

Таким образом, упругое последствие пропорционально интервалу напряжения.

2. Нагревание струны значительно ускоряет ход последствия. Например, при температуре 90 °С за 1,4 ч происходит тот же эффект, который при комнатной температуре требует 500 сут, т. е. отмечается ускорение процесса в 6000 раз.

3. Предварительный нагрев до 200 °С за 4 ч в натянутом состоянии вызывает большое изменение строя и приводит к полной стабилизации струны.

4. Предварительный нагрев до такой же температуры, за это же время, но на малых напряжениях уменьшает упругое последствие при последующих деформациях в 2,5 раза по сравнению с «сырыми» струнами.

На основании этих законов можно сделать вывод, имеющий отношение к струнному методу: струны приборов, предназначенные для длительной службы, должны быть предварительно стабилизированы путем прогрева при напряжении более высоком, чем рабочее. Установка нестабилизированных струн может привести к очень большим погрешностям, достигающим через полгода в неблагоприятных случаях 10 % и выше.

Литература

1. Кутчер Р. И., Секацкий В. С. Струнный датчик // Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления. Датчик — 2000: Тез. докл. XII науч.-техн. конф. с участием международных специалистов. М., 2000. С. 87—89.
2. Кутчер Р. И., Секацкий В. С. Устройство для линейных и угловых размеров на основе колебаний // Качество продукции машиностроения: Тез. науч.-техн. конф. Красноярск, 1998. С. 32—33.
3. Эткина Л. Г. Вибрационно-частотные преобразователи. Ч. 1. М.: Энергия, 1970.
4. Карцев Е. А., Коротков В. П. Унифицированные струнные измерительные преобразователи. М.: Машиностроение, 1981.
5. Цейтлин Я. М., Скачко Ю. В., Капырин В. В. Модифицированные струнные преобразователи для измерения геометрических величин. М.: Изд-во стандартов, 1989.
6. Щепетов А. Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств: Ч. 2. Расчет измерительных устройств. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2007.

Дата принятия 17.12.2014 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.22.419:620.19:537.531.04

Измерения коэффициентов пропускания образцов новых материалов в субтерагерцовом диапазоне частот

А. С. ЕРМОЛОВ¹, Г. Н. ИЗМАЙЛОВ², А. С. КУЗЬМИН², С. П. ЛЕБЕДЕВ³,
Ю. А. МИТЯГИН¹, В. Н. МУРЗИН¹, С. В. ЧУЧУПАЛ³

¹ Физический институт РАН им. П. Л. Лебедева, Москва, Россия

² Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³ Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова, Москва, Россия
e-mail: izmailov@mai.ru

Рассмотрено прохождение излучения в диапазоне частот 0,2—0,3 ТГц через образцы композитных материалов. Образцы — планка из углеродных волокон, уложенных в ленты, пропитанные эпоксидной смолой, и брусок из хаотично расположенных кварцевых нитей, скрепленных боросиликатным стеклом. Показана возможность использования результатов измерений в терагерцовом диапазоне частот для изучения структурных параметров и дефектоскопии композитных материалов.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон частот, коэффициент пропускания, композитные материалы, углеродные волокна, кварцевые нити, дефектоскопия.

The radiation propagation through the composite materials samples in the range 0,2—0,3 THz is considered. The samples are strips of carbon fibers packed in tapes impregnated with epoxy resin, and a block of randomly arranged quartz threads bound by borosilicate glass. Show the possibility of using this method to study the structural parameters and for composite materials flaw detection.

Key words: terahertz frequency range, coefficient transmission, composite materials, carbon fiber, quartz thread, flaw detection.

В литературе неоднократно подчеркивают важность развития техники, работающей в терагерцовом диапазоне частот, для высокоскоростных систем передачи и обработки

информации, идентификации состава материала и химического анализа (в фармакологии, медицинском обследовании), измерений свойств новых конструкционных материалов, не-

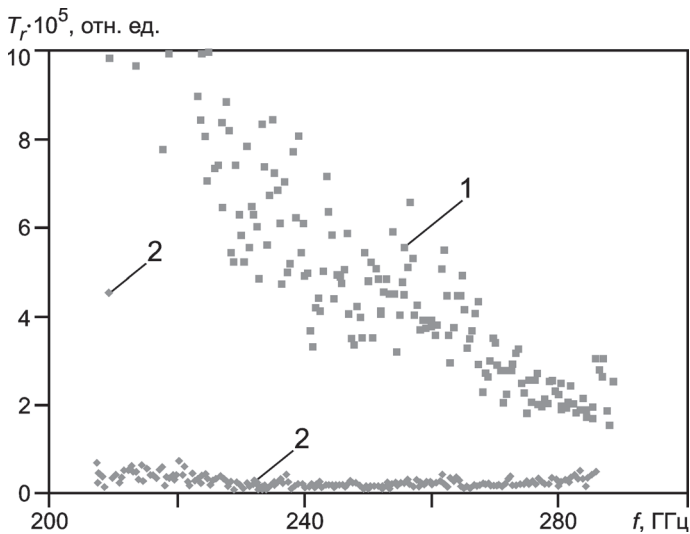


Рис. 1. Результаты измерений относительного коэффициента пропускания субтерагерцового излучения образца № 1 толщиной 1 мм в диапазоне частот $f = 0,2 \dots 0,3$ ТГц. Множества точек 1, 2 соответствуют ориентации вектора напряженности электрического поля соответственно ортогонально и параллельно укладке волокон

разрушающего контроля качества и целостности изделий. Терагерцовое излучение характеризуется длинами электромагнитных волн в диапазоне 0,1—1 мм, что соответствует области между микроволновым и инфракрасным излучениями. Рассматриваемый диапазон излучения требует новых методов и техники измерений. Из-за своих физических свойств терагерцовое излучение используется для установления неоднородности непрозрачных в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах конструкционных диэлектриков, при исследовании теплоизоляционных свойств новых материалов, измерении степени их черноты. Одним из новых приложений является изучение радиофизических свойств метаматериалов.

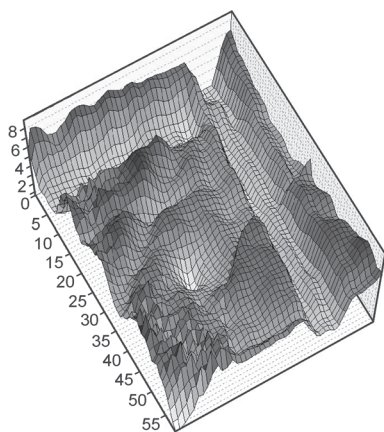


Рис. 3. 3D-изображение распределения, приведенного на рис. 2

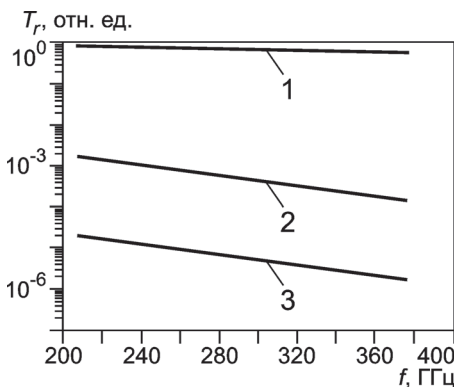


Рис. 4. Спектры пропускания образца № 2 из волокон плавленного кварца (кривая 1) и образца № 1 из углеволокна толщиной 0,7 мм для двух поляризаций вектора электромагнитного излучения, падающего на образец (кривые 2, 3 — перпендикулярно и вдоль волокон, соответственно)

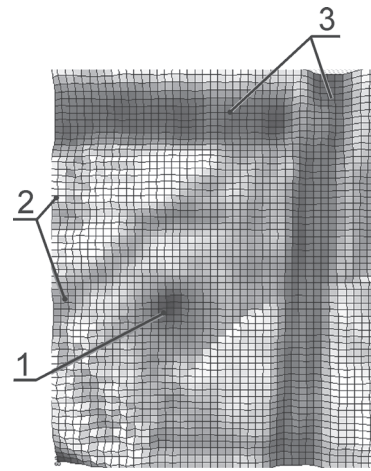


Рис. 2. Распределение коэффициента пропускания образца № 2 на рабочей частоте 0,30 ТГц. Искусственные неоднородности по толщине образца: 1 — отверстие диаметром 3 мм перпендикулярно плоскости наблюдения; 2, 3 — отверстия диаметрами соответственно 3, 5 мм в плоскости образца

Возможно, в ближайшее время будут созданы надежные, компактные и достаточно дешевые устройства для терагерцового диапазона, позволяющие решать перечисленные задачи. На пути создания измерительной техники такого типа имеются два существенных препятствия. Одно из них — создание мощных излучателей в выбранном диапазоне частот. Другое проявляется при разработке чувствительного детектора излучения для того же частотного диапазона (возможности его преодоления указаны в [1, 2]). Даже подобрав пару излучатель—детектор, важно установить рабочий диапазон частот, в котором будут выполняться измерения, поскольку присутствие полос поглощения новыми материалами в широком диапазоне частот

может быть обусловлено не только составом композита, но и его строением.

В связи с разработкой диагностической аппаратуры в терагерцовом диапазоне для дефектоскопии новых конструкционных материалов авторами были проведены измерения коэффициентов пропускания образцов композитных материалов в диапазоне частот $f = 0,2 \dots 0,3$ ТГц:

образец № 1 — планка толщиной 3,8 мм, состоящая из 10 слоев углеродных нитей марки УКН-2,5 диаметром 5,6 мкм, уложенных в виде лент с поперечной связкой долевой нитью марки УОЛ-300. Свободно уложенные ленты пропитывали эпоксидной смолой ЭПС-И-108. Ориентация армирующих волокон в образце изменялась ступенчато от слоя к слою — 0—45—90°;

образец № 2 — брусок 50×55×30 мм из марки ТЗМК-10, имеющего пониженную теплопроводность. В его составе волокна из плавного кварца диаметром 1—8 мкм расположены хаотично по всему образцу. Связкой волокон является боросиликатное стекло. Массовая плотность композита 140—150 кг/м³.

На образцы направляли излучение частотой 0,2—0,3 ТГц. Измерения проводили на квазиоптическом терагерцовом спектрометре СТД-08 с излучателем на базе ламп обратной волны в диапазоне $f = 0,1 \dots 1,25$ ТГц. Было сделано 400 измерений: 200 с ориентацией вектора напряженности электрического поля ортогонально укладке волокон и столько же с ориентацией параллельно укладке волокон. Результаты измерений представлены на рис. 1, 2. Неожиданными оказались зависимости коэффициентов пропускания от поляризации падающего излучения при очень высокой степе-

ни поглощения в образце № 1. Так, если вектор напряженности электромагнитной волны перпендикулярен оси волокна, то при изменении рабочей частоты просвечивающего излучения (210—290 ГГц) коэффициент пропускания уменьшается в пять раз, а если он направлен вдоль волокна, то поглощение практически отсутствует во всем частотном диапазоне (см. рис. 1, группы точек 1, 2).

При измерениях с образцом № 2 также получили распределение коэффициента пропускания по площади поперечного сечения образца с неоднородностями 10—15 % в исходном образце и до 80 % с искусственными неоднородностями по толщине образца в виде вертикальных и горизонтальных сквозных отверстий диаметрами 3 и 5 мм (см. рис. 2, 3). Рабочая частота измерений 0,30 ТГц. На восстановленных 3D-изображениях отчетливо видны перепады прозрачности образца.

Спектральные зависимости коэффициентов пропускания обоих образцов представлены на рис. 4, можно отметить влияние внутренней структуры образцов на коэффициенты поглощения. Экспоненциальная зависимость коэффициента пропускания от частоты изменяется примерно на два порядка и зависит от ориентации волокон относительно поля для образца № 1. Масштаб изменения соблюдался во всем исследуемом диапазоне частот (208—378 ГГц). В образце № 2 экспоненциальная зависимость коэффициента пропускания от частоты более пологая, но его значения примерно в тысячу раз больше, что можно объяснить большей толщиной образца. Полосы или резонансы поглощения не наблюдались ни в одном из образцов.

Таким образом, проведенные измерения коэффициентов пропускания в субтерагерцовом диапазоне частот электромагнитных волн показали возможность их использования для изучения структурных параметров и дефектоскопии композитных материалов наряду с уже широко известными акустическими, оптическими, рентгеноструктурными измерениями, а также техникой магнитной, электрической и микроволновой диагностики.

Л и т е р а т у р а

1. Митягин Ю. А., Мурзин В. Н., Савинов С. А., Измайлов Г. Н. Метод измерения интенсивности субТГц и ТГц излучения с использованием резонансно-туннельных диодов // Состояние и проблемы измерений: Сб. материалов XII Всерос. науч.-техн. конф.: М.: МГТУ им. Баумана, 2013. С. 54—57.

2. Измайлов Г. Н., Митягин Ю. А., Мурзин В. Н., Савинов С. А., Шмелев С. С., Апостолова Е. М. Метод измерений мощности субтерагерцового и терагерцового излучений с использованием резонансно-туннельных диодов // Измерительная техника. 2013. № 8. С. 16—18; Izmailov G. N., Mityagin Yu. A., Murzin V. N., Savinov S. A., Shmelev S. S., Apostolova E. M. A Method of Measuring the Power of Sub-Terahertz and Terahertz Radiation Using Resonant Tunneling Diodes // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 8. P. 856—860.

Дата принятия 01.07.2014 г.

621.382

Шум типа $1/F^\alpha$ в фоточувствительных элементах на основе сульфида свинца

Б. Н. МИРОШНИКОВ¹, И. Н. МИРОШНИКОВА¹, Х. С. Х. МОХАМЕД^{1, 2},
А. И. ПОПОВ¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,
e-mail: MiroshnikovaIN@mpei.ru
² Fayoum University, al Fayoum, Egypt

Проанализированы результаты исследований спектральной плотности мощности шума и просвечивающей электронной микроскопии фоточувствительных структур на основе сульфида свинца с точки зрения выявления возможных механизмов шумообразования.

Ключевые слова: фоточувствительные структуры, сульфид свинца, спектральная плотность мощности шума, просвечивающая электронная микроскопия.

The results of studies of noise power spectral density and transmission electron microscopy of PbS based photosensitive structures have been analyzed in view of identifying the possible noise formation mechanisms.

Key words: photosensitive structures, lead sulphide, noise power spectral density, transmission electron microscopy.

Из всех типов фотоприемников (ФП) инфракрасного излучения только фоторезисторы на основе сульфида свинца PbS имеют много различных методов и технологий изготовления. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что первые фоторезисторы были изготовлены до разработки теории фотопроводимости в монокристаллах, а с другой, неудачами разработчиков ФП на монокристаллических структурах.

Высокий коэффициент поглощения (10^4 см^{-1}) [1] предполагал использование тонких (1—2 мкм) слоев, а получение монокристаллических слоев эпитаксиальным методом удавалось лишь при высоких концентрациях основных носителей ($p \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$), что приводило к сокращению времени жизни носителей. Часто такие пленки считались нефоточувствительными, так как время жизни носителей становилось