

## ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

С. В. Адашкевич<sup>1</sup>, В. Ф. Стельмач<sup>1</sup>, М. И. Маркевич<sup>2</sup>, А. М. Чапланов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, stelmach@bsu.by

<sup>2</sup>ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларусь»

Использование композиционных, в том числе углеродсодержащих, материалов возможно в тех отраслях промышленности, где при эксплуатации изделий окупаются затраты на их производство. Первой применять такие материалы стала авиационно-космическая промышленность. Решение задачи создания материалов с оптимальными по качеству и стоимости параметрами, требует развития специфических методов их получения и диагностики. При этом целесообразным является в процессе их получения обеспечить не только входной контроль, но и модификацию свойств компонентов в составе композиционных материалов.

Создание и эксплуатация такого материала в реальных условиях сопровождается закономерным образованием оборванных связей в связующем, наполнителе и на границе их раздела. Оборванные связи при этом содержат неспаренные электроны, являющиеся источником магнитных центров. Методы магнитного резонанса являются прямыми методами диагностики количества и типа указанных центров [1]. Следует отметить, что нерешенной остается задача обеспечения возможности экспресс-контроля физических механизмов поглощения  $E_1$ - и  $H_1$ -компонент радиочастотного излучения, являющаяся принципиальной для контроля технологии производства композиционных материалов с контролируемым уровнем поглощения излучения СВЧ [2].

На рис. 1 показана структурная схема устройства, решающая задачу регистрации не только определения спинового состояния материала, но и выявления физических механизмов нерезонансного поглощения электрической  $E_1$  и магнитной  $H_1$  компонент электромагнитного излучения. Спектрометр содержит блок 1 источника и приемника излучения СВЧ, блок стабилизации и развертки постоянного магнитного поля 2, модулятор магнитного поля 3, прямоугольный измерительный резонатор 4 с внутренним элементом модуляции в виде двух стержней 5 с утолщениями в их центральной части 6, закрепленными по обе стороны от центра резонатора между его торцевыми стенками 7 и 8, переключатель частоты источника излучения 9, контроллер режимов 10 и калибровочный образец 11. При этом переключатель частоты источника излучения 9 связан со входом управления 12 блока 1, управляющие выходы 13-15 контроллера режимов 10, связаны со входами управления 16-18 переключателя частоты источника излучения 9, блока стабилизации и развертки магнитного поля 2

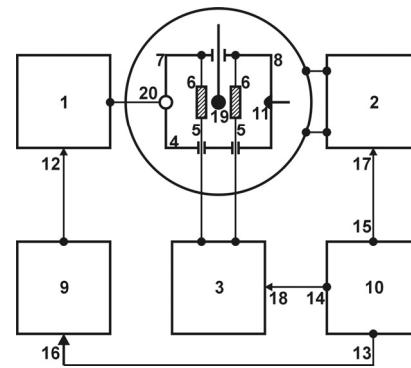


Рис. 1. Структурная схема спектрометра магнитного резонанса

и модулятора магнитного поля 3 соответственно, а калибровочный образец 11 расположен на торцевой стенке 8 измерительного резонатора 4.

На рис. 2 и рис. 3 схематически показано распределение  $H_1$ - и  $E_1$ -компонент излучения СВЧ в резонаторе для двух режимов измерений работы источника и приемника излучения СВЧ, задаваемых переключателем частоты источника излучения при подаче управляющего сигнала контроллера режимов.

Спектрометр работает следующим образом. В режиме генерации частоты  $F_2$  в измерительном резонаторе в месте расположения калибровочного и исследуемого 19 образцов формируется компонента  $H_1$  поля СВЧ, позволяющая при резонансных значениях постоянного магнитного поля регистрировать спектры магнитного резонанса калибровочного и измеряемого образцов (рис. 2). Значение частоты  $F_2$  выбирается равным резонансной частоте измерительного резонатора, соответствующей типу волны  $H_{102}$  (рис. 2) [3, 4]. При отсутствии в измеряемом образце нерезонансного поглощения как электрическими, так и магнитными диполями, амплитуда сигнала магнитного резонанса калибровочного образца не изменится по сравнению с его сигналом, измеренным в отсутствии измеряемого образца.

После поступления из контроллера режимов по линии связи на вход управления переключателя частоты источника излучения команды включения блока режима генерации частоты  $F_1$  в резонатор по линии связи 20 поступает излучение СВЧ, возбуждающее в резонаторе электромагнитную волну, близкую к типу колебаний  $H_{101}$ , показанную на рис. 3 [1, 5]. Значение частоты  $F_1$  устанавливается в соответствии с указанным на рис. 3 условием. Из рис. 3 видно, что показанная пунктирной линией СВЧ-компоненты  $H_1$  концентрируется вдоль торцевых стенок измерительного резонатора, а электрическая СВЧ-компоненты  $E_1$ , показанная в виде стрелок сплошными линиями, концентрируется в центральной части измерительного резонатора и в зазорах между утолщениями модуляционных стержней и боковыми стенками резонатора.

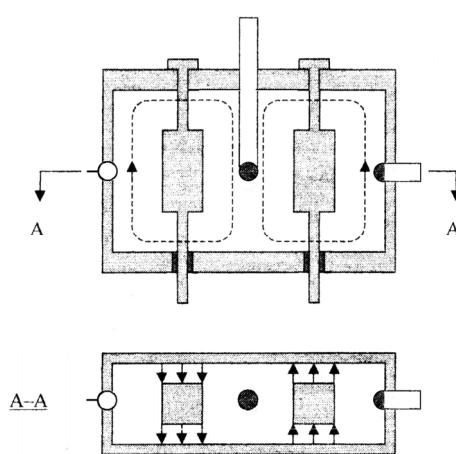


Рис. 2. Распределение  $H_1$ - и  $E_1$ -компонент излучения СВЧ в резонаторе для волны типа  $H_{102}$

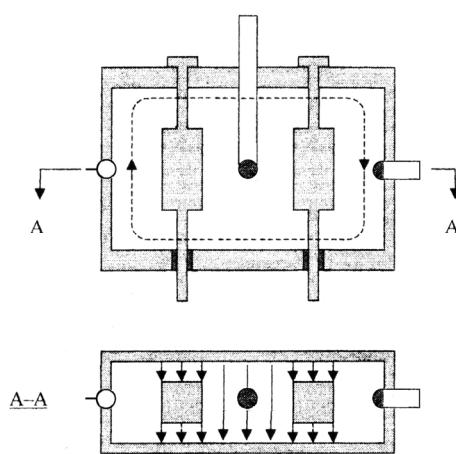


Рис. 3. Распределение  $H_1$ - и  $E_1$ -компонент излучения СВЧ в измерительном резонаторе для волны типа  $H_{101}$

Значения частот  $F_1$  и  $F_2$  определяются размерами боковых стенок резонатора и элементов сосредоточенных емкостей в пределах радиочастотного диапазона 9...10 ГГц. Структура распределения  $H_1$ -компоненты СВЧ поля у места расположения узла связи резонатора с блоком для обеих частей практически одинакова, что упрощает процесс настройки элемента связи.

Для решения поставленной задачи существенно, что и в данном режиме генерации частоты  $F_2$ , как и в режиме генерации частоты  $F_1$  в месте расположения калибровочного образца (рис. 2 и рис. 3) у торцевой стенки распределение магнитной СВЧ-компоненты  $H_1$  благоприятно для регистрации от калибровочного образца. Из рис. 2 и рис. 3 видно, что сигнал магнитного резонанса от измеряемого образца, не регистрируемый в режиме генерации частоты  $F_1$ , регистрируется в режиме генерации частоты  $F_2$  в оптимальных условиях равномерного распределения СВЧ-компоненты  $H_1$  и отсутствии СВЧ-компоненты  $E_1$  в месте расположения измеряемого образца.

Следует отметить, что при переходе с помощью контроллера режимов переключателя частоты в режим генерации частоты излучения СВЧ, соответствующей возбуждению в резонаторе колебаний типа  $H_{101}$ , как и в первом режиме, спектрометр магнитного резонанса зафиксирует сигнал от калибровочного образца, поскольку в месте его расположения условия для регистрации сигнала магнитного резонанса выполняются, однако регистрация сигнала от измеряемого образца невозможна, поскольку в месте расположения образца необходимая  $H_1$ -компонента излучения СВЧ отсутствует (рис. 3). Наличие же в данном месте резонатора  $E_1$ -компоненты излучения СВЧ приводит к нерезонансному ее поглощению электрическими диполями, если они присутствуют в измеряемом образце. При этом существенно, что сигнал магнитного резонанса калибровочного образца уменьшится в соответствии с уменьшением добротности резонатора.

Поскольку для режима генерации частоты  $F_1$  в месте расположения измеряемого образца отсутствует  $H_1$ -компоненты поля СВЧ, то относительное уменьшение сигнала магнитного резонанса калибровочного образца  $A_k/A_{k0}$  является мерой нерезонансного поглощения измеряемым образцом только  $E_1$ -компоненты ( $A_k$  – величина сигнала калибровочного образца при наличии в измерительном резонаторе измеряемого образца,  $A_{k0}$  – величина сигнала калибровочного образца при отсутствии в измерительном резонаторе измеряемого образца).

В режиме генерации частоты  $F_2$  на измеряемый образец воздействует только  $H_1$ -компоненты поля СВЧ, поэтому относительное изменение интенсивности  $A_k/A_{k0}$  сигнала калибровочного образца является мерой нерезонансного поглощения измеряемым образцом  $H_1$ -компоненты поля СВЧ. Сигнал магнитного резонанса измеряемого образца, полученный в режиме генерации частоты  $F_2$ , является мерой количества магнитных диполей в исследуемом материале. Это дает дополнительную информацию о физическом механизме поглощения СВЧ излучения при воздействии поляризующего магнитного поля и существенно для оптимизации технологии производства поглощающих материалов и их стабильности при эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М.: Мир. 1970. 558 с.
2. Богуш В.А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В.А. Богуш, Т.В. Борботко, А.В. Гусинский и др. // Минск. 2003. 406 с.
3. Рутковский И.З. Исследование динамики спиновых систем методом ЭПР: Учеб. пособие / И.З. Рутковский, В.Ф. Стельмах, Г.Г. Федорук // Минск: УП «Технопринт». 2000. 122 с.

4. Авт. свидет. СССР № 750353, G 01N27/78, опубл. 27.07.1980, бюллетень № 27.

5. Акунец В.В. Анализатор электронного параметрического резонанса: Учебно-справочное пособие / В.В. Акунец, В.Ф. Стельмах, Л.В. Цвирко // Мин.: УП «Технопринт». 2002. 102 с.