

М. И. Дзюбенко, В. К. Киселев, В. П. Радионов

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

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: kiseliov@ire.kharkov.ua

РЕЗОНАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ

Измерение показателя преломления прозрачных веществ в терагерцевом (ТГц) диапазоне требуется при разработке различных приборов и систем, работающих в этом диапазоне. Субмиллиметровые лазеры являются одними из самых доступных источников когерентного ТГц излучения и обладают особенностями, позволяющими проводить измерения показателя преломления прозрачных веществ. Представлена методика оперативного измерения показателя преломления прозрачных веществ, расположенных в квазиоптическом резонаторе, с помощью когерентного электромагнитного излучения ТГц диапазона. Выполнены тестовые измерения показателя преломления. Проведено обоснование уменьшения погрешности измерения показателя преломления с учетом физики процессов в межзеркальном пространстве резонансной системы субмиллиметрового лазера. Показано, что при размещении исследуемого вещества внутри резонатора ТГц лазера может быть существенно повышена точность измерения показателя преломления. Представленные методики измерения показателя преломления прозрачных веществ в ТГц диапазоне могут найти применение в различных областях науки, техники и медицины. Ил. 3. Библиогр.: 5 назв.

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

Электромагнитное излучение терагерцевого (ТГц) диапазона (интервал частот $0,1 \dots 10$ ТГц) в настоящее время находит широкое применение в различных областях науки и техники, биологии и медицины. Так, ТГц излучение применяют для диагностики термоядерной плазмы в токамаках [1], в дефектоскопии и радиолокации [2], в различных физических и медицинских исследованиях [3]. Для передачи ТГц электромагнитного излучения применяют квазиоптические системы, которые содержат в себе элементы трактов, в частности, диэлектрические и металлодиэлектрические волноводы, элементы соединения и управления – ответвители, преобразователи пучка, вентили, вращатели поляризации и др. В названных 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 упомянутых устройств, особенно таких их элементов, как линзы и делительные пластины, необходимо знать величину показателя преломления 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 показателя преломления ее материала с величиной погрешности, которая часто отсутствует в справочных материалах. Разработка метода измерения показателя преломления в ТГц интервале частот является актуальной также в связи с широким применением в квазиоптических системах композитных и слоистых материалов, таких как слюда и текстолит,

для которых характерен большой разброс значений показателя преломления. В данной работе описан новый метод измерения показателя преломления газообразных и конденсированных (жидких или твердотельных) сред в высокочастотной области ТГц интервала частот.

Нами предложен новый резонансный метод измерения показателя преломления веществ, прозрачных в ТГц интервале частот с применением резонаторной системы лазера субмиллиметрового (субмм) диапазона [4]. В качестве источника электромагнитного излучения субмм диапазона применен газоразрядный HCN-лазер – доступный источник когерентного высокостабильного излучения ТГц интервала частот. При этом упомянутый лазер позволяет осуществлять как оперативные измерения величины показателя преломления прозрачных материалов, не требующие высокой точности, так и высокоточные измерения.

Экспресс-измерение величины показателя преломления твердых веществ позволяет осуществить методика с применением измерительной установки, схема которой построена на основе газоразрядного HCN-лазера и дополнительного резонатора (рис. 1).

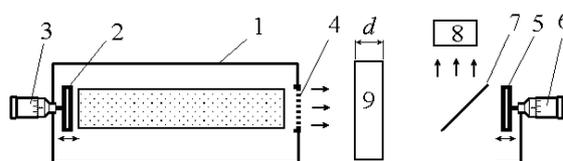


Рис. 1. Схема экспресс-измерения величины показателя преломления прозрачных веществ в ТГц диапазоне

Схема измерительной установки содержит газоразрядный HCN-лазер 1, с рабочей дли-

ной волны $\lambda = 337$ мкм. Конструкция лазера 1 имеет основной активный открытый резонатор (ОР), образованный плоским металлическим зеркалом 2 с механизмом 3 его осевого перемещения и частично прозрачным зеркалом 4. В состав измерительной установки входит дополнительный измерительный ОР, образованный частично прозрачным зеркалом 4 и плоским металлическим зеркалом 5 с механизмом 6 его осевого перемещения. Между зеркалами 4 и 5 дополнительного ОР, под углом 45° к его оси, установлена частично прозрачная делительная пластина 7, которая способствует выводу части энергии излучения в приемник 8. При настройке основного ОР лазера 1 с помощью осевого перемещения зеркала 3 на резонансную частоту излучения, когда между зеркалами 2 и 4 укладывается целое число полуволн, в основном ОР устанавливается режим автоколебаний, происходит генерация ТГц лазерного излучения. Затем производится настройка дополнительного ОР с помощью осевого перемещения зеркала 5, чтобы между зеркалами 4 и 5 укладывалось целое число полуволн. При этом в дополнительном ОР происходит накопление энергии лазерного излучения, вызывающее рост амплитуды сигнала на выходе приемнике 8 в несколько раз. Поскольку коэффициент пропускания зеркала 4 невелик и составляет примерно 1–3 %, то резонансные процессы в дополнительном резонаторе не оказывают существенного влияния на автоколебательный процесс в основном резонаторе лазера 1. При установке в дополнительный резонатор пластины из измеряемого образца 9 происходит изменение оптической длины дополнительного ОР. Чтобы настроить ОР в резонанс необходимо переместить зеркало 5 вдоль оси. Поскольку величина показателя преломления исследуемого вещества образца 9 больше величины показателя преломления воздуха, то для настройки дополнительного ОР в резонанс необходимо уменьшить расстояние между зеркалами 4 и 5. Зная величину перемещения ΔL зеркала 5, можно определить величину показателя преломления 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 показателя преломления воздуха.

Хотя резонансный пик мощности дополнительного ОР менее острый, чем резонансный пик мощности основного ОР с активным рабочим веществом, все же удается определить расстояние между зеркалами 4 и 5 дополнительного ОР при настройке в резонанс с погрешностью около 5...10 мкм.

Нами проведены тестовые измерения величины показателя преломления 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 ОР составила соответственно 20, 80 и 120 мкм. Расчет показателя преломления по формуле (1) дает величину 1,4. Более точное значение показателя преломления можно получить при увеличении толщины измеряемого образца. Для этого можно последовательно увеличивать количество измеряемых пластин с одновременной подстройкой дополнительного ОР. При измерении пакета из 10 фторопластовых пленок толщиной по $d = 200$ мкм величина приращения расстояния ΔL между зеркалами 4 и 5 дополнительного ОР составила 880 мкм. Расчет показателя преломления по формуле (1) дает величину 1,44, что соответствует справочным данным [5]. 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 показателя преломления 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 показателя преломления.

Существенно уменьшить погрешность определения показателя преломления прозрачных образцов позволяет метод, основанный на применении схемы измерительной установки, в которой исследуемый образец помещен между зеркалами основного ОР субмм лазера. Этому способствуют особенности HCN-лазеров. Известно, что шаг дискретности собственных частот ОР 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 ОР, а именно тогда, когда между рабочими поверхностями зеркал укладывается целое число полуволн рабочей волны. Поэтому ОР таких лазеров снабжен механизмом перемещения одного из зеркал вдоль его оси. При перемещении зеркала наблюдаются отдельные всплески лазерной генерации с ярко выраженными вершинами, расстояние меж-

ду которыми равно половине длины волны генерируемого излучения (рис. 2). На этом рисунке представлен случай, когда генерация возникает только на основной поперечной моде TEM_{11} (длина волны излучения $\lambda = 337$ мкм). Моды высшего порядка и излучение на волне $\lambda = 311$ мкм имеют меньшую мощность и подавляются посредством подбора коэффициента пропускания частично прозрачного зеркала 4.

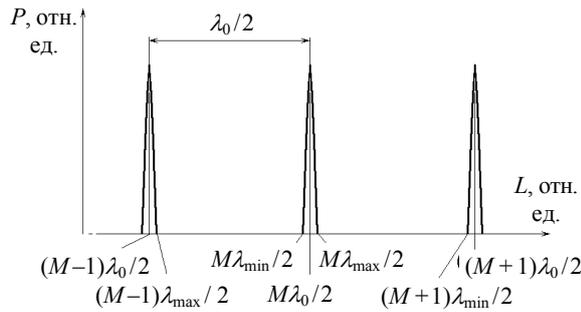


Рис. 2. Характер зависимости мощности лазерного излучения P от длины резонатора L : M – целое число полувольт, укладываемое между зеркалами; λ_0 – длина волны, соответствующая центральной частоте линии излучения активного вещества; λ_{\min} , λ_{\max} – минимальная и максимальная длины волн из диапазона генерации в пределах полосы излучения активного вещества

При перемещении зеркала в пределах зоны генерации частота генерируемого излучения изменяется от минимальной длины рабочей волны λ_{\min} до максимальной рабочей волны λ_{\max} в пределах полосы излучения активного вещества (по уровню срыва генерации). 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 генерации в пределах полосы излучения активного вещества) зависит от ширины полосы излучения активного вещества и осевого расстояния между зеркалами ОР 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 $\lambda = 337$ мкм). Следует учитывать, что интервал перемещения зеркала, на котором наблюдается генерация, пропорционален величине осевого расстояния между плоскими зеркалами ОР лазера. Поэтому в ОР с большим осевым расстоянием между плоскими зеркалами ОР, 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 ОР реальных HCN-лазеров

обычно не превышает 2–3 м, поэтому зависимость мощности от величины перемещения подвижного зеркала ОР HCN-лазеров имеет вид, изображенный на рис. 2. Настройка на максимум пика лазерного излучения соответствует расстоянию между зеркалами:

$$L = M \frac{\lambda_0}{2} = M \frac{c}{2nf_0},$$

где M – число полувольт, укладываемое между зеркалами; λ_0 – длина волны в центре линии излучения активного вещества; f_0 – центральная частота линии излучения; c – скорость света в свободном пространстве (вакууме); n – величина абсолютного показателя преломления вещества в ОР лазера.

Оптическая длина пути излучения в резонаторе лазера, настроенном в резонанс на центральной частоте спектральной линии излучения, равна

$$Ln = M \frac{c}{2f_0}.$$

Если по какой-либо причине изменится показатель преломления вещества в резонаторе, то для сохранения резонанса на центральной частоте, соответствующей максимуму мощности излучения, необходимо изменить длину резонатора. При увеличении показателя преломления необходимо уменьшить длину резонатора лазера. Для сохранения настройки на центральную частоту с одинаковым числом полувольт между зеркалами, всегда должно выполняться соотношение

$$L_1 n_1 = L_2 n_2.$$

Если $n_2 > n_1$, то $L_2 < L_1$, $\Delta L = L_1 - L_2$ и выполняются соотношения:

$$n_2 = \frac{L_1}{L_2} n_1 = \frac{L_1}{L_1 - \Delta L} n_1 = \frac{L_2 + \Delta L}{L_2} n_1, \quad (2)$$

$$\Delta n = n_2 - n_1 = n_1 \frac{\Delta L}{L_2},$$

относительное изменение показателя преломления:

$$\frac{\Delta n}{n_1} = \frac{\Delta L}{L_2}.$$

Следовательно, 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»

дает возможность контролировать настройку на максимум с погрешностью порядка 1 мкм. Таким образом, открываются широкие возможности измерения величины показателя преломления 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 показателя преломления 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 ОР лазера в резонансе в условиях сначала заполнения кюветы эталонным веществом с известным показателем преломления, а затем в условиях заполнения кюветы исследуемым веществом. В обоих случаях между зеркалами должно укладываться одинаковое число полуволн, и это условие надо строго соблюдать. При измерении газообразных веществ в качестве эталонного вещества удобно применить вакуумированную кювету, а при измерении жидких и твердых веществ удобно использовать кювету с воздухом.

Для определения величины показателя преломления газообразных веществ в субмм диапазоне предложена схема измерительной установки на основе HCN-лазера [4] (рис. 3).

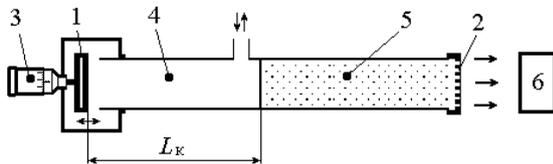


Рис. 3. Схема измерительной установки для определения величины показателя преломления газообразных и жидких сред

Схема измерительной установки содержит HCN-лазер с ОР, образованным зеркалами 1, 2. Плоское металлическое зеркало 1 снабжено микрометрическим механизмом 3 для перемещения его вдоль оси ОР. 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

ОР 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, расстройку ОР и уменьшение интенсивности или исчезновение лазерной генерации. Для восстановления устойчивой генерации необходимо повторно настроить ОР в резонанс путем перемещения зеркала 1 (изменения осевого расстояния между плоскими зеркалами 1 и 2) с помощью механизма 3. Подстройка ОР 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 (2), 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 ОР между зеркалами 1 и 2, а только в измерительной кювете 4:

$$n_2 = \frac{L_{к1}}{L_{к1} - \Delta L} n_1 \cong \frac{L_{к1}}{L_{к1} - \Delta L}, \quad (3)$$

где $L_{к1}$ – длина измерительной кюветы 4 до заполнения ее исследуемым веществом; ΔL – изменение расстояния между зеркалами 1 и 2 ОР лазера.

Расчетная погрешность измерения величины показателя преломления исследуемой газовой среды составляет $\sim 10^{-6}$ при использовании измерительной кюветы 4 длиной 1 м и микрометрического устройства перемещения 3 с ценой деления 1 мкм. 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 ОР лазера определяется условиями одночастотной генерации. Для HCN-лазера строго одночастотный режим возможен при осевом расстоянии до ~ 15 м между плоскими зеркалами его ОР, но различить пики одночастотного излучения HCN-лазера можно и при длинах больше 15 м. Отношение длин L_k 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 ОР HCN-лазера целесообразно ориентировать в вертикальном положении. Тогда при постепенном заполнении из-

мерительной кюветы 4 исследуемой жидкостью плавно изменяется соотношение осевых размеров зон, занимаемых жидкостью и эталонным веществом. При этом обеспечивается возможность синхронно корректировать осевую длину ОР.

При измерении величины показателя преломления твердых веществ вместо измерительной кюветы 4 целесообразно использовать измерительный зазор, заполненный воздухом. Величину показателя преломления 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.

Предложенные 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. Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ИРЭ им. А. Я. Усикова канд. физ.-мат. наук В. Д. Еремке за полезные замечания.

Библиографический список

1. Горбунов Е. П. Применение многоканального лазерного интерферометра вертикального зондирования для измерения профиля плотности плазмы на Токамаке Т-15 / Е. П. Горбунов, В. Ф. Денисов, П. К. Нестеров // Физика плазмы. – 1992. – 18, вып. 2. – С. 162–165.
2. Evaluation of the influence of defects on the quality of composites using a quasi-optical polarization-frequency reflectometry in sub-terahertz domain / V. I. Bezborodov, V. K. Kiseliyov, Ye. M. Kuleshov et al. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – 72, N 15. – P. 1411–1422.
3. Применение терагерцевой лазерной техники для исследования влияния ГВЧ-излучения на опухолевые процессы / В. К. Киселев, В. И. Маколинец, Н. А. Митряева, В. П. Радионов / Радиофизика и электрон. – 2012. – 3(17), № 2. – С. 95–101.
4. Пат. України № UA 103393 С2. Спосіб визначення показника заломлення прозорих речовин / В. К. Кісельов, М. І. Дзюбенко, В. П. Радіонов; заявник і патентовласник Ін-т радіофізики та електрон. НАН України. – № а 2011 15456; по заявці від 27.12.2011; опубл. 10.10.2013, бюл. № 19.
5. Goldsmith P. F. Quasioptical Systems / P. F. Goldsmith. – N. Y.: IEE Press, 1997. – 430 p.

Рукопись поступила 19.08.2014

M. I. Dzyubenko, V. K. Kiseliyov, V. P. Radionov

RESONATOR METHODS OF MEASURING REFRACTIVE INDEX OF A TRANSPARENT SUBSTANCE IN THE TERAHERTZ RANGE

Measurement of the refractive index of transparent materials in the terahertz (THz) range is 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 one 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. The test measurements of the refractive index are performed. We provided justification of reducing the error of the refractive index measurement, taking into account the physics of the processes in the space of resonance submillimeter laser system. 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. The 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.

Key words: refractive index, terahertz coherent electromagnetic radiation, quasi-optical resonator, submillimeter laser.

М. І. Дзюбенко, В. К. Кісельов, В. П. Радіонов

РЕЗОНАТОРНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ПРОЗОРИХ РЕЧОВИН У ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Вимірювання показника заломлення прозорих речовин в терагерцевому (ТГц) діапазоні буває необхідним при розробці різноманітних приладів і систем, що працюють у цьому діапазоні. Субміліметрові лазери є одними з найдоступніших джерел когерентного ТГц випромінювання і мають особливості, що дозволяють здійснювати вимірювання показника заломлення. Подано методику оперативного вимірювання показника заломлення прозорих речовин, розташованих у квазіоптичному резонаторі, за допомогою когерентного електромагнітного випромінювання ТГц діапазону. Здійснено тестові вимірювання показника заломлення. Проведено обґрунтування зменшення похибки вимірювання показника заломлення з урахуванням фізики процесів в міжзеркальному просторі резонансної системи субміліметрового лазера. Показано, що при розміщенні досліджуваної речовини всередині резонатора ТГц лазера може бути значно підвищено точність вимірювання показника заломлення. Подані методики вимірювання показника заломлення прозорих речовин у ТГц діапазоні можуть знайти застосування в різноманітних галузях науки, техніки і медицини.

Ключові слова: показник заломлення, терагерцеве когерентне електромагнітне випромінювання, квазіоптичний резонатор, лазер субміліметрового діапазону.