

УДК 539.2

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОДНОВИТКОВОГО ПРОВОДНИКА ПО ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ МУАРОВЫМ КАРТИНАМ

© Т.Н. Плужникова, Д.Н. Лимонов, А.В. Лановая, В.М. Иванов

Pluznikova T.N., Limonov D.N., Lanovaya A.V., Ivanov V.I. Research of magnetic field of single-turn conductor on electron-optic moire patterns. Observing technique of nonhomogeneous magnetic fields in small volumes as an example of circular turn with current with a help of electronic microscopy is recognized. Calculated model of magnetic field of circular turn with the help of electron-optic moire pictures is received and adequacy of this model to its real distribution is proved.

Известно, что в просвечивающей электронной микроскопии применяются методы муаровых узоров, позволяющие измерять небольшие относительные смещения, связанные с накоплением ошибки в периодичности правильных структур [1, 2]. Также известно, что одновитковый проводник генерирует неоднородное магнитное поле, которое сильно локализуется вокруг него. Получение видимого изображения этого поля в виде муаровой картины позволит с большей долей вероятности смоделировать локальное поле в малом объеме и обнаружить искажения силовых линий дефектами различной геометрии.

В связи с этим необходимо разработать методику наблюдения и измерения магнитных полей в малых объемах и создать расчетную модель, позволяющую описать муаровые картины на примере одновиткового проводника, а также применить современные аппаратные средства вычислительной техники для непосредственной обработки муаровых картин по заданным критериям.

В качестве объекта, создающего неоднородное магнитное поле, использовался круговой виток с током, выполненный из медной проволоки диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м с радиусом закругления $6 \cdot 10^{-3}$ м. Объект устанавливался в колонне электронографа ЭГ-100А таким образом, чтобы можно было наблюдать на экране муаровый узор (рис. 1). Условия эксперимента позволили получить на экране четырехкратное увеличение изображения сетки и двукратное изображение одновиткового проводника.

Муаровая картина получалась при совмещении эталонного и искаженного изображения сетки. Искаженное изображение возникает при включенном источнике магнитного поля в результате отклонения электронов под действием силы Лоренца. Точное совмещение обоих изображений достигалось включением в цепь витка поляризованного реле, питание которого осуществлялось от звукового генератора с частотой 32 Гц, контролируемой осциллографом (рис. 2).

Перейдем к анализу полученных муаровых картин (рис. 3), на которых наблюдается совпадение горизонтальных и вертикальных линий искаженного и неискаженного изображений сетки. Используя правило левой руки, можно проанализировать образовавшиеся смещения на муаровом узоре.

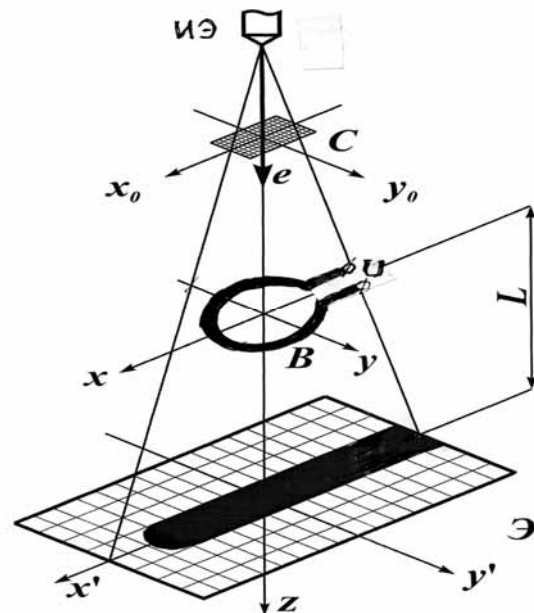


Рис. 1. Электронно-оптическая схема наблюдения магнитного поля витка с током. ИЭ – источник электронов; С – сетка $0,1 \times 0,1$ мм; В – виток с током; L – расстояние от витка до экрана; U – напряжение

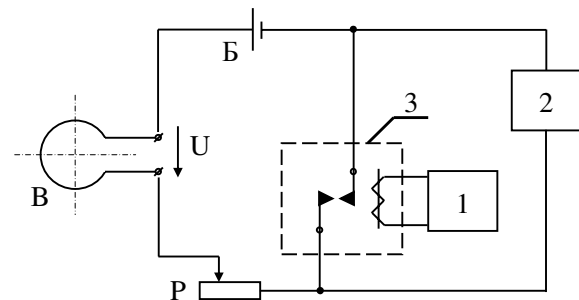
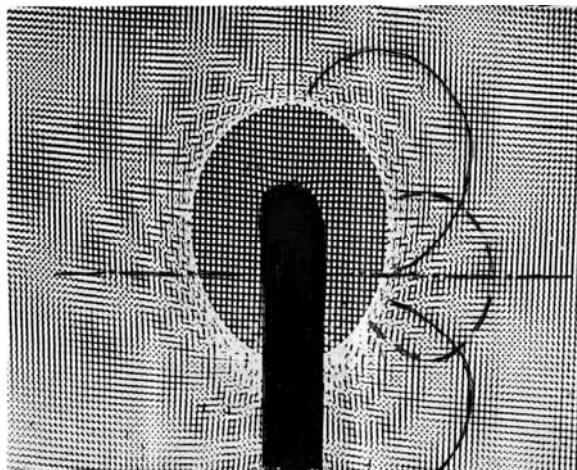
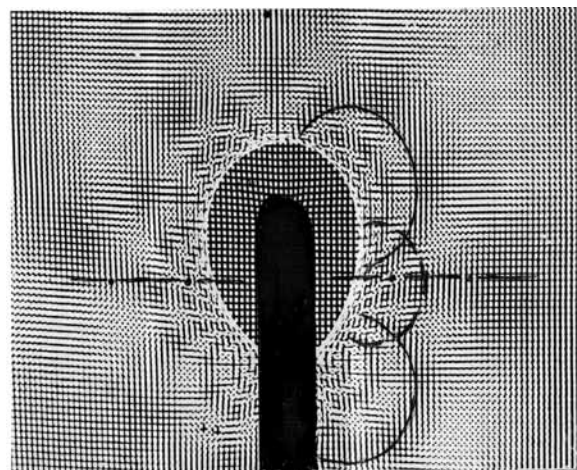


Рис. 2. Схема подключения витка в колонне электронографа. U – напряжение источника; Р – реостат; 1 – звуковой генератор; 2 – осциллограф; 3 – поляризованное реле; Б – батарея аккумуляторов; В – виток с током



а)



б)

Рис. 3. Электронно-оптические муаровые картинки магнитного поля витка с током. а) 10 А; б) 20 А

Пунктиром показана одна из линий горизонтальных совпадений, полученная в результате равных смещений от осевой составляющей напряженности магнитного поля $H_y(z)$, а штрих-пунктиром обозначена ось проекции витка на экране электронографа. Граница неискаженного изображения сетки вокруг тени витка образована в результате отклонения электронов у его поверхности, которое характеризует концентрацию магнитного поля у поверхности исследуемого объекта.

Связь между отклонением электронов по оси X (линия горизонтальных смещений) и осевой составляющей напряженности магнитного поля H_y можно установить, проанализировав уравнение движения электронов вдоль оси Z :

$$\frac{dV_x}{dt} \cdot m = eV_0\mu_0 H_y(z), \quad (1)$$

где $V_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ – скорость электронов в направлении

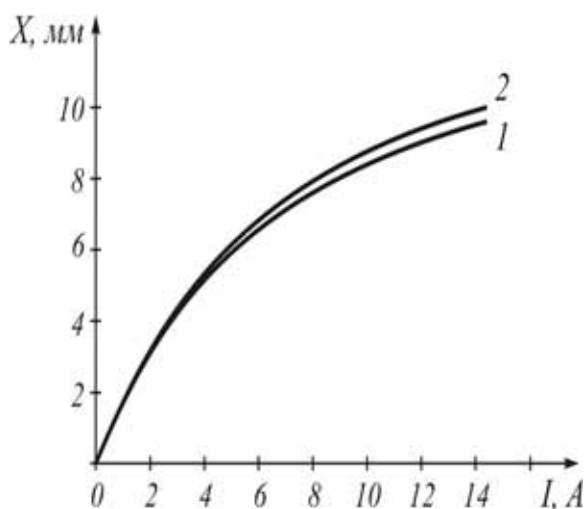
Z ; e, m – заряд и масса электрона; μ_0 – магнитная постоянная; U – ускоряющее напряжение.

Релятивистским изменением массы частицы при ускоряющем напряжении порядка нескольких десятков киловольт в первом приближении можно пренебречь.

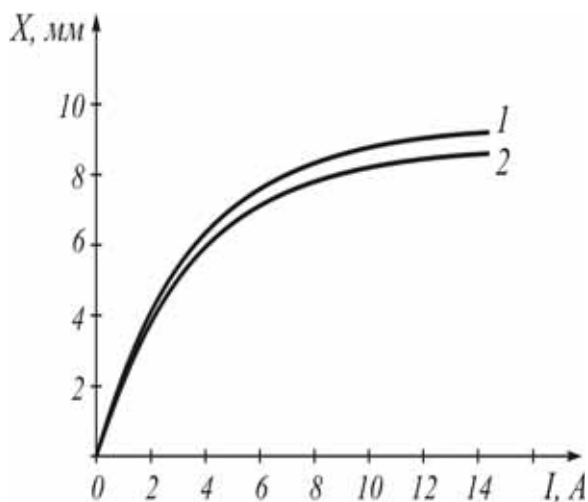
Заменяв dt на $\frac{dz}{dV_0}$ и проинтегрировав уравнение (1), получим:

$$V_x = \frac{e}{m} \mu_0 \int H_y(z) dz. \quad (2)$$

Вектор скорости электронов может изменяться в магнитном поле только по направлению, а не по величине. Поэтому в результате появления составляющей скорости вдоль оси X проекция скорости на ось Z уменьшается.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость расстояния эквипотенциала от тока для: а) $H_{ym} = 2 \cdot 10^2$ А/м, б) $H_{ym} = 1,2 \cdot 10^2$ А/м, 1 – экспериментальная; 2 – теоретическая

Однако в эксперименте этим эффектом можно также пренебречь. Тогда отклонение пучка в магнитном поле, видимое на экране, можно рассчитать по формуле:

$$x' = V_x \frac{L}{V_0} = \frac{e}{m} \mu_0 \frac{L}{V_0} \int H_y(z) dz, \quad (3)$$

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

Как видно из выражения (3), отклонение пучка пропорционально интегралу от измеряемого поля по направлению пролета электронов. При нахождении интеграла необходимо задать распределение магнитного поля вдоль оси Z . Здесь лучше всего использовать колоколообразную функцию, которая применяется при расчете напряженности в коротких магнитных линзах [3].

$$H_y(z) = \frac{H_{ym}}{1 + \left(\frac{z}{10d}\right)^2}, \quad (4)$$

где $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м – расстояние от центра катушки, на котором напряженность поля падает в два раза.

Полагая, что на краях интервала $[-10^2 d \leq z \leq 10^2 d]$ значения $H_y(z)$ должно падать до 1 % от H_{ym} , и подставив численные данные и распределение (4) в уравнение (3) и проинтегрировав его, получим расчетное соотношение между отклонением x' и H_{ym} :

$$x' = 1,6 \cdot 10^{-3} H_{ym} \cdot d. \quad (5)$$

Отклонение пучка в направлении оси X может быть легко измерено по муаровой картине, так как оно равно произведению номера полосы (эквипотенциали) на размер ячейки увеличенного изображения сетки.

Например, на рисунке 3а пунктирной линией обозначена вторая по счету эквипотенциаль с максимальным расстоянием от центра витка $Y = 7 \cdot 10^{-3}$ м, следовательно, отклонение пучка находим таким образом:

$$x' = 1,6 \cdot 10^{-3} H_{ym} \cdot d, \quad (6)$$

где k – номер эквипотенциали; $m = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м – размер увеличенного изображения сетки.

Напряженность магнитного поля в точке максимума ($Y = 7 \cdot 10^{-3}$ м) обозначенной эквипотенциали находим из выражения (6):

$$H_{ym} = \frac{x'}{1,6 \cdot 10^{-3} d} = 2 \cdot 10^2 \text{ А/м}. \quad (7)$$

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

$$y' = V_y \frac{L}{V_0} = \frac{e}{m} \mu_0 \frac{L}{V_0} \int H_x(z) dz. \quad (8)$$

Полагая на краях интервала $[-10^2 d \leq z \leq 10^2 d]$ и подставив численные данные в соответствующую функцию, описывающую колоколообразное распределение при $d = 4 \cdot 10^{-3}$ м? в уравнение (8) и проинтегрировав его, получим расчетное соотношение:

$$H_{xm} = \frac{y'}{1,6 \cdot 10^{-3} d}. \quad (9)$$

На рис. 4 приведена зависимость расстояния от катушки до точки с осевой составляющей $H_{ym} = 2 \cdot 10^2$ А/м в зависимости от протекающего по катушке тока. На рис. (3а, 3б) эквипотенциаль с данной напряженностью обведена пунктирной линией.

Аналогичным образом обработаны результаты по радиальной составляющей напряженности магнитного поля $H_{xm} = 1,2 \cdot 10^2$ А/м (рис. 4б). На рис. 3а, 3б эквипотенциаль с данной составляющей напряженности магнитного поля обведена сплошной линией.

Из сравнения теоретического распределения напряженности магнитного поля [4] и экспериментального, полученного на основе обработки муаровых картин, видно, что расхождение составляет не более 5 % во всем токовом диапазоне (рис. 4а, 4б). Это доказывает адекватность муаровой картины реальному неоднородному полю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокации / С. Амелинкс. М.: Мир, 1968. 347 с.
2. О контрасте картины магнитных микрополей, наблюдаемых в растровом электронном микроскопе / Г.В. Спивак, Г.В. Сапарин, Н.Н. Седов, Л.Ф. Комолова // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1968. Т. 32. № 6. С. 962-965.
3. Кельман В.М. Электронная оптика / В.М. Кельман, С.Я. Явор. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 362 с.
4. Монтгомери Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов / Д. Монтгомери. М.: Мир, 1971. 359 с.

Поступила в редакцию 28 октября 2005 г.