models.

I. Introduction

The microwave technology development, especially of high power electronics, demanded the refinement of data concerning the parameter of existing dielectrics as a media for electromagnetic radiation propagation and creation of new materials with the unique electric and thermo-physical properties.

For the investigation of new materials with ultralow absorption in microwave range and for the atmosphere absorption investigation, both in transparency windows and in the lines of absorption, the new generation set with the highest sensitivity was created and the new method for absorption calculation was developed.

II. Description of the set

The block diagram of the apparatus is presented in Fig.1. The open Fabry-Perot resonator is used for dielectric and atmosphere measurements. The resonator length is 250 – 400 mm, Q-factor is ~ 600 000.

The synthesized frequency radiation source employs a BWO which was stabilized by a phase lock-in loop with the use of two reference synthesizers: one microwave synthesizer defines the central frequency and the other fast synthesizer is aimed for precise fast scanning of the BWO frequency around the chosen central frequency. Fast synthesizer provides frequency scanning without loss of oscillations phase (without

phase jumps). The time of its switching is 200 ns and time between switching is \sim 60 μ s.

This mode is used for precise recording of resonance curve of a resonator. The time of one triangle scan is ~30 ms.

The determination of resonator curve width includes the fitting of its shape to the Lorentzian. At the averaging of approx. 500 scans, the accuracy of measurement of resonance curve width was approx. 20 Hz. For gas filling the resonator, it corresponds to $\sim 0.0018 \, \mathrm{dB/km} \, (-4 \times 10^9 \, \mathrm{cm}^{-1})$ sensitivity.

This accuracy corresponds to the Loss tangent value $<10^{-7}$ for the diamond plate with ~ 0.5 mm thickness.

The possibilities of the set for atmosphere measurements are: Wide band record of atmosphere absorption with the frequency spacing of ~500 MHz, the measurement of absolute absorption at any fixed frequency by changing of the resonator length.

The set sensitivity to the water content in atmosphere at the measurement in absorption line is 183 GHz is ~1 mg/m³.

III. Results of investigations

The absorption investigation in the series of gold doped silicon and a number of diamond disks for output windows of megawatt gyrotrons are carried out.

It was found out that after high temperature brazing, the disc's planes get the additional number of free charge carriers which leads to the additional absorption. Its value is 30% - 60% of the total absorbed power. This absorption leads both to the overheating of the surfaces and to surface discharges.

The investigations of refractive index and loss tangent of the most popular film materials such as Teflon, Mylar, Polyamide etc are made.

It is found out that the dielectric parametres of these materials differ up to 10% -15% at various producers. The greatest difference in $tg\delta$ is noted for Teflon (material with min absorption).

Besides, practically all rolled films have the difference in refractive index along and across the roll, reaching 15 %.

The atmosphere absorption was researched in different combinations of meteoparametres under the laboratory conditions.

The spectrum in the range of 44-98 GHz is given in Fig.2. Below – there is the error of fitting to the Rosenkranz shape multiplied by 10.

Fig.3 shows the spectrum in the range of 113-200 GHz. The experimental line is approximated by Van Vleck-Weisskopf curve. The result is presented below.

Comparison shows excellent coincidence (better than 2%) between measured and calculated values of integral intensity. The calculated value of air broadening is 3.985±0.04 MHz/Torr (T=292.8K).

At 140.286 GHz the absolute absorption in atmosphere was measured, (its value was =0.4301(27) dB/km) and compared to the Rosenkranz semi-empirical program -0.443 dB/km.

The carried out wide band atmosphere investigations give the real estimation of existing model for the calculation of absorption at the extended routes.

IV. Conclusion

The set for investigation of absorption in gas and condensed medium for the range 45-200 GHz is created. The sensitivity of the set is at least one order higher than the world level one. It opens the new opportunities for investigation. The set for the band 200-400 GHz using the same principles has been created.