

УДК 621.317.18

В.А. Светличный, В.В. Тулупов

Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НЕФЕРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК И ПОКРЫТИЙ**

*Рассмотрены вопросы, связанные с неразрушающим вихретоковым контролем ферромагнитных пленок и покрытий. Указана зависимость интенсивности и распределения вихревых токов в покрытии от его геометрических, электромагнитных и прочих параметров, а также от взаиморасположения покрытия и вихретокового измерительного преобразователя. Предложена конструкция перспективного преобразователя.*

**Ключевые слова:** бесконтактность измерения, объект контроля, измеритель преобразователь, вихретоковый измерительный преобразователь, толщина объекта контроля, электропроводность объекта контроля, сверхвысокая частота, резонансный метод, резонатор на волне, мощность.

**Введение**

**Постановка проблемы.** Тонкопленочные проводящие структуры на основе различных специальных проводящих пленок и покрытий находят все более широкое применение в электронной промышленности. Такие пленки и покрытия широко применяются при производстве интегральных микросхем; в авиационной и космической технике; в производстве оптических приборов, в микроволновой технике. В последнее время получили широкое распространение специальные виды покрытий и пленок: проводящая бумага, ткань, различные рыхлые, пористые слои, сеточные структуры, металлические покрытия на ткани, бумаге.

Наиболее существенное влияние на качество производимых проводящих пленок и покрытий оказывает надежный контроль таких параметров, как электропроводность, толщина, наличие пор, островковых структур и т.д. При этом, ввиду наличия значительных технологических разбросов этих параметров, необходимо осуществление 100% выходного контроля.

**Цель статьи.** Эффективная техническая реализация вихретокового метода контроля параметров тонких ферромагнитных пленок и покрытий осуществима с помощью накладных и экранных вихретоковых измерителей преобразователей (далее ВИП). На сегодняшний день способы надежного, высокоточного контроля однородности, толщины покрытия разработаны недостаточно. Основной проблемой такого рода контроля, является выявление дефектов покрытия на участках с различными материалами основания или конфигурации контролируемого изделия. Кроме этого к мешающим факторам можно отнести влияние зазора между покрытием и измерительным преобразователем, влияние внешних электромагнитных помех, температурная нестабильность элементов схемы преобразователя, нестабильность параметров источника питания и т.д.

**Целью данной статьи** является разработка преобразователя способного в значительной мере скомпенсировать мешающие факторы.

**Изложение основного материала**

В зависимости от числа контролируемых параметров принято различать однопараметровый, двухпараметровый, и многопараметровый контроль [1].

Рассмотрим двухпараметровый контроль. В основе такого контроля находится зависимость интенсивности и распределения вихревых токов в объекте контроля (далее ОК) от его геометрических, электромагнитных и иных параметров, а также от взаиморасположения ОК и ВИП. В качестве последнего принято использовать одну, а чаще несколько катушек индуктивности. Переменный ток, протекающий в катушках ВИП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем ОК. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки ВИП, наводя в них некоторую э.д.с., что эквивалентно изменению ее импеданса. Таким образом, регистрируя напряжение на клеммах катушек ВИП или его импеданс получают информацию о свойствах ОК или о положении ВИП относительно него [1 – 2].

Однако следует заметить что э.д.с. наводимая в катушках, ВИП содержит информацию не только об одном параметре ОК. Для ферромагнитных тонких пленок этими параметрами являются, в основном, толщина  $d$  и электропроводность  $\sigma$ . Измеряя  $d$  вихретоковым измерительным преобразователем, принимаем  $\sigma = \text{const}$ . Однако в ряде случаев необходимо одновременно измерять как  $d$ , так и  $\sigma$ .

Электропроводность  $\sigma$  тонких металлических ферромагнитных пленок с высокой точностью можно измерять СВЧ резонансным методом.

Для обеспечения высокой точности измерения электропроводности весьма перспективным представляется использование цилиндрического резонатора на волне  $H_{01n}$  [3]. Если в таком резонаторе ис-

следуемый образец замещает весь торец или часть его, то вследствие отсутствия на торце радиальных токов обеспечивается абсолютная бесконтактность измерений, т.е влияние степени прижатия ОК к стенкам резонатора полностью исключается

Сравнение неразрушающих резонаторных методов контроля электропроводности приводит к выводу о том, что наименьшей погрешности измерения при высокой воспроизводимости результатов и абсолютной бесконтактности можно достичь применением цилиндрического резонатора на волне  $H_{01n}$ . У преобразователя такого типа абсолютная бесконтактность обеспечивается отсутствием токов текущих с боковых поверхностей на торцевые, а неразрушаемость – расположением ОК на месте одного из торцов. Существенным достоинством такого ВИП является возможность перестройки его при помощи подвижного бесконтактного поршня, т.к. отсутствуют токи, текущие с торцевых поверхностей и следовательно, дефекты трущегося контакта поршня не сказываются на добротности резонатора.

Использование перестраивающегося ВИП дает возможность применять генератор, работающий на фиксированной частоте, что обеспечивает возможность частотной стабилизации и, следовательно, получение высокой точности измерений.

В большинстве разработанных устройств контроль электропроводности осуществляется по изменению добротности резонатора без ОК и резонатора с ОК. Однако определение  $\sigma$  таким способом характеризуется большой случайной погрешностью из-за отсутствия простых методов измерения добротности на СВЧ с точностью лучше, чем  $\pm 10\%$ .

Поэтому для определения  $\sigma$  целесообразно измерять изменение прошедшей через резонатор мощности [3]. Этот метод не требует определения добротности при каждом измерении, а нуждается лишь в одноразовом установлении ее значения для резонатора без ОК и периодической проверке степени постоянства добротности.

### Вывод

Из сказанного выше следует вывод, что для получения (обеспечения) высокой точности измерения электропроводности, высокой производительности результатов, неразрушаемости и локальности измерений, необходимо в качестве преобразователя следует выбирать резонаторы, у которых возможно выполнение измерительного отверстия по линии тангенциального или нулевого тангенциального тока, а в качестве регистрируемой величины - изменение прошедшей через резонатор мощности.

Для установления в общем виде взаимосвязи изменения мощности прошедшей через резонаторный преобразователь СВЧ с величиной электропроводности ОК возможно использовать следующее

выражение. Передаваемая резонатору мощность равна

$$\rho_0 = \rho \frac{4\eta_0^2}{(1 + 2\eta_0)^2}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – мощность на выходе резонатора;

$\rho$  – мощность на входе резонатора;

$\eta_0$  – коэффициент связи идентичных устройств связи резонатора с волноводами.

Для  $\eta_0$  справедливо следующее выражение

$$\eta_0 = \frac{P_{св.о}}{P_{пот.о}}, \quad (2)$$

где  $P_{св.о}$  – безразмерная величина, характеризующая потери СВЧ мощности, запасаемой в резонаторе на связь;

$P_{пот.о}$  – безразмерная величина, характеризующая потери мощности внутри резонатора.

С целью измерения одновременно двух параметров - толщины  $d$  и электропроводности  $\sigma$ , нами был разработан преобразователь, состоящий из двух измерительных преобразователей, один - вихретоковый, а второй СВЧ резонатор на  $H_{01n}$  типе волны. Оба преобразователя расположены в общем корпусе, аксиально друг другу. При этом СВЧ резонатор на  $H_{01n}$  типе волны имеет общую с ВИП плоскость измерительного торца. Конструкция такого комбинированного преобразователя представлена на рис. 1.

Конструктивно СВЧ резонатор 1, входящий в резонансную систему СВЧ генератора на лавинно-пролетном диоде, для исключения взаимного влияния преобразователей помещен в полость ферритового сердечника 2, на котором намотаны возбуждающая катушка 3 и измерительная катушка 4 ВИП.

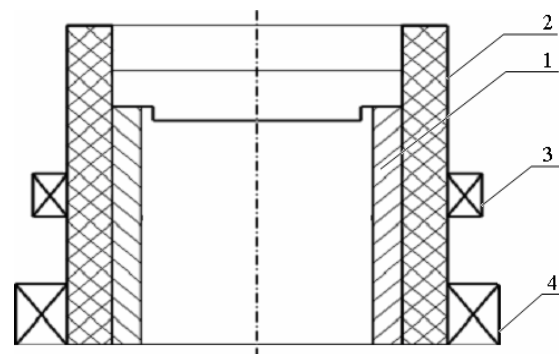


Рис. 1. Конструкция комбинированного преобразователя.

Аксиальное расположение преобразователей позволяет получить информацию одновременно с одного и того же места ОК, что способствует повышению точности измерения. Информационные сигналы с обоих измерительных преобразователей де-

тектируються и каждый по своему каналу поступают на блоки обработки сигналов для представления в цифровом виде.

ва. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.

3. Карлинер М.М. Электродинамика СВЧ: курс лекций 2-е издание / М.М. Карлинер. – Новос.: Изд-во Новосибир. гос. ун-та, 2006. – 258 с.

### Список литературы

1. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т.: Т. 2 / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.: ил.

2. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: Учебное пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальнико-

Поступила в редколлегию 12.10.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Синотин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### НЕРУЙНУЮЧИЙ КОНТРОЛЬ НЕФЕРОМАГНІТНИХ ПЛІВОК І ПОКРИТТІВ

В.А. Світличний, В.В. Тулупов

*Розглянуто питання, пов'язані з не руйнуючим вихорострумовим контролем неферромагнітних плівок і покриттів. Зазначено залежність інтенсивності та розподілу вихрових струмів у покритті від його геометричних, електромагнітних і інших параметрів, а також від взаємного розташування покриття й вихорострумового вимірювального перетворювача. Запропоновано конструкцію перспективного перетворювача.*

**Ключові слова:** безконтактність виміру, об'єкт контролю, вимірник перетворювач, вихорострумовий вимірювальний перетворювач, товщина об'єкта контролю, електропровідність об'єкта контролю, надвисока частота, резонансний метод, резонатор на хвилі, потужність

### NONDESTRUCTIVE TESTING OF NON-FERROMAGNETIC FILMS AND COATINGS

V.A. Svetlichny, V.V. Tulupov

*The problems associated with non-destructive eddy current testing of non-ferromagnetic films and coatings. We indicate the dependence of the intensity and of eddy currents in the coating on its geometric, electromagnetic, and other parameters, as well as the interposition of the coating and eddy current measuring transducer. The design of prospective converter.*

**Keywords:** contactlessness of measurement, unit under test, transducer, vortex-current transducer, thickness of the unit under test, electrical conductivity of the unit under test, microwave frequency, resonance technique, resonator on wave, power