

сопротивления, возникающее из-за перегрева шунта при протекании импульса тока амплитудой 200 кА. Границы не-исключенной систематической погрешности результата измерений сопротивления импульсному току при доверительной вероятности $P = 0,95$ составляют $\Theta_{R_k} = 4,2 \%$.

Были проведены испытания шунта в имитаторе тока молнии Московского энергетического института на воздействие импульсов амплитудой до 200 кА. Испытания показали, что характеристики шунта не изменились после воздействия с полным энергетическим нагружением током молнии.

ГЭТ 202—2012 обеспечивает единство измерений параметров импульсов тока молнии в приоритетных направлениях науки и техники. По метрологическим характеристикам разработанный эталон не уступает зарубежным аналогам. Эксплуатационные характеристики эталона позволяют его успешно использовать не только в области обеспечения единства измерений импульсных токов, но и при разработке новых быстродействующих и высокоточных СИ. Примером такого СИ служит разработанный во ВНИИОФИ трубчатый шунт с гофрированной стенкой, предназначенный для измерений импульсного тока при испытаниях авиационной техники.

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.624.21.0003 от 11.08.2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62414X0003).

Л и т е р а т у р а

1. SAE ARP 5412B. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms.
2. **Квалификационные** требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. 2004.
3. Кужекин И. П., Ларионов В. П., Прохоров Е. Н. Молния и молниезащита. М.: Знак, 2003.
4. Сахаров К. Ю., Михеев О. В., Туркин В. А., Сухов А. В. Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного тока молниевых разряда в диапазоне 1—100 кА // Измерительная техника. 2013. № 11. С.3—6.
5. Сахаров К. Ю., Михеев О. В., Туркин В. А., Уголев В. Л., Денисов М. Ю., Сухов А. В. Шунт для измерений импульсных токов на основе гофрированной трубы // Метрология. 2014. № 10. С. 11—19.
6. Sakharov K. Yu., Mikheev O. V., Turkin V. A., Dobrovorsky M. I., Sukhov A. V. The Upgrade of Subnanosecond TEM-cell of Russian National Standard Facility of Units of Pulsed Electric and Magnetic Field Strengths // Proc. 7th Int. Conf. Ultrawide-band and Ultrashort Impulse Signals. Kharkiv (Ukraine), 2014. P. 89—90.

Дата принятия 03.09.2015 г.

621.317.328:621.383

Методы и средства зондирования радиопоглощающих материалов с помощью сверхкоротких электромагнитных импульсов

К. Ю. САХАРОВ, В. А. ТУРКИН, О. В. МИХЕЕВ, А. В. СУХОВ, А. И. АЛЕШКО

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: sukhov@vniiofi.ru

Рассмотрены методы определения электрофизических характеристик радиопоглощающих материалов во временной области, основанные на зондировании сверхкороткими импульсами электромагнитного поля. Предложена измерительная система, с помощью которой можно определять значения коэффициентов отражения и пропускания радиопоглощающего материала в диапазоне частот до 40 ГГц.

Ключевые слова: сверхкороткий импульс, электрическое и магнитное поля, радиопоглощающий материал, полосковая линия, коэффициент отражения.

The time-domain methods of electro-physical characterization of radio-absorbent materials, based on ultra-short electric field pulses sounding, has been considered. There is proposed the measuring system by means of which values of reflection and transmittance coefficients of radar-absorbent material could be determined over the frequency range up to 40 GHz.

Key words: pulse ultra-short, electric and magnetic fields, radio-absorbent material, strip line, reflection coefficient.

Радиопоглощающие материалы (РПМ) находят широкое применение в авиа- и кораблестроении для снижения радиолокационной заметности; при оборудовании безэховых

помещений для проведения антенных измерений; решении задач электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования; в целях защиты человека от вредных излу-

чений, например, в медицинских учреждениях при использовании аппаратов магнитно-резонансной томографии. Как правило, РПМ представляют полимерную основу, в которую включены проводящие добавки (наполнители) — порошки феррита, сажа, графит и т. п. Множественные сочетания типов и массовых долей наполнителей и полимерных основ определяют, во-первых, различные электрофизические характеристики РПМ — коэффициенты отражения и пропускания в полосе рабочих частот, а во-вторых, эксплуатационные качества — плотность, толщину, прочность, технологичность, термостойкость, устойчивость к воздействию ультрафиолетового (УФ) излучения.

В последние годы наметился прогресс в создании РПМ с наполнителями в виде наноструктур: одно- и многостенных нанотрубок, нановолокон, графена и т. п. Достоинство материалов такого типа состоит в том, что их характеристики при меньшей доле наполнителя такие же как у традиционных РПМ. Например, наполнитель из углеродных нанотрубок, составляющий 0,35 % массовой доли РПМ, дает тот же эффект, что и при 20 % массовой доли сажи [1]. Наноструктурированные РПМ, имеющие малые массу и толщину, могут использоваться как краски и лаки. Актуальной задачей является контроль электрофизических характеристик наноструктурированных РПМ при их разработке, производстве и эксплуатации. При этом следует учитывать два важных аспекта: чрезвычайно широкий диапазон рабочих частот (100 МГц — 40 ГГц) и высокую стоимость этих материалов, что исключает изготовление крупных образцов.

Традиционно образцы РПМ исследуют волноводным и резонаторными методами или в свободном пространстве в частотной и временной областях. При волноводных измерениях коэффициент отражения образца получают путем сравнения режима работы волновода в отсутствие РПМ и при его помещении в концевую нагрузку. Недостатками данного метода являются невозможность определения коэффициента отражения при различных углах падения волны, а также его непригодность для РПМ, имеющих неоднородную поверхность. Кроме того, чтобы обеспечить измерение в диапазоне до 40 ГГц, требуется несколько волноводных датчиков разных размеров. Все это ограничивает применение данного метода при поточном производстве.

Системы для измерений характеристик РПМ в свободном пространстве в частотной области обычно содержат две антенны (излучающую и приемную), подключенные к векторному анализатору цепей. Для определения коэффициента отражения исследуемый материал помещают на некотором расстоянии под углом к антеннам и затем выполняют сканирование по частоте, вычисляя отношение амплитуд падающей и отраженной волн. Следует отметить ограничения данного метода. Прежде всего, необходим набор из нескольких излучающих и приемных антенн, так как невозможно использовать одну антенну в указанном диапазоне частот. Это, в свою очередь, вызывает погрешности при стыковке результатов на границах поддиапазонов. Кроме того, следует обеспечить низкий уровень отражений от окружающих объектов, поэтому измерения проводят в дорогостоящих безэховых

камерах. Поскольку измерять следует в дальней зоне излучения, требуются безэховые камеры значительных размеров. Наконец, ширина и высота исследуемых образцов должны превышать длину волны, т. е. десятки метров на низкой частоте, что неприемлемо.

Альтернативным подходом являются измерения во временной области методом сверхкороткоимпульсного зондирования (СКИЗ). В его основе лежит анализ реакции исследуемого образца на измерительный импульс электромагнитного поля [2]. Главное достоинство метода в том, что за одно измерение можно получить результат, соответствующий реакции объекта в широком диапазоне частот. Например, для зондирующего гауссова импульса с длительностью фронта $\tau_{\text{фр}}$ верхняя граничная частота спектра $f_{\text{в}} \approx (0,3...0,4) / \tau_{\text{фр}}$ [3]. Соответственно, при $\tau_{\text{фр}} \approx 10$ пс будет достигнута $f_{\text{в}} = 40$ ГГц. При измерениях нет необходимости в безэховых камерах, поскольку отражения от окружающих объектов попадут в измерительный канал позднее полезного сигнала (т. е. существует временная селекция сигналов). Также из-за высокой локализации импульса в пространстве не требуются образцы больших размеров. При разработке новых типов РПМ метод СКИЗ может служить для экспресс-диагностики, т. е. изменив параметры смеси, можно оперативно проследить изменение отражающих и поглощающих характеристик. Очевидна актуальность использования данного метода при контроле на поточном производстве или в процессе эксплуатации.

Авторами предложена измерительная система, реализующая данный метод в полосе частот до 40 ГГц, которая включает излучающий модуль, состоящий из сверхширокополосной антенны, возбуждаемой генератором перепада напряжения, и приемный модуль, в состав которого входят измерительный преобразователь и сверхширокополосный стробоскопический осциллограф.

Длительность фронта зондирующего импульса электромагнитного поля определяется длительности фронта импульса напряжения возбуждающего генератора, а также переходной характеристикой антенно-фидерной системы. Чтобы зондирующий импульс имел $\tau_{\text{фр}} \approx 10$ пс (при $f_{\text{в}} = 40$ ГГц), длительность фронта возбуждающего генератора должна составлять единицы пикосекунд. В настоящее время в России и за рубежом ведутся разработки различных типов генераторов перепада напряжения с пикосекундным фронтом фирмами НПП «Трим», Picosecond, Agilent Technologies и др. [4—6]. По совокупности характеристик лучшим выбором является генератор типа TMG 0515 производства НПП «Трим» (С.-Петербург) [4], который

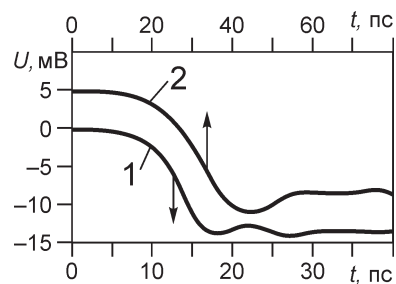


Рис. 1. Осциллограмма выходного импульса генератора перепада напряжения TMG0515 (кривая 1) и начальная часть переходной характеристики измерительного преобразователя ИППЛ-Л (кривая 2)

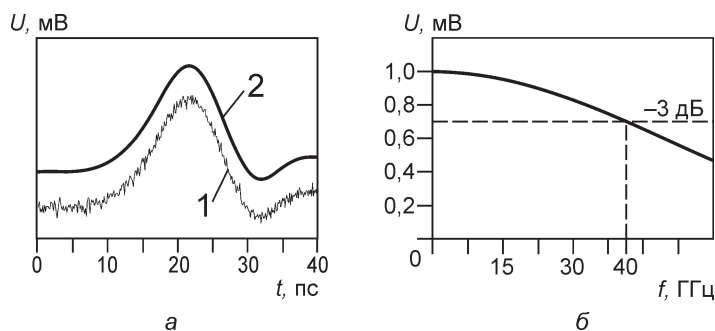


Рис. 2. Сверхкороткий зондирующий импульс (а) и его вещественный амплитудный спектр (б):

1, 2 — исходный и smoothed сигналы, соответственно

воспроизводит на выходе 50 Ом отрицательный импульс перепада напряжения с $\tau_{\text{фр}} \approx 5$ пс и амплитудой 15 В (рис. 1, кривая 1). Другие типы рассмотренных генераторов при сравнимой длительности фронта отличаются низкой выходной амплитудой (до 5 В), что неприемлемо, так как при этом снижается чувствительность измерений.

К сверхширокополосным антеннам излучающего модуля относят биконические, моноконические с противовесом, спиральные, ТЕМ-рупорные, плоские широкополосные вибраторы, патч-антенны и т. п. [7, 8]. При разработке измерительной системы исследовали биконическую антенну и ее модификации, так как спиральные и печатные антенны отличаются вращающейся поляризацией, что нежелательно в данном случае [9, 10]. Биконическая антенна имеет чисто активное сопротивление на любой частоте, а осесимметричное поле излучения E данной антенны в точке наблюдения с координатами (r, θ) находится из известного соотношения (начало импульса запаздывает на время r/c относительно момента времени в точке возбуждения, фидер согласован с антенной):

$$E(t) = 60V(t) / (Zr \sin\theta),$$

где c — скорость света; $V(t)$ — сигнал возбуждающего генератора; Z — входное сопротивление антенны; θ — угол между осью биконуса и радиусом-вектором r .

Таким образом, достоинство биконической антенны состоит в том, что форма излучаемого импульса поля повторяет форму импульса возбуждающего генератора до момента, пока в точку наблюдения не придут отражения от края антенны. Длительность излучаемого сигнала определяется из уравнения косинусов. Биконическая антенна является простейшей из множества аналогичных антенн. Если форма антенны опре-

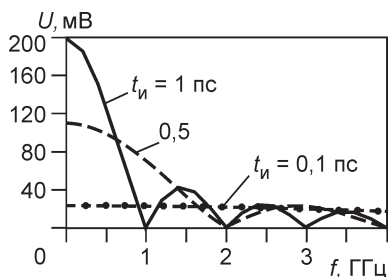


Рис. 3. Вещественные амплитудные спектры трапецевидных импульсов различной длительности, излучаемых вибраторами

деляется только углом при вершине, то она излучает сферическую волну и ее характеристический импеданс активен, т. е. основные параметры не зависят от частоты [8]. К модификациям биконической антенны, удовлетворяющим «принципу углов», относят также ТЕМ-рупор и плоский биконический вибратор (бабочка).

Во ВНИИОФИ разработан измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля ИППЛ-Л с временем нарастания переходной ступенчатой характеристики порядка 8 пс и длительностью временного окна 2 нс (см. рис. 1, кривая 2) [11—13]. Таким образом, время нарастания переходной характеристики данного измерительного преобразователя меньше $\tau_{\text{ф}} = 10$ пс измеряемого зондирующего импульса, что удовлетворяет сформулированным выше требованиям. Метрологическое обеспечение быстродействующего ИППЛ-Л осуществляется с помощью государственного первичного специального эталона единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей ГЭТ 178—2010 [14]. Импульсы на выходе ИППЛ-Л регистрируют широкополосным стробоскопическим осциллографом Tektronix CSA8000 с полосой пропускания 50 ГГц.

При исследованиях отражающих характеристик объект располагают симметрично между антенной излучателя и измерительным преобразователем под заданным углом α относительно оси излучения антенны. Расстояние от образца до апертуры излучателя выбирают из условия границы дальней зоны, а между ИППЛ-Л и образцом — таким, чтобы исключить взаимодействие преобразователя с облучаемым объектом. Вначале регистрируют сверхкороткий электромагнитный импульс (СК ЭМИ), отраженный от металлического листа $E_1(t)$. Затем лист заменяют исследуемым образцом РПМ, повторяют измерения и регистрируют импульс $E_2(t)$, отраженный от РПМ. Вычисляют частотную зависимость коэффициента отражения

$$K(f) = 20 \lg (S_2(f) / S_1(f)), \quad (1)$$

где $S_1(f)$, $S_2(f)$ — вещественные амплитудные спектры соответственно падающего и отраженного импульсов.

Интегрирование ведется в течение длительности импульса по основанию. Аналогично находят коэффициент поглощения: регистрируют импульс $E_1(t)$, воспроизводимый излучателем. Затем между излучателем и ИППЛ-Л помещают образец РПМ и регистрируют рассеянный импульс $E_2(t)$. Коэффициент поглощения также вычисляют по (1). На рис. 2 показан зондирующий импульс поля с $\tau_{\text{фр}} = 10$ пс, выполнен его сглаживание и вычислен спектр. Ширина спектра по уровню -3 дБ составляет 40 ГГц.

Как известно, гауссов импульс имеет равномерный спектр во всей полосе частот, поэтому такой зондирующий импульс можно применить, когда необходимо провести экспресс-диагностику РПМ за одно измерение. Гауссов (или близкий к нему по форме) импульс эффективно излучается с помощью ТЕМ-рупорной антенны.

В ситуациях, когда необходимо детально знать значения коэффициентов отражения и пропускания на частотах до 12—15 ГГц, целесообразно основную энергию зондирующего импульса перенести в область нижних частот. Для этого предлагается использовать комплект плоских биконических вибраторов различной длины, позволяющих излучать импульсы трапецевидной формы, причем их длительность зависит от длины вибратора. На рис. 3 показаны вещественные амплитудные спектры зондирующих трапецевидных импульсов различной длительности, и чем она выше, тем большая доля энергии импульса сосредоточена в области низких частот.

Таким образом, предлагается применить комплект антенн: ТЕМ-рупорную площадью апертуры 1 см² для обеспечения равномерного спектра в полосе до 40 ГГц; биконическую длиной до 10 см для увеличения чувствительности измерений на частотах 1—10 ГГц; плоскую вибраторную длиной до 0,5 м для увеличения чувствительности измерений на частотах 100 МГц — 1 ГГц.

Заключение. Разработана измерительная система, реализующая метод сверхкороткоимпульсного зондирования в диапазоне частот до 40 ГГц. Основным компонентом системы является измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля, позволяющий регистрировать СК ЭМИ длительностью десятки пикосекунд. Разработанную измерительную систему предлагается использовать для исследования отражающих и поглощающих характеристик наноструктурированных радиопоглощающих материалов.

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.624.21.0003 от 11.08.2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62414X0003).

Л и т е р а т у р а

1. **Qin F., Brosseau C.** A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. N. 6. P. 061301-1-24.
2. **Глебович Г. В., Андриянов А. В., Введенский Ю. В. и др.** Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. М.: Радио и связь, 1984.
3. **Ицхоки Я. С., Овчинников Н. И.** Импульсные и цифровые устройства. М.: Сов. радио, 1972.

4. **Автоматизированные** комплексы измерения радиотехнических характеристик антенн // Сверхширокополосные измерительные системы НПП «Трим». [Офиц. сайт]. <http://www.trimcom.ru/seminar/izm.pdf> (Дата обращения 25.06.2014 г.)

5. **Model 4016** Product Specification. Picosecond Pulse labs. [Офиц. сайт]. <http://www.picosecond.com/objects/4016%20SPEC-4040100.pdf?x=1> (Дата обращения 25.06.2014 г.)

6. **N2806A** Calibration Pulse Generator // Agilent Technologies. [Офиц. сайт]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-0311EN.pdf> (Дата обращения 25.06.2014 г.)

7. **Balanis S. A.** Modern Antenna Handbook. N.Y.: Wiley&Sons, 2008.

8. **Рамзей В.** Частотно-независимые антенны. М.: Мир, 1968.

9. **Евтихеев Н. Н., Сахаров К. Ю., Соколов А. А., Алешко А. И., Засовин Э. А., Черепанов А. К.** Биконическая антенна как базовая структура для излучения испытательных и эталонных сверхкоротких электромагнитных импульсов в нестационарных задачах ЭМС // Технологии электромагнитной совместимости. 2006. № 4. С. 3—9.

10. **Панкратов С. Г., Соколов А. А.** Биконическая антенна как источник образцовых импульсных полей // Измерительная техника. 1981. № 6. С. 57—58.

11. **Dobrotvorsky M. I., Sakharov K. Yu., Mikheev O. V., Turkin V. A., Aleshko A. I., Dnischenko V. N.** Measuring Instruments of Powerful UWB EMP Parameters // Proc. 3^d Int. Conf. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS-2006. Sevastopol, 2006. P. 373—375.

12. **Сахаров К. Ю., Туркин В. А., Михеев О. В., Добротворский М. И., Сухов А. В.** Измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля пикосекундной длительности // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 62—64.

13. **Пат. 2468375 РФ.** Устройство для измерения параметров электромагнитного импульса со сверхкороткой длительностью фронта / К. Ю. Сахаров, О. В. Михеев, В. А. Туркин, М. И. Добротворский, А. В. Сухов // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 33.

14. **Тихомиров С. В., Сахаров К. Ю., Туркин В. А., Михеев О. В., Алешко А. И., Сухов А. В.** Эталонный комплекс сверхкоротких электромагнитных импульсов с длительностью фронта 20 пс // Измерительная техника. 2010. № 7. С. 57—59.

Дата принятия 13.01.2015 г.