

- [9] Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем // Системы обработки информации. — 2012. — № 1 (99). — С. 169–175.
- [10] Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах // Системы обработки информации. — 2012. — № 7 (105). — С. 117–122.
- [11] Мачехин Ю.П., Курской Ю.С. Фрактально-энтропийный анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах // Измерительная техника. — 2014. — № 6. — С. 18–21.
- [12] Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской. Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием методов интервального анализа // Приборы и методы измерений. — 2015. — Т. 6, № 2. — С. 257–263.
- [13] Федер Е. Фракталы. — М.: Мир, 1991. — 258 с.
- [14] ISO/IEC Guide 98–1:2009 Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement: стандарт / ISO, Женева, 27.08.2009.
- [15] ISO/IEC Guide 98–3:2008/Suppl.1:2008 /Cor.1:2009 Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) — Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method—Technical Corrigendum 1: стандарт / ISO, Женева, 07.05.2009.

УДК 53.083.2

М.И. Дзюбенко, В.П. Радионов

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ

Measurement of the refractive index of transparent materials in the terahertz (THz) range required for the development of devices and systems that operate in this range. Submillimeter lasers are one of the most affordable sources of coherent THz radiation. They have features that allow you to measure the refractive index of transparent materials. The method for on-line measuring the refractive index of transparent materials in the terahertz range is represented. The measurable substance is placed in a quasi-optical resonator. Measurements are performed by means of coherent terahertz electromagnetic radiation. Performed test measurements of the refractive index. Justification reducing error of measurement of the refractive index, taking into account the physics of the processes in the space of resonance submillimeter laser system, we conducted. It was shown that the accuracy of measurement of the refractive index can be greatly increased by placing the test substance in the resonator THz laser. Presented techniques for measuring the refractive index of transparent materials in the THz range can be used in various fields of science, technology and medicine.

Ключевые слова: показатель преломления, терагерцевое когерентное электромагнитное излучение, квазиоптический резонатор, лазер субмиллиметрового диапазона.

Постановка проблемы

Электромагнитное излучение терагерцевого (ТГц) диапазона (интервал частот 0,1...10 ТГц) в настоящее время находит широкое применение в различных областях науки, техники, биологии и медицины. Для передачи и обработки ТГц излучения применяют диэлектрические и металло-диэлектрические волноводы, а также различные квазиоптические системы – ответвители, преобразователи пучка, вентили, вращатели поляризации и др. В этих устройствах в составе диэлектрических компонентов волноводов, делительных пластин, линз, а также в материалах, заполняющих полости волноводов, применяют прозрачные для ТГц излучения вещества. При разработке и изготовлении упо-

мянутых устройств, особенно таких их элементов, как линзы и делительные пластины, необходимо знать величину показателя преломления (ПП) веществ, из которых они изготовлены. Например, при применении делительных пластин в резонансных системах необходимо выбрать такую их оптическую толщину, которая обеспечивает синфазность сигнала, отраженного от обеих ее рабочих поверхностей. Поэтому для выбора толщины делительной пластины необходимо знать величину ПП ее материала с величиной погрешности, которая часто отсутствует в справочных материалах. Кроме того, в квазиоптических системах используются композитные и слоистые материалы, например, слюда и текстолит, для которых характерен большой разброс значений ПП.

Многие методы измерения ПП, которые успешно применяются в оптике либо в радиочастотных диапазонах становятся неприемлемыми в ТГц диапазоне. Главными причинами является то, что в этом диапазоне формировать узкие пучки не позволяет дифракционная расходимость, практически отсутствуют мощные источники ТГц излучения и достаточно чувствительные приемники.

Целью данной работы является разработка методов измерения показателя преломления веществ и материалов в ТГц диапазоне частот.

Основная часть

Нами разработаны методики измерения ПП веществ, прозрачных в ТГц интервале частот с использованием лазера субмиллиметрового (субмм) диапазона. Они позволяют осуществлять как оперативные измерения величины показателя преломления, не требующие высокой точности, так и высокоточные измерения.

Экспресс-измерение величины показателя преломления позволяет осуществить методика с применением измерительной установки, показанной на рис. 1

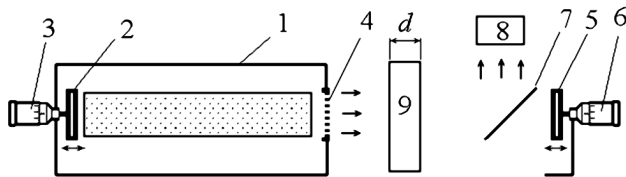


Рис. 1. Схема экспресс-измерения величины показателя преломления прозрачных веществ в ТГц диапазоне

Измерительная установка содержит газоразрядный HCN-лазер 1, с рабочей длиной волны $\lambda = 337$ мкм. Лазер 1 имеет основной активный резонатор, образованный плоским металлическим зеркалом 2 с механизмом 3 его осевого перемещения и частично прозрачным зеркалом 4. В состав измерительной установки входит дополнительный измерительный резонатор, образованный частично прозрачным выходным зеркалом лазера 4 и плоским металлическим зеркалом 5 с механизмом 6 его осевого перемещения. Между зеркалами 4 и 5 измерительного резонатора, под углом 45° к его оси, установлена частично прозрачная делительная пластина 7, которая способствует выводу части энергии излучения в приемник 8. При настройке резонатора лазера 1 с помощью осевого перемещения зеркала 3 на резонансную частоту излучения, когда между зеркалами 2 и 4 укладывается целое число полувольт, в резонаторе лазера устанавливается режим автоколебаний, происходит генерация ТГц лазерного излучения. Затем производится настройка измерительного резонатора с помощью осевого перемещения зеркала 5, чтобы между зеркалами 4 и 5 так же укладывалось целое число полувольт. При этом в измерительном резонаторе происходит накопление энергии лазерного излучения, вызывающее рост амплитуды сигнала на

выходе приемника 8 в несколько раз. Острота всплеска сигнала на приемнике 8 зависит от добротности измерительного резонатора. Поскольку коэффициент пропускания зеркала 4 невелик и составляет примерно 1–3 %, то резонансные процессы в измерительном резонаторе не оказывают существенного влияния на автоколебательный процесс в резонаторе лазера 1. При установке в измерительный резонатор пластины из измеряемого образца 9 происходит изменение его оптической длины. Чтобы восстановить настройку в резонанс необходимо переместить зеркало 5 вдоль оси. Поскольку величина ПП исследуемого вещества образца 9 больше величины ПП воздуха, то для восстановления настройки резонатора необходимо уменьшить расстояние между зеркалами 4 и 5. Измерив величину перемещения ΔL зеркала 5, можно определить величину ПП пластины 9 с помощью формулы

$$n_2 = \frac{d + \Delta L}{d} n_1, \quad (1)$$

где d — геометрическая толщина пластины 9 из исследуемого материала; n_1 — значение ПП воздуха.

Абсолютная погрешность измерения ΔL составляет около 5...10 мкм, она зависит от добротности дополнительного резонатора и погрешности измерения механизма перемещения.

Нами проведены тестовые измерения величины ПП фторопласта с помощью установки, представленной на рис. 1. Исследованы образцы фторопластовой пленки толщиной $d = 50, 200$ и 300 мкм. Величина приращения расстояния ΔL между зеркалами 4 и 5 дополнительного резонатора составила соответственно 20, 80 и 120 мкм. Расчет ПП по формуле (1) дает величину 1,4. Более точное значение ПП можно получить при увеличении толщины измеряемого образца. Для этого можно последовательно увеличивать количество измеряемых пластин с одновременной подстройкой дополнительного резонатора. При измерении пакета из 10 фторопластовых пленок толщиной по $d = 200$ мкм величина приращения расстояния ΔL между зеркалами 4 и 5 составила 880 мкм. Расчет ПП по формуле (1) дает величину 1,44, что соответствует справочным данным [1]. Следовательно, при наличии такой сравнительно простой установки открывается возможность осуществлять отбор и сортировку делительных пластин из материалов, прозрачных для электромагнитного излучения в ТГц интервале частот. Точность определения ПП можно повышать при дальнейшем увеличении толщины исследуемых пластин. Однако при этом увеличиваются потери, вносимые в измерительный резонатор, снижается его добротность и, следовательно, имеет место расширение резонансного пика мощности. Это вызывает увеличение погрешности измерения ΔL , что негативно влияет на точность определения ПП. Несколько повысить добротность измерительного резонатора позволяет введение в его

состав второго настраиваемого зеркала. Оно устанавливается напротив приемника 8 и делительной пластины 7 под углом 45° к ней. При этом лазерное излучение, которое отражается от пластины 7 в противоположном направлении от приемника 8 не теряется, а возвращается обратно в резонатор. В этом случае при измерении нужно производить настройку обоих зеркал измерительного резонатора.

Эту же измерительную установку можно использовать и для измерения ПП газообразных и жидких веществ. Для этого вместо пластины 9 устанавливается измерительная кювета, в которой производится сравнение ПП исследуемых веществ с ПП воздуха или вакуума. При этом кювета может иметь большую длину d , что позволяет на несколько порядков повысить точность измерения, если исследуемое вещество не вносит значительных потерь в резонатор.

Существенно уменьшить погрешность определения ПП прозрачных веществ позволяет метод, основанный на применении схемы измерительной установки, в которой исследуемый образец помещен между зеркалами резонатора субмм лазера [2]. Этому способствуют особенности HCN-лазеров. Известно, что шаг дискретности собственных частот резонатора HCN-лазеров, как правило, гораздо больше ширины полосы усиления активного вещества, что предопределяет работу лазера в одномодовом одночастотном режиме. Это обусловлено тем, что возбуждение автоколебаний (генерации) в HCN-лазере возможно лишь при определенных значениях осевого расстояния между плоскими зеркалами его резонатора, а именно тогда, когда между рабочими поверхностями зеркал укладывается целое число полувольт рабочей волны. Поэтому резонатор таких лазеров снабжен механизмом перемещения одного из зеркал вдоль его оси. При перемещении зеркала наблюдаются отдельные всплески лазерной генерации с ярко выраженными вершинами, расстояние между которыми равно половине длины волны генерируемого излучения (рис. 2). На этом рисунке представлен случай, когда генерация возникает только на основной поперечной моде. При перемещении зеркала в пределах зоны генерации, частота генерируемого излучения изменяется от минимальной длины рабочей волны λ_{\min} до максимальной длины волны λ_{\max} в пределах полосы излучения активного вещества (по уровню сырья генерации). Максимум генерации наблюдается на центральной частоте при длине волны λ_0 . Частотный диапазон перестройки HCN-лазера составляет $\sim 10 \dots 15$ МГц. Интервал перемещения зеркала, на котором наблюдается процесс лазерной генерации — $M\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda$ — диапазон длины волн генерации в пределах полосы излучения активного вещества, M — целое число полувольт, укладываемое между зеркалами) зависит от ширины полосы излучения активного вещества и осевого расстояния между зеркалами лазера. В HCN-лазере, с резонатором длиной ~ 1 м, $M\Delta\lambda$ составляет ~ 15 мкм, а расстояние, на которое нужно переместить зеркало для получения следующего всплеска излучения,

составляет $\Delta L = 168,5$ мкм (половина длины волны излучения $\lambda_0 = 337$ мкм). Следует учитывать, что интервал перемещения зеркала, на котором наблюдается генерация, пропорционален величине осевого расстояния между плоскими зеркалами резонатора лазера. Поэтому в резонаторе с большим осевым расстоянием между плоскими зеркалами, когда $M\Delta\lambda$ превышает половину длины волны (для HCN-лазера при расстоянии между зеркалами свыше 15 м), пики всплесков генерируемой лазером мощности начнут сливаться. Осевое расстояние между плоскими зеркалами реальных HCN-лазеров обычно не превышает 2–3 м, поэтому зависимость мощности от величины перемещения подвижного зеркала резонатора HCN-лазеров имеет вид, изображенный на рис. 2.

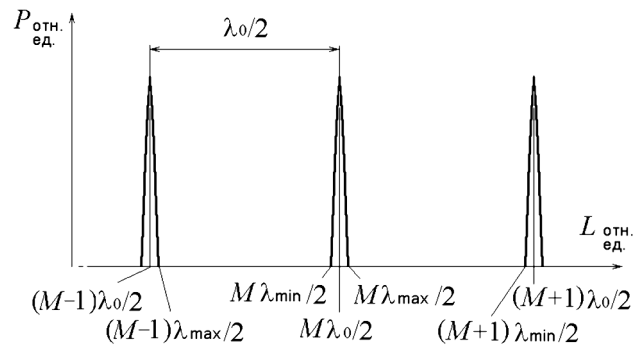


Рис. 2. Характер зависимости мощности лазерного излучения P от длины резонатора L : M — целое число полувольт, укладываемое между зеркалами

Если в лазерном резонаторе длиной 1 м произойдет изменение показателя преломления среды на величину $\Delta n/n$ порядка 10^{-6} , то для сохранения настройки на резонанс потребуется изменить длину резонатора на 1 мкм. Такое изменение длины позволяет контролировать применяющийся в HCN-лазерах механизм перемещения зеркала. Острота “пика излучения” и параметры штатного механизма перемещения зеркала дают возможность контролировать настройку на максимум с погрешностью порядка 1 мкм. Таким образом, открываются широкие возможности измерения величины ПП с высокой точностью при помощи активного резонатора ТГц лазера. Причем чем больше длина резонатора и меньше цена деления механизма перемещения зеркала — тем меньше погрешность измерения.

Для осуществления измерения величины ПП газообразных или жидких веществ необходимо установить в рабочем резонаторе лазера полость для размещения исследуемых образцов, например, прозрачную кювету. Метод измерения основан на сравнении расстояния между плоскими зеркалами лазера в резонансе в условиях, когда в резонаторе размещается кювета, заполненная эталонным веществом с известным показателем преломления, а затем в условиях заполнения кюветы исследуемым веществом. В обоих случаях между зеркалами должно укладываться одинаковое число полувольт, и это условие надо строго соблюдать. При измере-

нии газообразных веществ в качестве эталонного вещества удобно применить вакуумированную кювету, а при измерении жидких и твердых веществ удобно использовать кювету с воздухом.

Лазерная установка для определения величины ПП газообразных веществ показана на рис. 3.

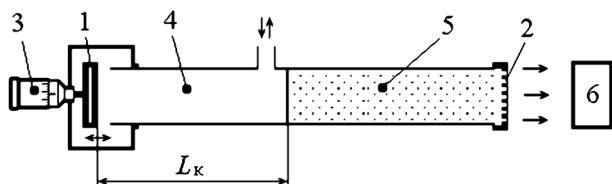


Рис. 3. Схема измерительной установки для определения величины ПП газообразных веществ

Схема измерительной установки содержит HCN лазер с резонатором, образованным зеркалами 1, 2. Плоское металлическое зеркало 1 снабжено микрометрическим механизмом 3 для перемещения его вдоль оси резонатора. Зеркало 2 выполнено частично прозрачным и служит для вывода мощности генерируемого лазером излучения в приемник 6. Между зеркалами 1 и 2 резонатора расположены измерительная кювета 4 с исследуемой средой и полость 5 с активной лазерной средой.

Последовательность операций в процессе измерения следующая. Сначала в измерительной кювете 4 создают вакуум. Перемещая зеркало 1 с помощью микрометрического механизма 3, достигают установления максимума мощности лазерной генерации, что соответствует настройке резонатора в резонанс на центральной частоте линии излучения активной среды 5. Затем кювета 4 заполняется измеряемым газообразным веществом. Это вызывает изменение среднего показателя преломления в резонаторе, его расстройку и уменьшение интенсивности или исчезновение лазерной генерации. Для восстановления устойчивой генерации необходимо возобновить настройку путем перемещения зеркала 1 с помощью механизма 3. Подстройка лазера производится синхронно с напуском газа, чтобы резонатор оставался настроенным на один и тот же пик генерации $M\lambda_0/2$ (см. рис. 2). Величина перемещения ΔL регистрируется на микрометрической шкале механизма 3. Абсолютное значение величины показателя преломления исследуемого вещества определяют по формуле, полученной из соотношения (1), с учетом того, что в качестве эталона применен вакуум определенной глубины ($n_1 \cong 1$), а изменение величины показателя преломления происходит не на всей длине между зеркалами 1 и 2, а только в измерительной кювете 4:

$$n_2 = \frac{L_{k1}}{L_{k1} - \Delta L} n_1 \cong \frac{L_{k1}}{L_{k1} - \Delta L}, \quad (2)$$

где L_{k1} — длина измерительной кюветы 4 до заполнения ее исследуемым веществом; ΔL — изменение расстояния между зеркалами 1 и 2 резонатора лазера.

При использовании измерительной кюветы 4 длиной 1 м и микрометрического устройства перемещения 3 с ценой деления 1 мкм расчетная погрешность измерения величины ПП составляет $\sim 10^{-6}$. Погрешность измерения может быть снижена, по крайней мере, на 1–2 порядка за счет увеличения длины измерительной кюветы и применения микрометрической шкалы механизма перемещения с соответствующей ценой деления. Общая максимальная длина резонатора лазера определяется возможностью настройки на центральную частоту. Для HCN-лазера строго одночастотный режим возможен при расстоянии между зеркалами до ~ 15 м, но различить пик настройки на центральную частоту излучения можно и при, гораздо, больших длинах. Отношение длин измерительной кюветы и активной среды лазера необходимо выбирать с учетом интенсивности затухания лазерного излучения в кювете 4 с исследуемым веществом и обеспечения требуемого для измерений уровня выходной мощности.

Схему измерительной установки, представленную на рис. 3, можно применить также для измерения величины показателя преломления жидких веществ. В этом случае ось HCN-лазера целесообразно ориентировать в вертикальном положении. Тогда при постепенном заполнении измерительной кюветы 4 исследуемой жидкостью плавно изменяется соотношение осевых размеров зон, занимаемых жидкостью и эталонным веществом. При этом обеспечивается возможность синхронно корректировать осевую длину резонатора.

При измерении ПП твердых веществ вместо измерительной кюветы 4 целесообразно использовать измерительный зазор, заполненный воздухом. Величину ПП в этом случае вычисляют по формуле (1). В зазор, перпендикулярно оси резонатора, помещают исследуемый материал в виде пластины. Последовательно помещая пластины с возрастанием их толщины, добиваются требуемой погрешности измерения при сохранении настройки на один и тот же пик мощности лазерного излучения.

Выводы

Разработанные нами методы открывают широкие возможности измерения показателя преломления прозрачных веществ в ТГц диапазоне и могут найти применение как в научных исследованиях, так и в соответствующих конструкторских разработках.

Список литературы

- [1] P.F. Goldsmith. Quasioptical Systems — New York: IEE Press, 1997. — 430 p.
- [2] Спосіб визначення показника заломлення прозорих речовин Патент України № UA 103393 С2 від 10.10.2013 на винахід бюл. № 19 по заявці № а 2011 15456 від 27.12.2011 / В.К. Кисельов, М.І. Дзюбенко, В.П. Радионов.