<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-21-27>
УДК 537.86

Особенности квазиоптических измерений на субмиллиметровых волнах

Г. В. Козлов¹, С. П. Лебедев²

¹ Акционерное общество «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Российская Федерация

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Российская Федерация

Исследовано влияние структуры электромагнитного поля и стоячих волн в квазиоптическом тракте на результаты диэлектрических измерений. Даны рекомендации по организации измерительных схем.

Ключевые слова: квазиоптика, плотность мощности, спектр пропускания

Для цитирования: Козлов Г. В., Лебедев С. П. Особенности квазиоптических измерений на субмиллиметровых волнах // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2. С. 21–27. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-21-27>

For citation: Kozlov G. V., Lebedev S. P. The specifics of quasi-optical measurements in the submillimetre waveband // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 2. P. 21–27. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-21-27>

Поступила 04.03.2021 Отрецензирована 19.03.2021 Одобрена 31.03.2021 Опубликована 18.06.2021

Современная микроэлектроника неуклонно осваивает высокие частоты, чтобы быстрее и с меньшим энергопотреблением обрабатывать потоки информации. В связи с этим материаловедение в субмиллиметровом диапазоне частот приобретает все большую актуальность. Синтезированные для целей микроэлектроники диэлектрические материалы должны обладать низкими потерями, хорошими изоляционными свойствами при небольших значениях диэлектрической проницаемости [1].

Одним из продвинутых методов измерения на субмиллиметровых волнах является бесконтактный способ определения диэлектрических параметров материала. В таком подходе к измерению образец размещается в квазиоптическом тракте на пути сформированного и направленного пучка излучения.

Квазиоптика является основным инструментарием измерительной техники на субмиллиметровых волнах (100–1000 ГГц) [2–5]. При низких уровнях мощности рабочего

излучения (до десятков Вт) поперечные размеры квазиоптических элементов – линз, зеркал, поляризаторов, аттенуаторов – обычно не превышают 50–60 мм при расстояниях между ними примерно в 100 мм. Это обусловлено как удобством работы – во всех диапазонах электромагнитных волн экспериментаторы стараются уместить измерительную технику на рабочем столе, так и ограниченностью размеров исследуемых образцов, когда речь идет об изучении свойств веществ и материалов, а также габаритов создаваемых практических устройств. При больших уровнях мощности для устранения явлений воздушного пробоя приходится использовать большие диаметры пучков или вакуумированные системы.

В силу соизмеримости поперечных и продольных размеров трактов с длиной волны рабочего излучения даже простейшие по своей аналогии с оптикой схемы формирования и распространения квазиоптических пучков «обогащаются» ярко выраженными дифракционными и интерференционными явлениями, радикально усложняющими проведение

измерений. Эти нежелательные явления с разной степенью успешности устраняются и учитываются в практических исследованиях [4–7], однако о целенаправленном изучении их влияния на результаты квазиоптических измерений неизвестно.

Целью данного исследования является изучение на количественном уровне пространственного распределения плотности мощности в квазиоптическом тракте и явлений, сопутствующих квазиоптическим измерениям спектров пропускания образцов в условиях высокой монохроматичности рабочего излучения. Наибольшие проблемы с обсуждаемыми явлениями сопутствуют измерениям в низкочастотной части субмиллиметрового диапазона; исходя из этого измерения выполнялись в диапазоне 150–320 ГГц.

С целью оптимизация измерительных схем впервые проведено исследование спектров пропускания плоскопараллельного образца в условиях отклонения от нормального падения волны. Показаны его преимущества и обсуждены возникающие при этом особенности расчетов спектров.

Распределение мощности в квазиоптическом пучке

В качестве источников используются лампы обратной волны – ЛОВ, питаемые от высокостабильного источника, обеспечивающего уровень монохроматичности излучения

Рис. 1. Волноводный вывод ЛОВ-генератора

$\Delta f/f$ до 10^{-5} и перекрывающие диапазон до 1500 ГГц.

Рисунок 1 дает представление о характерных размерах выходного волновода длинноволновой ЛОВ. Размеры стандартного волновода WR-6 $1,6 \times 0,8$ мм², рабочий диапазон частот 114,0–173,0 ГГц. При организации измерений рупорная антенна обычно не используется, поскольку при большом диапазоне перестройки частоты ЛОВ (50 %) не может обеспечить удовлетворительное согласование.

При измерениях пространственного распределения мощности в тракте применялся пиродетектор с входной диафрагмой диаметром 1 мм, установленный на сканере с рабочим полем 110×110 мм². Такой выбор приемника связан с его малыми размерами и низкой восприимчивостью к вибрациям при сканировании. Для записи спектров пропускания применялся более чувствительный оптико-акустический приемник ОАП-5.

На рисунке 2 приведено распределение мощности в квазиоптическом тракте на двух частотах. В ближней зоне пространственное распределение мощности имеет сложную структуру, которая на расстоянии в 400 мм принимает колоколообразное распределение, уширяющееся по мере увеличения расстояния.

На рисунке 3 приведены зависимости изменения суммарной мощности квазиоптических пучков (диаметр 50 мм) 150 и 320 ГГц от расстояния до источника в схеме с одной фокусирующей линзой из полиэтилена диаметром 60 мм. На расстоянии в 1 м потери мощности составляют 78 и 72 % соответственно. Они целиком обусловлены расходимостью квазиоптического пучка.

Выравнивание пространственного распределения мощности на частоте 320 ГГц происходит при меньших расстояниях, чем на частоте 150 ГГц.

Потери на поглощение в воздухе при условиях нормальной влажности и температуры на частотах 150 и 320 ГГц не превышают 0,05 и 0,2 % соответственно (рис. 4) [3].

При фокусировке излучения на приемник (ОАП-5) также неизбежны дифракционные потери (рис. 5). В том случае когда используется диэлектрическая линза, они составляют

36 и 22 % на частотах 150 и 320 ГГц соответственно.

Суммарные дифракционные потери на этапах формирования, распространения и регистрации квазиоптического пучка весьма существенны: составляют на частотах 320 и 150 ГГц 78 и 86 % соответственно.

С укорочением длины волны рабочего излучения возможно сокращение протяженности квазиоптической схемы, что целесообразно

и с точки зрения снижения потерь мощности на поглощение во влажном воздухе.

Измерение коэффициента пропускания образцов

Одним из основных методов исследования диэлектрических свойств материалов на субмиллиметровых волнах является измерение спектров пропускания плоскопараллельных образцов [5–7]. Экспериментальный спектр пропускания получается после учета аппаратной функции спектрометра. Для каждой частоты в спектре величина сигнала на приемнике измеряется дважды с образцом в тракте и без образца. Результат деления двух сигналов есть искомое пропускание образца на этой частоте.

Рис. 2. Распределение мощности квазиоптических пучков 150 и 320 ГГц на разных расстояниях от источника в схеме с одной фокусирующей линзой из полиэтилена диаметром 60 мм

Рис. 3. Относительное изменение суммарной мощности квазиоптических пучков 150 и 320 ГГц от расстояния до источника в схеме с одной фокусирующей линзой из полиэтилена диаметром 60 мм

— 150 ГГц, — 320 ГГц

Рис. 4. Ослабление сигнала в воздухе за счет атмосферного кислорода и воды

Рис. 5. Формирование СБММ пучка в зависимости от расстояния после полиэтиленовой линзы с фокусным расстоянием 60 мм. Суммарная мощность в пучке сохраняется. Диаметр пучка в фокусе по уровню 0,7 сигнала составляет 4 и 2,5 мм для 150 и 320 ГГц соответственно. Линза расположена на расстоянии 920 мм от источника

При этом для расчета значений показателя преломления и поглощения используются формулы плоского слоя, полученные в предположении электромагнитной волны с плоским волновым фронтом. Как было показано выше, распределение мощности в квазиоптическом пучке приобретает вид близкий к плоской волне на расстояниях больших 0,5 м от источника излучения.

В качестве тестового образца нами использовалась пластина высокоомного полупроводника GaAs толщиной $d = 5,896 \pm 0,001$ мм и диаметром 58 мм.

На рисунках 6а и б показаны спектры пропускания GaAs при двух вариантах его установки в квазиоптический тракт.

При малых коэффициентах поглощения материала плоскопараллельный образец работает как диэлектрический резонатор. Его

спектр пропускания состоит из серии интерференционных максимумов и минимумов.

Как видно, в обоих случаях спектры пропускания выглядят сильно зашумленными с заметным разбросом точек, но это не из-за низкого уровня сигнала на приемнике. Это явление связано с изменением стоячих волн, происходящим после установки образца в тракт. Для уменьшения их влияния целесообразно использовать наклонную установку образца.

На рисунке 7 показан спектр для случая перекоса образца на угол в 5° . Даже такой небольшой наклон образца кардинально меняет качество измеренного спектра пропускания.

В такой схеме спектры пропускания практически идеально описываются формулами для плоского слоя, даже несмотря на то что образец установлен в ближней дифракционной зоне. Тут решающее значение в улучшении качества измеренного спектра имеет то, что приемник находится на расстоянии, при котором в квазиоптическом пучке остаются и регистрируются лишь параксиальные лучи.

Наклонное падение волны на образец проявляет необычное поведение максимумов (и минимумов) в спектрах пропускания. Максимумы смещаются в сторону более высоких частот и уменьшаются по амплитуде за счет увеличения поглощения в образце. Последнее связано с тем, что геометрическая толщина образца увеличивается обратно пропорционально косинусу преломленного угла, что приводит к большим энергетическим потерям волны. Напротив, разность фаз, определяющая период интерференции волны в образце, уменьшается пропорционально косинусу преломленного угла, в результате чего максимумы смещаются в область более высоких частот. Применив закон Снеллиуса для преломления волны на границе диэлектрических сред с малыми потерями, можно написать формулу для максимума коэффициента пропускания:

$$f_{Tmax} = m / (2dn \cos \gamma),$$

где m – порядок интерференции (1,2,...), d – толщина образца (см), n – показатель преломления образца, γ – угол преломленной волны, f_{Tmax} – значение частоты для максимума пропускания (см⁻¹).

а

б

Рис. 6. Спектры коэффициента пропускания плоскопараллельной пластины GaAs, полученные при двух геометриях измерительного тракта. Синие точки – эксперимент, красная линия – теория: а) образец размещен на расстоянии 25 см от источника; б) образец размещен на расстоянии 80 см от источника

Для T_{max} можно записать следующую пропорциональность:

$$T_{max} \sim \exp(-4\pi k d f_{T_{max}} / \cos \gamma),$$

где k – коэффициент поглощения образца,

$$\sin \gamma = \sin \alpha / n,$$

α – угол падения волны на образец.

Точность определения показателя преломления исследуемого образца из такого спектра пропускания с учетом наклонного падения волны составляет $\pm 0,2$ %. Для измеренного

тестового образца GaAs эти значения равны $n = 3,589$, $k = 3,1 \times 10^{-4}$.

Заключение

Квазиоптическая техника фактически вся построена на поиске оптимального компромисса между размерами элементов и длиной квазиоптических трактов и допустимой величиной потерь мощности, связанной с дифракционными явлениями, особенно существенными на длинных волнах, а также

Рис. 7. Спектр коэффициента пропускания плоскопараллельной пластины GaAs при повороте образца относительно оптической оси на 5 градусов. Синие точки – эксперимент, красная линия – теория

поглощением в воздухе, весьма значительным на коротких волнах и вблизи линий поглощения воды и кислорода.

Оптимальная длина квазиоптического тракта в длинноволновой части субмиллиметрового диапазона составляет 1 м, на этом расстоянии уже в основном отсутствуют явления ближней дифракционной зоны, искажающие результаты измерений. С укорочением длины волны рабочего излучения возможно сокращение протяженности квазиоптической схемы, что целесообразно и с точки зрения снижения потерь мощности на поглощение в воздухе.

В условиях высокой монохроматичности рабочего излучения, характерной для ЛОВ, осложняющим измерения фактором являются стоячие волны в квазиоптическом тракте. Для уменьшения их влияния целесообразно устанавливать изучаемый образец под углом не меньше пяти градусов по отношению к плоскости, нормальной волновому вектору квазиоптического пучка. Возникающее при этом усложнение расчетов несущественно при компьютерной обработке спектров.

Список литературы

1. Grill A. PECVD low and ultralow dielectric constant materials: From invention and research to products. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2016. 34. DOI: 10.1116/1.4943049
2. Zhang X.-C., Xu J. *Introduction to THz Wave Photonics*. Springer, 2010.
3. Харвей А.Ф., Техника сверхвысоких частот. Т. 2. М.: Сов. Радио, 1965. С. 544.
4. Kozlov G., Volkov A. *Coherent Source Submillimeter Wave Spectroscopy*, *Topics in Applied Physics*. 1998. Vol. 74. P. 52–109.
5. Козлов Г.В. (ред.) *Субмиллиметровая диэлектрическая спектроскопия твердых тел*. Труды Института общей физики. 1990. Т. 25. С. 1–221.
6. Волков А.А., Козлов Г.В., Гончаров Ю.Г., Лебедев С.П. Диэлектрические измерения и свойства твердых тел на частотах 10^{11} – 10^{12} Гц. Труды ИОФАН. Т. 25. М.: Наука, 1990. С. 3–51.
7. Волков А.А., Козлов Г.В., Лебедев С.П. Оптимизация измерений диэлектрических параметров материалов в диапазоне субмиллиметровых волн. *Радиотехника и электроника*. 1979. Т. 24. № 7. С. 1405–1412.

Об авторах

Козлов Геннадий Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель руководителя аппарата генерального директора – руководитель секретариата АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиофизика.

Лебедев Сергей Павлович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиофизика.

The specifics of quasi-optical measurements in the submillimetre waveband

Kozlov G. V.¹, Lebedev S. P.²

¹ JSC “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, Moscow, Russian Federation

² A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The paper investigates the influence of the electromagnetic field and standing wave structure in a quasi-optical waveguide on the dielectric measurement results and gives recommendations on the layout of measuring circuits.

Keywords: quasi-optics, power density, transmission spectrum

Information about the authors

Kozlov Gennadiy Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Deputy Head of the Office of General Director – Head of the Administrative Office, JSC “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: radiophysics.

Lebedev Sergey Pavlovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: radiophysics.