

УДК 621.3.4:537.533.35

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДНИКА С ОТВЕРСТИЕМ ПО ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ МУАРОВЫМ УЗОРАМ

© В.М. Иванов, А.В. Лановая, М.И. Потапочкина, Т.Н. Плужникова

Ivanov V.M., Lanovaja A.V., Potapochkina M.I., Pluzhnikova T.N. Research of the magnetic field of a conductor with an aperture on electron-optical moiré patterns. Strengthening of a magnetic field of current around an aperture with the help of electron-optical moiré is experimentally revealed. Criteria of an estimation of this field on electron-optical moiré pictures are revealed. It is shown, that field heterogeneity in a plate with an aperture is the reason of destruction of its edges.

Совместная работа средств радиоэлектроники тесно связана с генерируемыми вокруг ее элементов электромагнитными полями. В полосковых проводниках всегда встречаются монтажные, технические, геометрические и структурные дефекты, которые рождаются в процессе их производства и эксплуатации и определяют их электромагнитную совместимость. Концентрация электромагнитной энергии вокруг этих дефектов может привести к отказу электрооборудования, поэтому наблюдение и измерение магнитных полей вокруг дефектов, которые локализуются в малых объемах, является актуальной задачей. Приведем некоторые исследования по наблюдению и расчету этих полей вокруг центральных отверстий на плоских шинопроводах с помощью электронно-оптического муара.

В качестве модельного образца используем медную пластинку с центральным отверстием размерами (80×80×1) мм, которую расположим в колонне электронографа ЭГ-100А так, чтобы пучок электронов скользил по ее поверхности и был максимально приближен к дефекту (рис. 1).

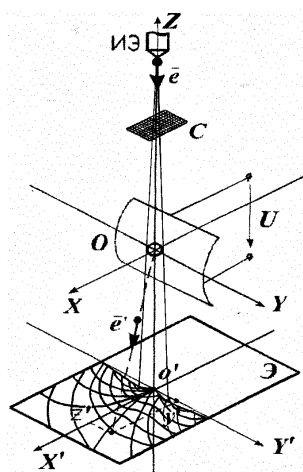
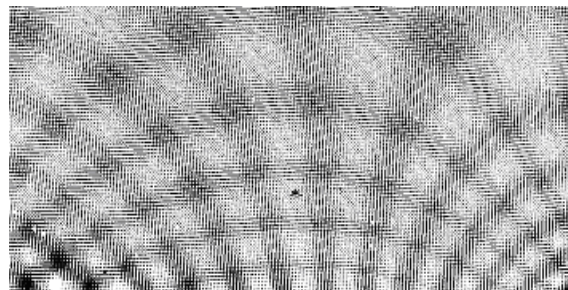


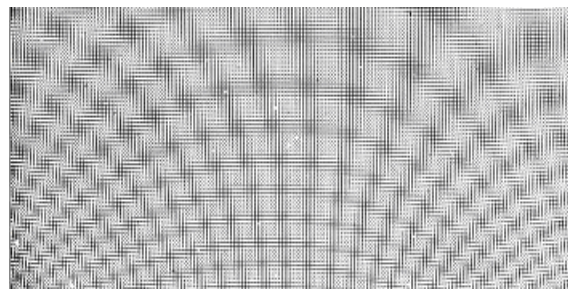
Рис. 1. Схема эксперимента (образец с центральным отверстием): ИЭ – источник электронов; С – сетка; объект (изогнутая пластина с отверстием); Э – экран электронографа; \bar{e} – пучок электронов; U – напряжение источника

Для возбуждения магнитного поля в пластине прикладывается постоянное напряжение U , которое коммутируется контактами поляризованного реле. Питание обмотки реле осуществляется от звукового генератора с частотой 32 Гц и контролируется осциллографом. Муаровый узор получается при совмещении изображения неискаженной сетки и сетки, деформируемой при наличии магнитного поля силой Лоренца (рис. 2).

Для количественного анализа магнитного поля вокруг дефекта по величине смещения электронного пучка на экране электронографа воспользуемся уравнением движения заряженной частицы по оси x :



а)



б)

Рис. 2. Электронно-оптические муаровые картины магнитного поля: а – пластины без отверстия; б – пластины с отверстием, $I = 10$ А; отверстие диаметром 5 мм

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m} V_0 \mu_0 H_x \quad (1)$$

или

$$V_x = \frac{e}{m} \mu_0 V_0 \int H_x(z) dz, \quad (2)$$

где V_x – скорость вылета электрона из области действия поля; V_0 – скорость разгона частицы; H_z – магнитное поле вокруг отверстия; e , m – заряд и масса электрона; μ_0 – магнитная постоянная.

Окончательно имеем:

$$x = \frac{e}{m} \mu_0 \frac{L}{V_0} \int H_x(y) dy, \quad (3)$$

$$\text{где } V_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}; \quad dz = V_0 dt; \quad x = V_x \frac{L}{V_0};$$

U – ускоряющее напряжение, равное 40 кВ.

Отклонение пучка в магнитном поле, видимое на экране, можно рассчитать по формуле:

$$x' = V_x \frac{L}{V_0} = \frac{e}{m} \mu_0 \frac{L}{V_0} \int H_x(y) dy, \quad (4)$$

где L – расстояние между объектом и экраном, равное 0,4 м.

Зададим распределение магнитного поля вдоль оси x , которое достаточно точно аппроксимирует интегрирование. При расчете плоских магнитных линз чаще всего используют функцию, описывающую колоколообразное распределение [1]:

$$H_x(y) = \frac{H_{xm}}{1 + \left(\frac{y}{5d}\right)^2}, \quad (5)$$

где d – диаметр отверстия.

После подстановки данных расчетное соотношение между отклонением x' и $H_x(y)$ получается:

$$x' = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot H_{x \max}, \quad (6)$$

Отклонение пучка в направлении оси x может быть легко измерено по муаровой картине, например:

$$x' = k \cdot m = 6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (7)$$

где k – номер эквипотенциали; $m = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м – размер увеличенного изображения ячеек сетки.

Напряженность магнитного поля находим из выражения (6):

$$H_{xm} = \frac{x'}{3,5 \cdot 10^{-6}}. \quad (8)$$

Полученные значения сравниваются с теоретическими адными, приведенными в работе [2] на кромке отверстия и соответствующим распределением радиальной и осевой составляющих напряженности [3]:

$$H_x(x, y) = \frac{I}{\pi R} \left[\frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{y}{R}\right)^2 + \left(\frac{x}{R}\right)^2}} k(\varphi) \right] + \left[\frac{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}{1 - \left(\frac{y}{R}\right)^2 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} E(\varphi) \right], \quad (9)$$

где I – ток, протекающий по пластине; R – радиус отверстия; $k(\varphi)$, $E(\varphi)$ – эллиптические интегралы I-го и II-го рода.

Аналогичным образом обрабатываются эквипотенциали, полученные линиями вертикальных совпадений сетки, которые характеризуют радиальную составляющую магнитного поля. В этом случае отклонение по оси Y можно рассчитать по формуле:

$$y' = V_y \frac{L}{V_0} = \frac{e}{m} \mu_0 \frac{L}{V_0} \int H_y(x) dx. \quad (10)$$

Подставив численные данные и соответствующее колоколообразное распределение при $d = 5 \cdot 10^{-6}$ м в уравнение (10) и проинтегрировав его, получим расчетное соотношение:

$$H_{ym} = \frac{y'}{5 \cdot 10^{-6}}. \quad (11)$$

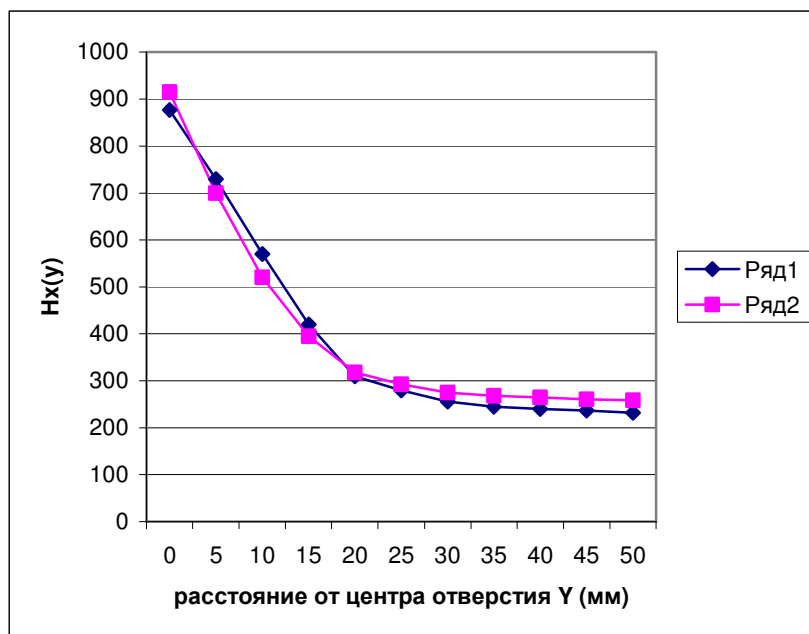
На рис. 3а приведены теоретическая и экспериментальная зависимости осевой напряженности $H_x(y)$ магнитного поля в плоском проводнике с отверстием при неизменном токе.

Аналогичным образом обработаны результаты по радиальной составляющей магнитного поля $H_y(x)$ (рис. 3б).

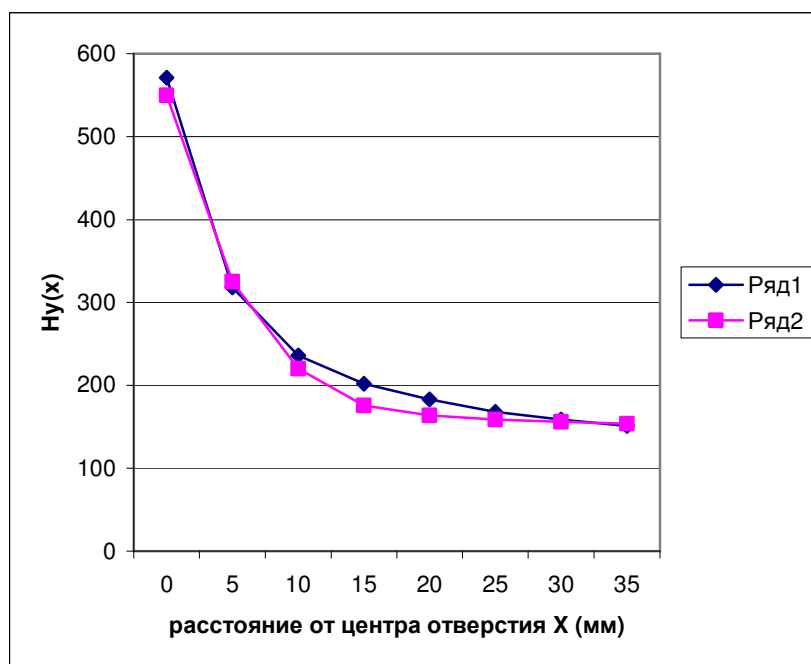
Из сравнения теоретических и экспериментальных данных следует, что расхождение составляет не более 5% во всем диапазоне, что доказывает адекватность муаровой картины реальному неоднородному магнитному полю плоского проводника.

Необходимо отметить, что во всех экспериментах отверстие в пластине фиксировалось максимальным искажением муарового узора.

Предложенная методика электронно-оптического муара может быть применена для визуального наблюдения топографии магнитного поля, для обнаружения дефектов по максимальному искажению муаровой картины, а также для расчета наибольшего искажения магнитного поля на кромке отверстия в анализе механизмов разрушения проводников электромагнитным полем.



а)



б)

Рис. 3. Распределения осевой (а) и радиальной (б) составляющих магнитного поля при постоянном токе: 1 – экспериментальная; 2 – теоретическая

ЛИТЕРАТУРА

1. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Иванова А.В., Пучков Н.П., Иванов В.М., Барышев Г.А. О концентрации энергии на отверстии в плоском проводнике с током // Вестник ТГУ. Сер. Естеств. и технич. науки. Тамбов, 2000. Т. 5, вып. 2-3. С. 328-330.
3. Иванов В.М., Печегин Е.А., Уваров А.Н. Исследование концентрации энергии в области непроводящих включений плоского про-

водника с током средствами электронной микроскопии // Электрика. 2003. №7. С. 34-37.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №05-01-00759).

Поступила в редакцию 5 декабря 2006 г.