

УДК 621.317

Ю. Е. ХОРОШАЙЛО, канд. техн. наук,
Н. Е. ХОРОШАЙЛО, О. И. СТОЯН

**КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТИ ТОНКИХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ
ПЛЕНОК ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ**

Развитие электронной микроскопии позволило получить наглядное представление о процессе образования тонких пленок на начальной стадии конденсации. Установлено, что пленки малой толщины представляют собой островковый конденсат, состоящий

из отдельных частиц [1]. В работах [2—7] показано, что в вихретоковом контроле неферромагнитных материалов такое несовершенство структуры пленок эквивалентно электрическим диполям.

Предлагается разработанный метод для контроля несплошности объекта контроля (ОК), который заключается в том, что на высоких частотах резонансный вихретоковый измерительный преобразователь (ВИП), имеющий катушки цилиндрической формы отлично от идеальной модели реагирует на тонкие неферромагнитные пленки, имеющие пористую островковую структуру. Это отличие заключается в следующем: у настроенного на полный резонанс ВИП выходной сигнал U_2 увеличивается, если в измерительный зазор между катушками помещать тонкие $\leq 0,01$ мкм пленки с несплошной структурой. Относительное превышение сигнала

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{U_2 - U_{20}}{U_{20}} = N_0 - 1$$

составило величину до 10 %.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, причина увеличения выходного сигнала ВИП не кроется в свойствах контуров.

Увеличение выходного сигнала при контроле несплошности тонкой пленки ОК цилиндрическим экраным ВИП можно объяснить следующим образом. У цилиндрических катушек при питании их переменным током в рабочем зазоре между катушками, по отношению к ОК, существует нормальный магнитный поток H , изображенный на рис. 1, а. Нормальный магнитный поток создает в рабочем зазоре тангенциальное электрическое поле E . При наличии дефектов в структуре металлической пленки (ОК), а именно, разрывов, между границами разрыва может возникнуть очень сильное электрическое поле под действием разности потенциалов φ_1 и φ_2 между границами разрыва

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_a^b \vec{E} dl.$$

При этом напряженность между границами разрыва будет очень большой, если расстояние между границами d будет малым (рис. 1, б): $\vec{E} \approx U/d$. Это же поле, как известно, является одним из факторов, вызывающих электронную эмиссию, которая обеспечивает проводимость очень тонких пленок.

Поскольку толщина, исследованных нами металлических пленок, была очень малой и исчислялась сотыми долями микрон, электрическое поле в разрыве E_1 имеет значительную нормальную составляющую электрического поля E_n (рис. 1, в). Плот-

ность тока электрического смещения выражается законом $\frac{\partial E}{\partial t} = E_n \frac{\partial E}{\partial t}$.

Ток электрического смещения вызывает магнитное поле. Магнитные силовые линии этого поля перпендикулярны магнитному полю катушек. Это поле наводит электродвижущую силу в вертикальных составляющих обмотки измерительной катушки (рис. 1, г).

Таким образом, увеличение связи между катушками ВИП при внесении ОК в рабочий зазор можно объяснить только дискретностью структуры металлической пленки (островковое, пористое, сегчатое и т. п. строение).

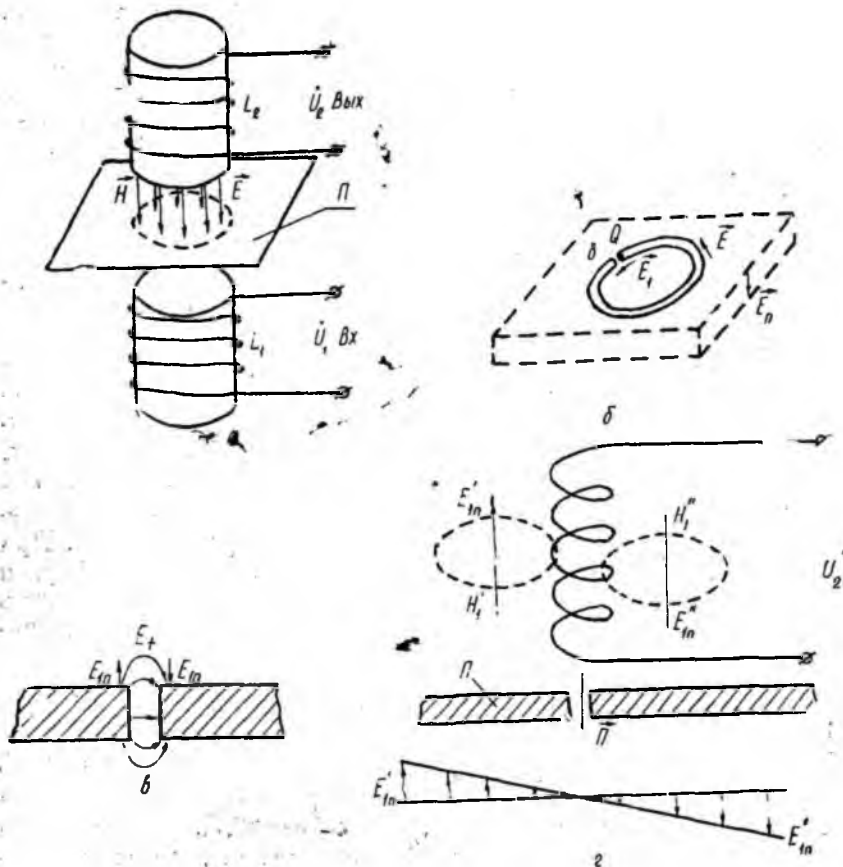


Рис. 1

Для подтверждения правильности настоящего объяснения были выполнены следующие экспериментальные исследования:

- 1) изменялась рабочая частота питающего тока;
- 2) применялись измерительные катушки различной высоты;
- 3) использовались три типа ВИП: с двумя плоскими катушками;

с двумя цилиндрическими катушками;
с комбинацией плоской и цилиндрической катушки.

На рис. 2, а представлены типовые характеристики преобразования ВИП с цилиндрическими катушками (кривая 1) и плоскими катушками (кривая 2). Как следует из рисунка, характеристика «2» для плоских катушек соответствует по своей форме

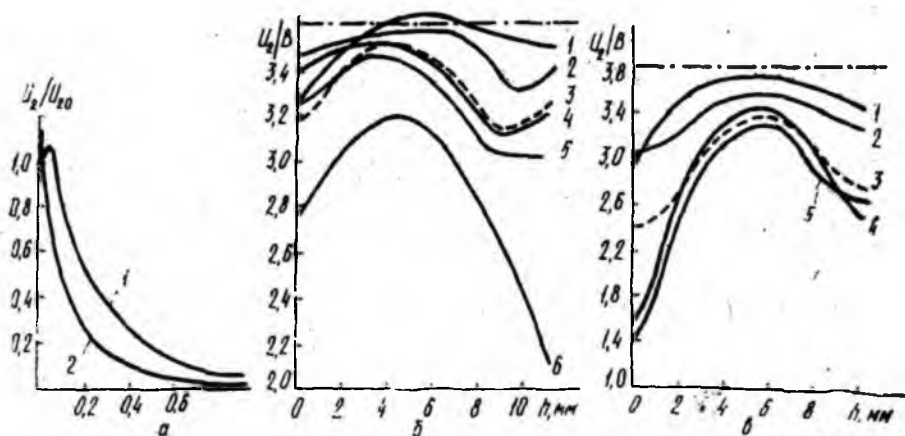


Рис. 2

теоретической, для цилиндрических «1» — имеет выше упомянутое увеличение U_2 в области малых толщин.

На рис. 2, б представлены функции для пяти образцов алюминиевых пленок распределения выходного сигнала ВИП вдоль измерительного зазора $U_2(h)$ при цилиндрических катушках. Видно, что из пяти образцов пленок увеличения выходного сигнала ($U_2 > U_{20}$) проявляется у наиболее тонкого образца № 1. Для сравнения на рис. 2, в даны функции распределения $U_2(h_1)$ для тех же образцов № 1—№ 5, но при плоских катушках. На этом рисунке ни одна из кривых не превосходит уровня U_{20} , отсюда следует, что ВИП с плоскими катушками практически не реагирует на погрешность.

Превышение выходного сигнала U_2 наблюдается до некоторой величины d , при которой пленка приобретает сплошную структуру. Экспериментально на 15 образцах алюминиевых пленок было установлено, что распределение становилось «пористым» при $d \approx 0,02—0,03$ мкм.

В процессе экспериментальных исследований было также обнаружено следующее явление, порожденное пористостью. Если изменять угол положение ОК в измерительном зазоре, то величина выходного — сигнала зависит от последнего. У сплошных пленок ОК это явление отсутствовало.

Таким образом, о наличии пористости в ОК вихретоковым методом можно судить по трем признакам:

превышение рабочего выходного напряжения U_2 по сравнению с исходным U_{20} ;

заметные изменения в форме функций распределения по сравнению с теоретическими («нормальными»);

наличие зависимости выходного напряжения от изменения угла положения ОК в измерительном зазоре.

Экспрессным и наиболее просто реализуемым для контроля пористости является метод, основанный на первом признаке $U_2 > U_{20}$. Однако установление факта $U_a > U_{20}$ не выполняется. Об отсутствии пористости можно судить при одновременном анализе всех трех признаков.

Перспективным и весьма интересным методом обнаружения пористости является метод, реализующий все три признака, основанный на следующем: как мы уже установили ВИП с цилиндрическими и плоскими катушками различно реагируют на наличие пор, плоские катушки на поры не реагируют. Поэтому суть метода может заключаться в сравнении двух выходных сигналов, полученных при контроле пористости ОК с помощью двух ВИП, одного — с плоской измерительной катушкой, второго — с цилиндрической. При отсутствии пористости оба сигнала будут одинаковыми, если в ОК имеются поры, то сигналы будут различаться.

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что явление увеличения сигнала на выходе ВИП проявлялось тем сильнее, чем больше частота возбуждающего тока, больше высота измерительной катушки ВИП. Кроме того, явление рассматриваемого увеличения выходного сигнала при использовании в качестве возбуждающей катушки цилиндрической конструкции с ферритовым сердечником, оказалось более сильным, чем при использовании плоской катушки. Последнее можно объяснить тем, что у цилиндрической возбуждающей катушки поле в измерительном зазоре имеет большую концентрацию, что обеспечивает большую нормальную составляющую.

Список литературы: 1. Комнюк Ю. Ф. Физика металлических пленок. М., 1979. 262 с. 2. Мак-Мастер Р. Неразрушающие испытания: Пер. с англ./Под ред. Т. К. Зиловой, И. И. Кифера. М.; Л. 1965. Т. 2. 492 с. 3. Колодий Б. И., Орловский А. А. Некоторые способы вихретокового определения параметров локальных дефектов//Тез. докл. IX Всесоюз. науч.-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля», 26—28 мая 1981. Минск, 1981. С. 14—16. 4. Куров Г. А., Маркарян А. Б., Жильков Э. А. Микроскопические поры в тонких металлических пленках//Микроэлектроника. 1973. Т. 1, вып. 2. С. 145—153. 6. Федосенко Ю. К. Вопросы теории вихретоковой дефектоскопии накладными преобразователями. Строгое математическое решение двумерных задач//Дефектоскопия. Светловодск, 1982. № 2. С. 1. 7. Ошеров Р. Г., Хорошайло Ю. Е. Характеристики резонансных трансформаторных вихретоковых измерительных преобразователей//Радиотехника. 1982. Вып. 61. С. 59—70.

Поступила в редколлегию 13.04.89