

1. Handbook of Machine [Text]/ edited by Hornberg, Alexander. - VisionWiley-VCH.-2010. - 798 p.
2. Терлецкий А.В. Формирование уравнений математических моделей запоминающих ЭЛТ./Терлецкий А.В.//Автоматизация проектирования в электронике. - 1984. - выпуск 30. - с. 124-131.
3. Никитин В. В. Телевидение в системах физической защиты [Текст]: учеб.-метод. пособие/ Никитин В. В, Цицулин А. К. - СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. – 132 с.
4. Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical System [Text]/ Boreman Glenn. D. - SPIE PRESS.-2001. – 423 p.

УДК 537.634.2

## ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Степаненко Д.А.<sup>1</sup>, Богданчук К.А.<sup>1</sup>, Минченя В.Т.<sup>1</sup>, Луговский С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ГНУ «Институт порошковой металлургии», Минск, Республика Беларусь

Измерение магнитоэлектрических свойств материалов является актуальной прикладной проблемой в связи с широким использованием эффектов прямой и обратной магнитоэлектрики в технике и научных исследованиях. В частности, эффект прямой магнитоэлектрики применяется в прецизионных приводах для создания микро- и наноперемещений, а эффект обратной магнитоэлектрики – в датчиках различных физических величин, например, механических сил и напряжений. В обоих случаях при проектировании и расчете характеристик привода или датчика требуется информация о магнитоэлектрических свойствах используемых в них материалов. Основной сложностью при измерении магнитоэлектрических свойств материалов является необходимость регистрации очень малых деформаций (в случае эффекта прямой магнитоэлектрики) или изменений намагниченности (в случае эффекта обратной магнитоэлектрики). Наибольшие технические сложности возникают при необходимости исследования характеристик материалов со слабо выраженными магнитоэлектрическими свойствами. Авторами ранее были предложены способ применения эффекта обратной магнитоэлектрики для измерения пространственного распределения параметров колебаний в ультразвуковых волноводных системах, изготавливаемых из нержавеющей стали со слабыми магнитоэлектрическими свойствами, [1] и способ измерения магнитоэлектрических свойств материалов, основанный на возбуждении в исследуемом образце стоячей ультразвуковой волны и регистрации возникающего при колебаниях образца магнитного поля [2]. Для подтверждения достоверности результатов, полученных с помощью вышеупомянутых методов измерений, могут быть использованы различные прямые методы измерения магнитоэлектрических деформаций, в частности, метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), особенности применения которого рассматриваются в данной работе.

Преимущество использования АСМ для измерения малых деформаций состоит в высокой разрешающей способности метода: у современных атомно-силовых микроскопов она достигает 0,1 нм. В частности, в работе [3] описана возможность применения АСМ для измерения магнитоэлектрических свойств технической чистой меди, относящейся к классу парамагнитных материалов, для которых не характерно наличие магнитоэлектрических эффектов.

Исследования проводились с использованием атомно-силового микроскопа NT-206 ОДО «Микротестмашины» (Республика Беларусь) на образцах из никеля с чистотой 99,7 % (химический анализ выполнен в Центре исследования и испытания материалов (ЦИИМ) ГНУ «Институт порошковой металлургии»). Никель был выбран в качестве тестового материала для проведения исследований, так как обладает сильно выраженными магнитоэлектрическими свойствами. Из никелевой проволоки диаметром 2,15 мм вырезали образец длиной около 10 мм. Для обеспечения плоскопараллельности торцовых поверхностей образца его фиксировали с помощью воска в отверстии, выполненном в стальной пластине, после чего пластина подвергалась двустороннему шлифованию на плоскошлифовальном станке с использованием смазочно-охлаждающей жидкости. После шлифования пластина подвергалась двусторонней обработке с помощью шлифовальных шкур с зернистостью до Р2000 и полировке пастой ГОИ на войлочном полировальнике. После полировки образец извлекали из отверстия в пластине путем нагрева и очищали от воска бензином. Образец фиксировали на плоскопараллельной кремниевой подложке размером около 20×30 мм с помощью шеллака, после чего на этой же подложке фиксировали с помощью пластилина катушку для создания магнитного поля. В центре катушки было выполнено отверстие диаметром около 3 мм, в котором располагался исследуемый образец. В

качестве источника питания катушки использовали две щелочные батарейки напряжением 1,5 В каждая, что позволило обеспечить силу тока через катушку около 0,85 А (активное сопротивление катушки составляло примерно 2,47 Ом; также необходимо учитывать контактное сопротивление, сопротивление соединительных проводов и внутреннее сопротивление источника). Значение индукции магнитного поля, создаваемого катушкой вблизи торцевой поверхности образца, составило около 34 мТ, что соответствует напряженности 27,1 кА/м (измерения проводились с помощью миллитесламетра ТП2-2У (ФГУП «ВНИИФТРИ», Россия)). Подложку с катушкой и образцом фиксировали двусторонним скотчем на сапфировой подложке и устанавливали на предметном столике атомно-силового микроскопа. Для исключения погрешностей, связанных с движением соединительных проводов, используемых для подключения катушки к источнику питания, провода фиксировали скотчем к корпусу микроскопа и столу. Сканирование торцевой поверхности образца производили на свободном от дефектов участке размером  $7,2 \times 7,2$  мкм с разрешением  $256 \times 256$  точек. Скорость сканирования составляла 250 точек/с. На рисунке 1 приведен пример профилограммы поверхности образца, записанной при однократном включении и выключении магнитного поля.

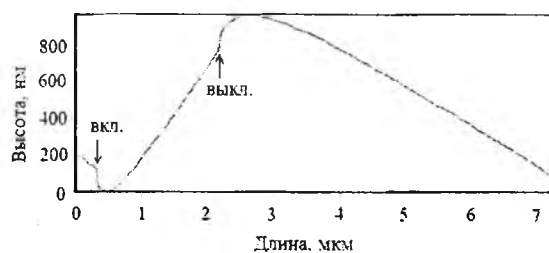


Рисунок 1 – Профилограмма поверхности образца при включении-выключении магнитного поля

На начальном участке профилограммы (на длине от нуля до примерно 300 нм – момент включения магнитного поля, обозначенный стрелкой с подписью «вкл.») наблюдается медленное снижение высоты рельефа. В случае отсутствия магнитного поля высота рельефа медленно снижается на протяжении всей длины профилограммы, что можно объяснить наклоном поверхности образца относительно плоскости предметного столика микроскопа. На участке примерно от 300 до 330 нм происходит быстрое (по сравнению с первым участком) снижение высоты рельефа, связанное с магнитострикционной деформацией (никель обладает отрицательной продольной магнитострикцией, то есть испытывает деформацию сжатия в направлении

приложения магнитного поля независимо от его знака). Далее на участке примерно от 330 до 470 нм происходит снижение высоты рельефа с постепенно уменьшающейся скоростью, не превышающей скорости снижения высоты рельефа на начальном участке. В точке 470 нм медленное снижение высоты рельефа сменяется ее медленным возрастанием с постепенно увеличивающейся скоростью. Такое поведение объясняется тепловым расширением материала образца в результате теплового действия протекающего по катушке тока. С помощью инфракрасного пирометра Raytek MiniTemp МТ4 (США) был зарегистрирован нагрев образца примерно на 10 °С за 2 мин. На участке примерно от 2170 нм (момент выключения магнитного поля, обозначенный стрелкой с подписью «выкл.») до 2200 нм происходит быстрое (по сравнению с участком теплового расширения) увеличение высоты рельефа, связанное с восстановлением магнитострикционной деформации. Далее на участке примерно от 2200 до 2600 нм наблюдается медленный рост высоты рельефа с постепенно уменьшающейся скоростью, который можно объяснить инерционностью процесса теплопередачи от катушки к образцу (тепло продолжает поступать к образцу некоторое время после прекращения теплового действия тока). На конечном участке профилограммы (от 2600 до 7200 нм) происходит медленное снижение высоты рельефа с постепенно возрастающей скоростью, что объясняется восстановлением тепловой деформации образца при охлаждении.

В дальнейших исследованиях необходимо минимизировать влияние тепловых деформаций на процесс измерений, для чего может быть использована тепловая изоляция катушки от подложки с образцом (кремний обладает высокой теплопроводностью, что способствует передаче тепла от катушки к образцу) и/или питание катушки импульсным напряжением [3]. Также необходимо исследовать влияние неоднородности магнитного поля на процесс измерений: в одной из серий измерений наблюдались положительные деформации образца, наиболее вероятной причиной возникновения которых является наличие радиальных компонент напряженности магнитного поля, возрастающих по мере удаления от оси образца и способных вызывать положительные деформации в осевом направлении (положительная поперечная магнитострикция).

Описанная методика может быть использована как для измерения магнитострикционных свойств материалов, так и для измерения тепловых коэффициентов линейного расширения.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность заместителю директора ГНУ «Институт порошковой металлургии» В.В. Савичу за предоставленную возможность использования науч-

ного оборудования ЦИИМ ГНУ «Институт порошковой металлургии».

1. Степаненко, Д.А. Измерение пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах с помощью датчиков на основе эффекта Виллари / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 6. – С. 72-78.

2. Stepanenko, D. Determination of magnetomechanical parameters of materials using standing-wave ultrasonic method / D. Stepanenko [et al.] // Proc. of the 18th International conference "Mechanika 2013". – Kaunas, 2013. – P. 53-57.

3. Wittborn, J. Nanoscale studies of functional materials using scanning probe microscopy: PhD Thesis / J. Wittborn. – Stockholm, 2000. – 81 p.

УДК 625. 7. 08

## УСТРОЙСТВО УСИЛЕНИЯ ВЧ-СИГНАЛОВ

Сычик В.А., Волков Н.Н., Уласюк Н.Н., Шумило В.С.

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Передача ВЧ (высокочастотных) сигналов по усилительным трактам связана с потерями мощности сигналов на паразитных составляющих емкостей, индуктивностей и появлением нелинейных искажений электрических колебаний. В известных усилителях ВЧ-сигналов [1, 2] недостаточно эффективно подавляются нелинейные искажения сигналов, на уровень которых также влияет режим работы усилительных элементов. Нами создано устройство усиления ВЧ-сигналов, в котором коэффициент нелинейных искажений колебаний не превышает 5%. Электрическая схема устройства приведена на рисунке 1.

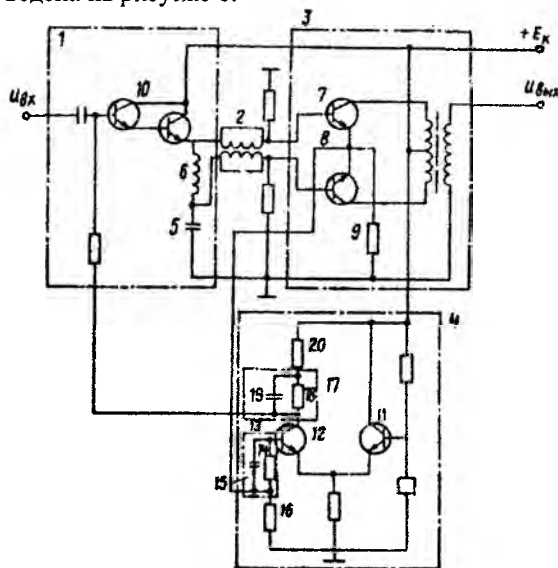


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема устройства усиления ВЧ-сигналов

Устройство усиления ВЧ-сигналов структурно содержит входной каскад 1, широкополосный трансформатор 2 (типа длинной линии), выходной двухтактный каскад 3, блок 4 стабилизации, конденсатор 5, высокочастотный дроссель 6, транзисторы 7 и 8, включенные по схеме с об-

щим эмиттерером, элемент 9 цепи отрицательной обратной связи, составной транзистор 10, транзисторы 11 и 12, первую параллельную RC-цепочку 13, выполненную на резисторе 14 и конденсаторе 15, первый дополнительный резистор 16, вторую параллельную RC-цепочку 17, выполненную на резисторе 18 и конденсаторе 19, и второй дополнительный резистор 20.

Электрический сигнал ВЧ-диапазона поступает на вход входного каскада, усиливается им и с его несимметричного выхода поступает на симметричный вход оконченного выходного двухтактного каскада, где также усиливается и поступает на выход в нагрузку через выходной трансформатор.

Сигнал, снимаемый с элемента 9, поступает на вход блока стабилизации, выполненного на транзисторах 11 и 12. Усиленный блоком стабилизации управляющий сигнал отрицательной обратной связи по постоянному и переменному току поступает на базу составного транзистора 10.

После усиления входным каскадом управляющий сигнал поступает через широкополосный трансформатор и высокочастотный дроссель (для управляющего сигнала по постоянному току) на базы транзисторов 7 и 8 выходного двухтактного каскада.

Поскольку сопротивление высокочастотного дросселя по постоянному току мало, то управляющие сигналы по постоянному току, поступающие на базы транзисторов 7 и 8, практически равны и обеспечивают одинаковую высокую стабилизацию режима работы этих транзисторов, исключая повышение нелинейных искажений при изменении температуры транзисторов и режима их работы.

Любые повышения нелинейных искажений на выходе выходного двухтактного каскада передаются в виде усиленного управляющего сигнала отрицательной обратной связи по переменному току на вход входного каскада, под-