

УДК 681.5.08: 536.24: 658.011.56

РЕЗОНАНСНЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В ФУНКЦИОНАЛЬНО АДАПТИВНЫХ СВЧ-РЕАКТОРАХ

© 2012 Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин, А.С. Шакиров

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева – КАИ

Поступила в редакцию 09.03.2012

Работа посвящена трансферу технологий мониторинга волоконно-оптических избирательных структур в область мониторинга резонансных датчиков СВЧ-диапазона, построенных по аналогии с волоконно-оптическими и применяемых в функционально адаптивных СВЧ-реакторах обработки термореактивных полимеров, используемых в составе композитных материалов для авиационной промышленности.

Ключевые слова: *термореактивные полимеры, композиты, технологический процесс, функционально адаптивный СВЧ-реактор, мониторинг, резонансные методы, решетки Брэгга в коаксиальном кабеле*

В течение технологического процесса, заключающегося в изменении свойств термореактивных полимеров (отверждение), происходит и изменение его комплексной проводимости на СВЧ-частотах. Таким образом, контроль за изменением комплексной проводимости обрабатываемого материала может быть использован для мониторинга параметров технологического процесса и качества получаемых продуктов. Известные методы для измерения комплексной проводимости ограничены лишь оценками резонансной частоты и фактора качества с использованием датчика на планарном резонаторе, векторного анализатора или пик-детектора с использованием соответствующего математического аппарата. В [1] впервые представлен метод для анализа модуля и фазы комплексной проводимости. Метод основан на принципах рефлектометрии и сравнении амплитудных и фазовых характеристик нагруженного и ненагруженного объемного резонансного датчика, что позволяет получить более детальную информацию о качестве полимера, находящегося в технологическом процессе.

Другой разновидностью резонансного датчика является решетка Брэгга, сформированная в

коаксиальном кабеле [2]. Ее спектральная характеристика представляет собой набор узких пиков отражения n -порядков, распределенных в полосе пропускания коаксиального кабеля, аналогичная известным характеристикам волоконно-оптических длиннопериодных решеток Брэгга. С одной стороны, попадание рабочей частоты магнетрона в узкий пик одного из порядков позволяет организовать ее мониторинг и отслеживать ее возможные изменения в ходе технологического процесса при изменении характеристик нагрузки. С другой стороны, возможен анализ изменений центральной частоты отраженного от полимера рефлектометрического сигнала. Перестройка частоты пиков возможна изменением длины решетки Брэгга при приложении к ней растягивающего усилия с крутизной 3 кГц/мк [2].

Использование резонансных СВЧ-датчиков [1, 2] предполагает для измерения величину сдвига центральной частоты контура Лоренца с полушириной в 10-100 МГц. Нами предложено использование модуляционных методов измерений сдвига, аналогичных методам мониторинга волоконно-оптических избирательных структур, и характеризующихся применением в качестве зондирующего двухчастотного сигнала, полученного из излучения частотой 1-3 ГГц путем амплитудно-фазового преобразования, приводящего к его подавлению и формированию двух равных по амплитуде и симметричных частотных составляющих с альтернативными фазами, разнесенными на промежуточную частоту, равную половине частоты амплитудной модуляции [3].

Двухчастотная рефлектометрия резонансного датчика, нагруженного на композит. В качестве примера изменения комплексной проводимости термореактивного полимера в течение технологического процесса СВЧ-обработки можно

Морозов Геннадий Александрович, доктор технических наук, профессор, директор научно-исследовательского центра прикладной электродинамики. E-mail: micrcool@mail.ru

Морозов Олег Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем

Насыбуллин Айдар Ревкатович, ассистент кафедры телевидения и мультимедийных систем

Самигуллин Рустем Разяпович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и мультимедийных систем. E-mail: nicpre@list.ru

Шакиров Альберт Султанович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем. E-mail: shakirov_albert@mail.ru

привести данные [1]. В табл. 1 приведены АЧХ резонансного датчика, нагруженного на полиуретан, на различных стадиях технологического процесса. Рефлектометрический сигнал имеет вид узкого резонансного пика отражения с полушириной около 100 МГц на различных частотах в диапазоне от 1,5 до 2,5 ГГц, соответствующих различным стадиям обработки.

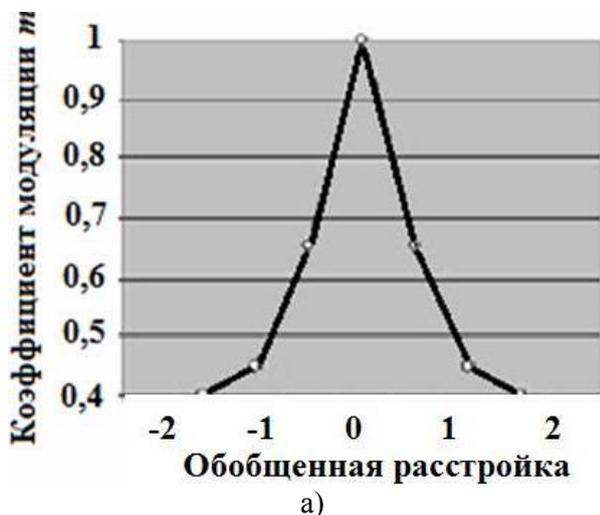
Таблица 1. АЧХ резонансного датчика

Стадия	Центральная частота, ГГц	Уровень сигнала, дВ
начальная	1,7	- 23
1-ая промежуточная	1,8	- 20
2-ая промежуточная	1,83	- 18
3-ая промежуточная	1,93	- 17
конечная	2,2	- 11

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos[(\varphi_2 - \varphi_1) + \Omega t]} \cos \left\{ \omega t + \varphi_0 + \arctg \left[\frac{\sin[(\varphi_2 - \varphi_1) + \Omega t]}{\frac{A_1}{A_2} + \cos[(\varphi_2 - \varphi_1) + \Omega t]} \right] \right\}$$

Анализ данного выражения показывает, что в момент достижения средней частоты зондирующего сигнала ω резонансной частоты контура линии коэффициент модуляции огибающей выходного рефлектометрического сигнала максимален и равен 1 (рис. 1,а), а сама огибающая рефлектометрического сигнала по фазе совпадает с огибающей зондирующего сигнала на входе (рис. 1,б).

Нами в [3] показано, что в отличии от существующих систем при использовании метода двухчастотного зондирования максимальная чувствительность достигается при настройке несущей на центр контура резонансного датчика, при этом значение расстройки между двумя составляющими должно быть равно его полуширине.



Известный процесс измерения [1] заключается в сканировании контура отражения более чем в 100 точках и вычисления его центральной частоты по алгоритму «подгонки» (гауссовскому, линейному и т.д.). В соответствии с нашим методом обобщенную АЧХ исследуемого резонансного контура, который зондируется двухчастотным сигналом можно определить с помощью следующего выражения $Y(\varepsilon) = 1/\sqrt{1 + \varepsilon_{0L}^2}$. Будем считать, что амплитуды составляющих зондирующего сигнала равны, $A_1=A_2=1$, частоты составляющих симметричны относительно его средней обобщенной расстройки ε_0 : $\varepsilon_{01} = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon/2$ и $\varepsilon_{02} = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon/2$, где $\Delta\varepsilon$ – расстройка между частотами составляющих зондирующего сигнала, ω – его средняя подавленная частота, а фазы φ_1 и φ_2 альтернативны. Общее выражение для огибающей рефлектометрического двухчастотного сигнала после зондирования контура будет иметь вид:

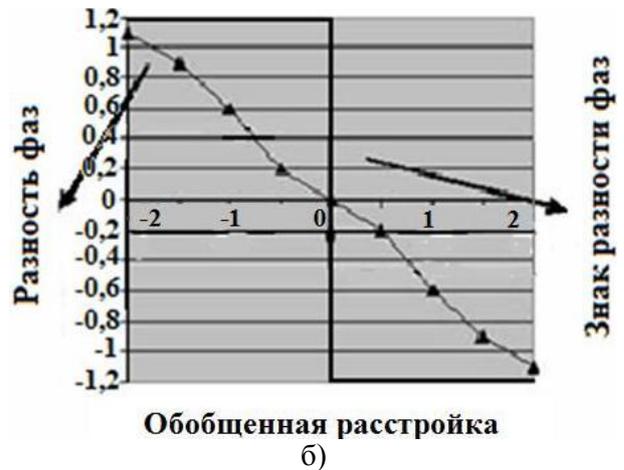


Рис. 1. Вид измерительных характеристик для обобщенной расстройки: а) по коэффициенту модуляции и б) разности фаз огибающей

Процесс измерений заключается в контроле как минимум двух точек при попадании обеих составляющих в спектральную область контура отражения. По первой точке (по характеристикам рис. 1) оценивается предполагаемое положение центральной частоты контура, производится перестройка исходной частоты генерации в его центр, определяется точность настройки по результатам измерений во второй точке, фиксируются данные измерений. На следующем шаге, определяемом дискретностью измерений – определяется направление частотного смещения центральной частоты контура и повторяется указанная выше процедура.

Решетки Брэгга на коаксиальном кабеле. Оптическое волокно и коаксиальный кабель – два типа цилиндрических направляющих систем электросвязи, объединяемых по условиям распространения электромагнитных волн общей теорией и физикой и отличающихся применением в различных частотных диапазонах. Последнее десятилетие отмечается трансфертом технологий оптического диапазона в СВЧ-диапазон, характерной чертой которого является изготовление в СВЧ-диапазоне устройств подобных по структуре устройствам оптического диапазона, например, интерферометра Маха-Цендера, фотонных кристаллов, и, наконец, решеток Брэгга. На рис. 2,а представлена модель решетки Брэгга на коаксиальном кабеле (РБКК), предложенная в [2]. Помимо данной структуры нами была изготовлена и исследована РБКК с диаметрально расположенными отверстиями (рис. 2,б) показавшая лучшие селективные свойства.

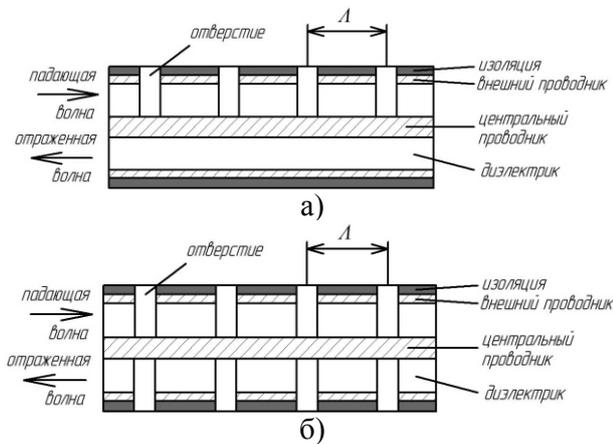


Рис. 2. Модели коаксиальных решеток Брэгга: а) с односторонним и б) с двусторонним расположением отверстий

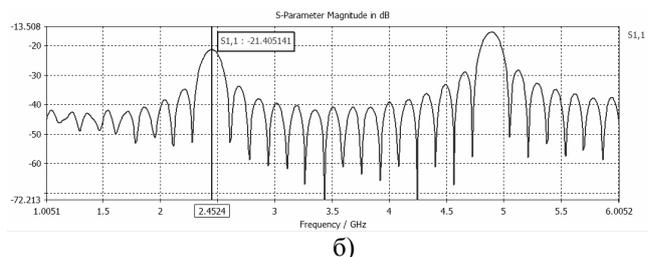
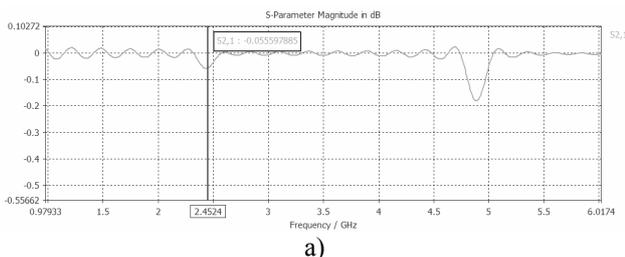
Использовался коаксиальный кабель марки RG-213 с волновым сопротивлением 50 Ом и погонной емкостью 98 пФ/м. Диаметр отверстий в диэлектрике кабеля составлял 4 мм, шаг отверстий – 42 мм. Кабель обладает следующими конструктивными параметрами: диаметр центральной жилы – 2,25 мм, диаметр диэлектрика – 7,24 мм, диаметр оплетки – 8,1 мм, диаметр оболочки – 10,3 мм, длина отрезка кабеля – 900 мм. Для коммутации с измерительным оборудованием кабель был оконцован разъемами N-типа.

Подобно моделям ВРБ, в которых рассматривается взаимодействие распространяющихся и отраженных мод, в РБКК существуют дискретные резонансы, определяемые условием Брэгга

$$\beta^+ - \beta^- = 2\beta = \frac{2m\pi}{\Lambda} \text{ или } f_{рез}^m = \frac{m}{2\Lambda\sqrt{LC}},$$

где β^+ и β^- – постоянные распространения падающей и отраженной бегущих волн, m – порядок дифракции резонансной частоты, Λ – период решетки (расстояние между отверстиями), L и C – погонная индуктивность и емкость коаксиального кабеля.

Согласно данному выражению выбранный период РБКК, равный 42 мм, определяет резонансную частоту 1-го порядка – 2450 МГц, соответствующую разрешенной частоте воздействия для промышленной СВЧ обработки. Предварительная оценка резонансных свойств РБКК была получена с помощью моделирования идеализированного отрезка коаксиальной линии в специализированном программном пакете для исследования электродинамических процессов CST Microwave Studio. Моделирование проводилось для двух значений периода решетки – 42 мм и 84 мм, определяющих резонансную частоту 2450 МГц 1-го и 2-го порядка, соответственно. Количество отверстий в обоих случаях составляло 21. Полученные зависимости коэффициента отражения S_{11} и коэффициента передачи S_{21} представлены на рис. 3. Вид частотных характеристик коэффициента отражения указывает на то, что избирательность выше у той РБКК, для которой резонансная частота выше 2-го порядка. Полоса частот по уровню -3дБ в области резонансной частоты 2450 МГц для решетки с периодом 42 мм составляет 152 МГц, для решетки с периодом 84 мм – 86 МГц. Дальнейшее увеличение добротности системы требует пропорционального увеличения длины кабеля, сопровождающееся уменьшением уровня коэффициента отражения на центральной частоте контура. Оптимальная конструкция РБКК для мониторинга рабочей частоты магнетрона определяется выбором компромисса между полосой пропускания контура и значением коэффициента отражения на резонансной частоте.



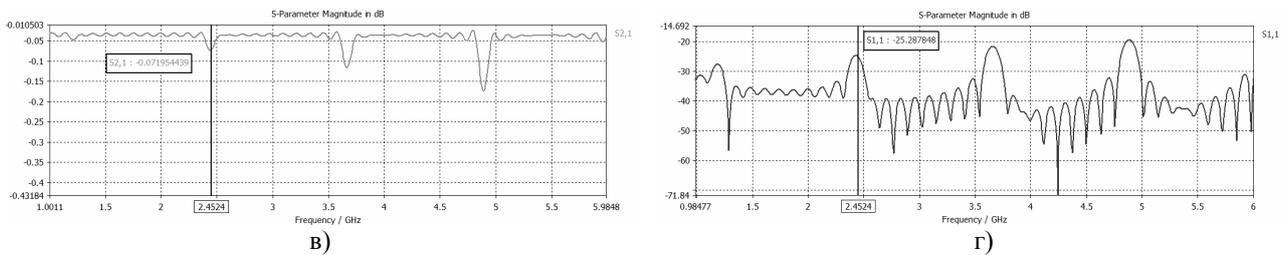


Рис. 3. Коэффициент передачи (а) и коэффициент отражения (б) для периода решетки – 42 мм, коэффициент передачи (в) и коэффициент отражения (г) для периода решетки – 84 мм

Экспериментальное исследование резонансных свойств РБКК проводилось на векторном анализаторе спектра с функцией двухпортового анализа цепей Rohde & Schwarz FSH8 (рис. 4), обладающий диапазоном измеряемых частот от 100 кГц до 8 ГГц.

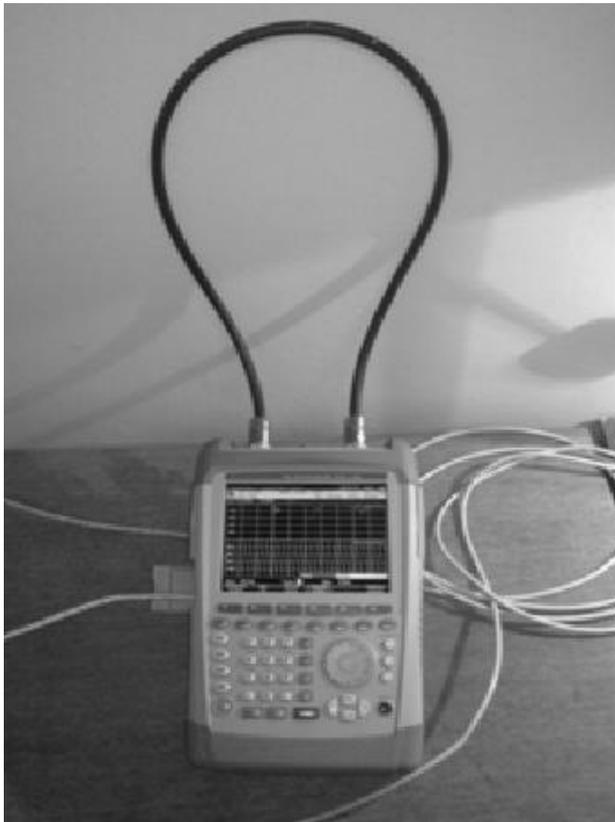


Рис. 4. Стенд для измерений

Лучшую избирательность показала РБКК с отверстиями, расположенными симметрично относительно центрального проводника (рис. 2,б), для которой мы приводим зависимости коэффициента отражения и передачи, показанные на рис. 5. В этом случае полоса пропускания контура отражения по уровню -3dB для первого резонанса составляет 122 МГц. Последующие исследования в направлении улучшения резонансных характеристик и уменьшения влияния боковых лепестков связаны с организацией специальных видов РБКК: с апериодическим расположением отверстий вдоль продольной оси кабеля, с расположением отверстий в поперечном сечении под различными углами.

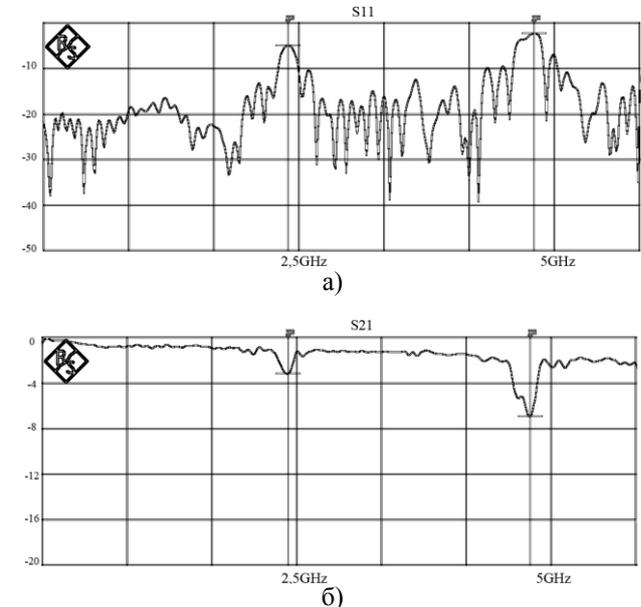


Рис. 5. Коэффициент отражения (а) и коэффициент передачи (б) для РБКК с двусторонним расположением отверстий

Один из вариантов применения РБКК для контроля частоты магнетрона в процессе СВЧ обработки предложен на рис. 6. Затягивание частоты магнетрона I вследствие изменения диэлектрических свойств обрабатываемого объекта, расположенного в рабочей камере 3 , отслеживается по сигналу падающей и отраженной волны на входе РБКК в детекторной секции 9 . Блок управления 10 по сигналу детекторной секции формирует управляющий сигнал для источника питания магнетрона 11 с целью обеспечения оптимального режима обработки.

Выводы: представленные методы и средства для резонансного контроля параметров технологических процессов и свойств обрабатываемых материалов были использованы нами для построения функционально адаптивных реакторов СВЧ-обработки терморезистивных и термопластичных полимеров.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного контракта №16.513.11.3114 и Государственного заказа «Фундаментальные исследования и прикладные научные исследования в области образования».

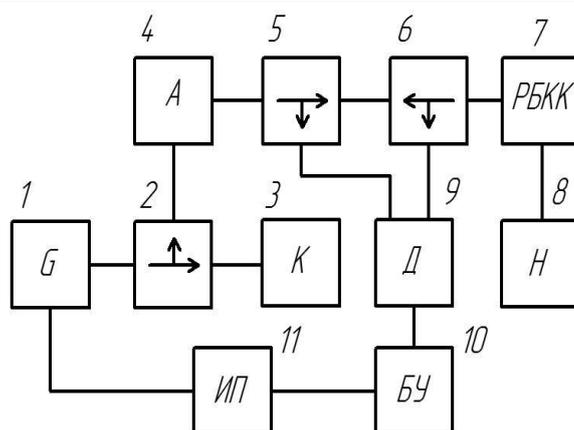


Рис. 6. Адаптивная схема СВЧ обработки:

1 – магнетрон, 2, 5, 6 – направленные ответвители, 3 – рабочая камера, 4 – аттенюатор, 7 – коаксиальная решетка Брэгга, 8 – согласованная нагрузка, 9 – детекторная секция, 10 – блок управления, 11 – источник питания магнетрона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. US Patent appl. publ. № US 2011/0043223. Non invasive method for monitoring the curing process of a thermoset plastic material through the use of microwaves / A.J.C. Marin et al. Published 24.02.2011. 21 p.
2. Tao, Wei. Coaxial cable Bragg grating / Tao Wei, Songping Wu, Jie Huang et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V.99, 113517.
3. Пат. 92180 Российская Федерация МПК7 G01/K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, В.В. Куревин и др.; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7. 2 с.

RESONANCE METHODS OF MONITORING THE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF POLYMERS CURING IN THE FUNCTIONALLY ADAPTIVE MICROWAVE REACTORS

© 2012 G.A. Morozov, O.G. Morozov, A.R. Nasybullin, R.R. Samigullin, A.S. Shakirov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

Work is devoted to transfer of technologies of monitoring the fiber-optical selective structures in area of monitoring the resonance sensors in microwave range constructed by analogy with fiber-optical and applied in functionally adaptive microwave reactors of processing the thermoset polymers, used as a part of composite materials for the aviation industry.

Key words: *thermoset polymers, composites, technological process, functionally adaptive microwave reactor, monitoring, resonance methods, Bragg's lattices in a coaxial cable*

Gennadiy Morozov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Scientific Research Center of Applied Electrodynamics. E-mail: microoil@mail.ru

Oleg Morozov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Television and Multimedia Systems Department
Aidar Nasybullin, Assistant at the Television and Multimedia Systems Department

Rustem Samigullin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Television and Multimedia Systems Department. E-mail: nicpre@list.ru

Albert Shakirov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Radioelectronic and Telecommunication Systems Department