

LE MOIRÉ ÉLECTRO-OPTIQUE DANS L'INVESTIGATION DES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

V. M. Ivanov, S. Fofana

Département "Énergétique", UTET; ivanov.tstu@ru

Mots clés et phrases: champ électrique; champ magnétique; faisceau d'électrons; force de Lorentz; image du moiré; modélisation physique et mathématique; visualisation des lignes de champ.

Résumé: La méthode électro-optique des images du moiré a été proposée pour l'étude des paramètres des champs électriques et magnétiques. La visualisation du champ électrique d'un condensateur s'obtient à l'écran d'un microscope électronique à balayage par un faisceau parallèle d'électrons. Les champs magnétiques produits par un courant rectiligne, circulaire, s'observent grâce à un faisceau d'électrons dispersé. Grâce aux méthodes de modélisations physique et mathématique considérées, il a été établi l'évaluation qualitative et quantitative des champs d'investigation par la variation électro-optique des images du moiré et la géométrie des expériences. Il a été montré que la sensibilité de la méthode est suffisante pour l'investigation des champs électromagnétiques à l'échelle locale, ainsi que dans les zones de leur concentration, où se rompt la symétrie du champ. Il a été établi que les images du moiré représentent la topographie des champs électriques et magnétiques, et peuvent également servir à leur évaluation grapho-analytique.

Symboles

a – rayon de la spire, m;	m_e – masse de l'électron, kg;
a_x – accélération de l'électron, m/s^2 ;	n – numéro de frange;
B – induction magnétique, T;	P – quantité de mouvement de l'électron, kg·m/s;
B_x – composante de l'induction B sur l'axe x , T;	r_0 – rayon du cercle par lequel l'électron entre par le bord supérieur du champ, m;
B_y – composante de l'induction B sur l'axe y , T;	r_1 – rayon du cercle de déviation de l'électron, m;
b – distance entre les armatures du condensateur, m;	U – tension d'accélération, V;
c – célérité de la lumière, m/s;	u – tension entre les armatures du condensateur, V;
d – diamètre du conducteur, m;	v – vitesse d'entrée de l'électron par le bord supérieur du champ, m/s;
E – intensité du champ électrique, V/m;	v_0 – vitesse de déplacement de l'électron dans le sens z , m/s;
e – charge de l'électron, C;	v_x – composante de la vitesse v sur l'axe x , m/s;
\bar{e} – faisceau d'électrons;	v_y – composante de la vitesse v sur l'axe y , m/s;
H – intensité du champ magnétique, A/m;	v_z – composante de la vitesse v sur l'axe z , m/s;
H_y – composante axiale de l'intensité du champ magnétique, A/m;	v_{z0} – vitesse initiale sur l'axe z , m/s;
H_r – composante radiale de l'intensité du champ magnétique, A/m;	x_1 – déviation de l'électron à l'écran, m;
H_{ym} – valeur maximale de la composante H_y , A/m;	α – angle de déviation de l'électron à la sortie du champ magnétique, °;
$ H $ – valeur absolue de l'intensité du champ magnétique, A/m;	

I – intensité du courant électrique, A;	λ – distance à partir du centre de la spire, dans laquelle l'intensité du champ chute de 2 fois, m;
L – distance entre l'objet et l'écran, m;	
l – longueur de l'objet, m;	
l_l – distance entre le réseau et l'écran, m;	μ_0 – la constant magnétique, H/m;
k – longueur du côté d'une cellule contenue dans l'image agrandie du réseau, m;	φ – angle de déviation de l'électron à la sortie du champ électrique, °.

Introduction

Sur la base de la théorie de la résistance des matériaux conducteurs et diélectriques sont établies les propriétés de structures sensibles, celles-ci se forment sous l'effet de champs de différentes natures physiques, leurs durée de vie et d'évolution sont soumises à l'influence de facteurs externes, notamment le champ électromagnétique. La fiabilité et la durabilité des matériaux électriques sont étroitement liées aux champs magnétiques qu'ils génèrent, la concentration desquels se trouvant autour des défauts structurels, génétiques, techniques et cinétiques, peut compromettre le fonctionnement stable des équipements électriques [1 – 4].

Les effets de concentration de champs sur différents défauts, sont suffisamment traités par la physique de la résistance des matériaux, ils permettent de détecter les pores, les cavités, les inclusions non métalliques, les fissures, etc. par le moyen de diverses méthodes de détection électromagnétique de défauts [5]. Cependant, ces méthodes ne permettent pas l'observation directe des images de champs, en particulier au cours de l'inspection en compatibilité électromagnétique des équipements de radioélectronique et ceux de fort courant. En outre, la présence de zones défectueuses dans les conducteurs et les diélectriques diminue les densités d'énergie critiques, réduit la résistance thermomécanique et pondéromotrice des matériaux, rompt la symétrie du champ, en localisant et concentrant les champs électriques et magnétiques autour des défauts. La différence de densité volumique d'énergie du conducteur provoque les gradients de lignes de champs, de températures, électriques et magnétiques, conduisant ainsi à la déformation et à la rupture, et également à l'apparition de fissures dans les zones locales. Quant à l'étude des effets de redistribution, d'intensification, de déformation et de concentration des champs électriques et magnétiques autour des défauts au sein des conducteurs et des diélectriques, a été proposée la méthode d'ombre du moiré électro-optique, qui permet de visualiser les lignes de champs et équipotentielles grâce à un faisceau d'électrons, dispersé, dévié sous l'effet de la force de Lorentz, passe à travers une grille de balayage pour atteindre l'écran du microscope électronique. Pour atteindre cet but, des expériences et l'évaluation analytique ont été menées en vue d'étudier le champ électrique d'un condensateur et les champs magnétiques de courants rectiligne et circulaire.

Champ électrique d'un condensateur

La modélisation des champs électriques des composants électriques à l'échelle microscopique est problématique en raison des dimensions des sondes et de la différence non significative des potentiels [6] et, le calcul analytique en utilisant les équations de Maxwell n'est pas possible compte tenu de la difficulté à définir les conditions aux limites.

Considérons à présent la méthode du moiré électro-optique appliquée à un exemple de déformation d'image ombragée d'un réseau sous l'effet du champ électrique d'un condensateur plan.

Des expériences pour l'obtention du modèle du moiré de champs électrostatiques ont été réalisées par le moyen d'un microscope électronique MEB-100A.

Deux conducteurs plans parallèles, de charges opposées ont servi d'objets d'investigation, ils ont été placés dans la colonne du microscope de sorte que la direction du faisceau d'électrons soit orthogonale à l'intensité du champ d'investigation (Fig. 1).

Le motif du moiré apparaît lors de la superposition de deux réseaux de cellules de forme carrée, dont l'un déformé et l'autre non déformé (référence), résultant de la projection d'ombre électro-optique de faisceau parallèle d'électrons. La superposition de deux images dont l'une obtenue en présence de champ électrique perturbateur et l'autre en absence de champ peut servir de caractéristiques qualitative et quantitative.

Analysons ainsi, le mouvement d'un électron dans un champ électrique, comme représenté sur la Fig. 1. A la sortie du champ E l'électron sera soumis à une accélération due au champ électrique

$$a_x = \frac{eE}{m_e}. \quad (1)$$

La vitesse le long de l'axe x est déterminée à partir de l'expression

$$v_x = a_x t = \frac{eEt}{m_e}. \quad (2)$$

D'où l'angle de déviation à la sortie se détermine à partir de la relation des composantes de vitesses sur les axes x et y :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{v_x}{v_y} = \frac{eEt}{m_e v}, \quad (3)$$

où $v_x = v$ – la vitesse d'entrée de l'électron dans le champ à partir de son bord supérieur.

Selon la tension d'accélération appliquée au faisceau d'électron dans l'expérience, la vitesse de l'électron sera

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = 1.18 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

La déviation de l'électron quittant le champ E est exprimée par l'équation suivante

$$x = \frac{a_x t^2}{2} = \frac{eEt^2}{2m_e}. \quad (4)$$

En touchant l'écran, situé à une distance L à partir du bord inférieur du champ, la particule se déplace en une déviation électrostatique, déterminée par l'expression suivante

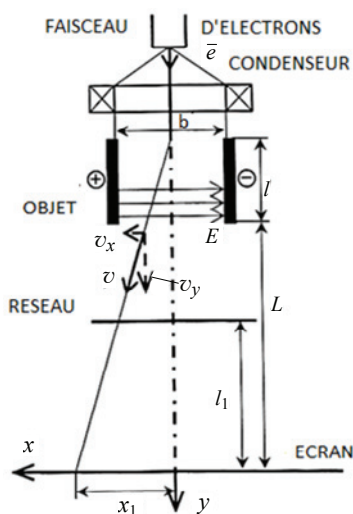


Fig. 1. Schéma d'obtention du moiré d'un champ électrique de condensateur

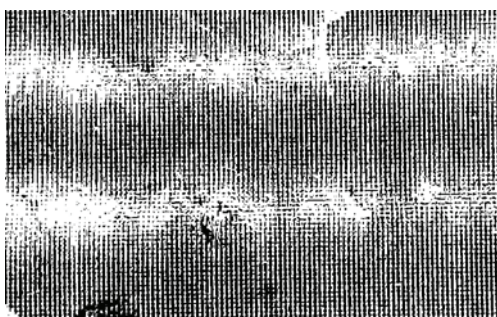


Fig. 2. Moiré d'un champ électrique créée par un condensateur ($u = 100$ V)

condensateur, est égale à 10 mm; L – la distance entre le bord inférieur des plaques du condensateur et l'écran est égale à 40 mm.

Selon les conditions de capture d'images considérées lors de l'expérience, on obtient la relation suivante exprimant la déviation du faisceau d'électron en fonction de l'intensité du champ électrique E

$$x_1 = 20.26 \cdot 10^{-9} E, \text{ m.} \quad (7)$$

D'autre part, la déviation peut être évaluée à partir du motif de moiré (Fig. 2), qui est égale au produit de la dimension de l'image de la grille de référence ($0.1 \cdot 10^{-3}$ m) par le nombre de franges [7].

Par exemple, sous une tension de 100 V ($E = 10^4$ V/m) le nombre de franges sur le motif du moiré est de deux, de sorte que la valeur de déviation du faisceau obtenue est de

$$x_1 = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

Ainsi, la valeur estimée de déviation du faisceau d'électron est différente de celle obtenue expérimentalement de moins de 5 %, c'est pour quoi l'observation du modèle de distribution du champ électrique et son évaluation peut se faire grâce au modèle du moiré électro-optique.

Champ magnétique d'un courant rectiligne

Les dispositifs radioélectroniques, fonctionnant dans les champs magnétiques de faible mesure, sont sensibles à l'influence locale négative de l'inductance mutuelle, qui génère un large spectre d'interférence. Lors du calcul et de la modélisation de ces champs, apparaissent des difficultés liées à la prise en compte des caractéristiques géométriques et physiques des interfaces de ces milieux. La multiplicité des facteurs considérés, exige les méthodes directes d'investigation des champs magnétiques parasites de faible mesure. Parmi ces méthodes, nous citons celles de l'ombre optique et de l'électro-optique. Dans ce cas, s'applique la méthode du motif du moiré, permettant d'établir un lien entre la grandeur de l'intensité du champ magnétique et l'objet, créant ce champ.

Des expériences pour l'obtention du modèle du moiré de champs magnétique parasite, ont été conduites par le moyen d'un microscope électronique MEB-100A, le schéma d'observation est représenté sur la Fig. 3. Le moiré apparaît lors de la superposition de deux réseaux, dont l'un est déformé, et l'autre jouant le rôle de référence (ou d'étalonnage). La déformation du réseau de référence contenant des cellules rectangulaires de dimension $(0,1 \times 0,1) \cdot 10^{-3}$ m se produit à la suite de projection d'ombre électro-optique d'une source ponctuelle.

Une cône de faisceau, est dispersé en plusieurs petits faisceaux, la section desquels est déterminée par la géométrie des cellules du réseau et par la géométrie de capture

d'image. Ces conditions de capture d'images permettent l'obtention à l'écran d'un grandissement de 4 fois du réseau de référence, soit $(0,4 \times 0,4) \cdot 10^{-3}$ m.

Si entre le réseau et l'écran les électrons passent à travers le champ magnétique, alors sous l'influence de la force de Lorentz ils changent leur direction initiale et, par conséquent, l'image du réseau se déforme. La comparaison de l'image du réseau, obtenue après le passage des électrons à travers le champ perturbateur, avec celle du réseau en absence de champ peut servir de caractéristiques de champ.

Lors de l'analyse des données expérimentales, nous allons considérer, que les champs de même intensité font appel aux mêmes valeurs de déplacements géométriques de l'image déformée du réseau.

Sur le modèle du moiré (Fig. 4) on observe trois particularités: la coïncidence des lignes horizontales, celles des lignes verticales, et aussi celle des noeuds, dans lesquels coïncident les cellules des images déformée et non déformée.

Les lignes horizontales donnent le lieu géométrique des points, dans lesquels sont égaux les déplacements verticaux et respectivement sont égaux les déplacements horizontaux des composantes du champ.

Analogiquement les centres des lignes verticales donnent le lieu géométrique des points, dans lesquels sont égales les composantes verticales du champ.

Pour le calcul de déplacement du faisceau d'électrons, nous appliquons l'équation du mouvement de l'électron dans le champ magnétique [8]

$$\frac{dP}{dt} = -e[vB], \quad (8)$$

où P – la quantité de mouvement.

En exprimant l'accélération relativiste à l'électron à travers la vitesse et l'induction du champ magnétique, on obtient de façon générale

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{e}{m_e} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} [vB]. \quad (9)$$

Dans le champ magnétique la vitesse de l'électron ne change seulement que par la direction, c'est pour quoi, en résolvant l'équation (8) nous obtenons:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{e}{m_e} \sqrt{1 - \frac{v_{z0}^2}{c^2}} v_{z0} B_y; \quad (10)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{e}{m_e} \sqrt{1 - \frac{v_{z0}^2}{c^2}} v_{z0} B_x; \quad (11)$$

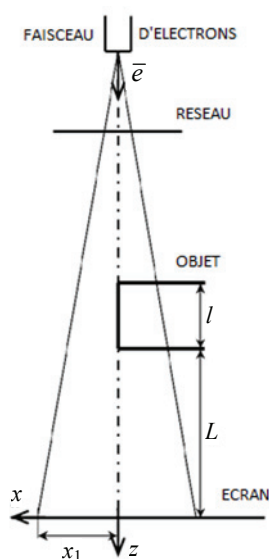


Fig. 3. Schéma d'obtention du moiré d'un champ magnétique créé par un conducteur rectiligne

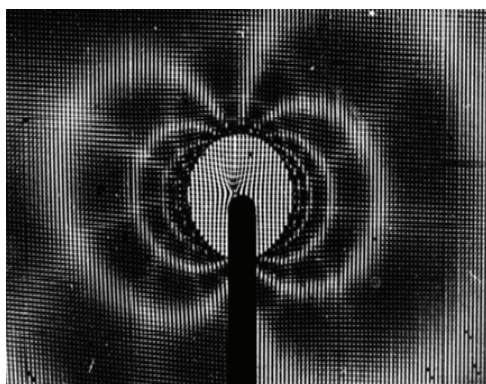


Fig. 4. Moiré électro-optique d'un champ magnétique créé par un conducteur rectiligne

$$\frac{dv_z}{dt} = 0; \quad (12)$$

$$v_z = -v_{z0}. \quad (13)$$

La deuxième équation d'intégrale (10) et (11) et la première équation d'intégrale (13) donnent, en tenant compte des conditions initiales et aux limites de séparation sur le bord inférieur du champ de longueur l , le déplacement suivant sur l'axe x sous la forme

$$x - x_0 = -\frac{e}{m_e} \sqrt{1 - \frac{v_{z0}^2}{c^2}} B_y \frac{l^2}{2v_{z0}}. \quad (14)$$

En sortant du champ de longueur l , l'électron se déplace selon la trajectoire tangente au point situé sur le bord inférieur du champ. Placée à la distance L du plan, la particule se déplace sur les axes à la distance $x_1 = L \operatorname{tg} \alpha$, où α – l'angle de déviation de l'électron du champ $\operatorname{tg} \alpha = -\frac{v_x}{v_{z0}}$.

Tenant compte de ce fait, on obtient l'expression des déplacements à une distance L du bord inférieur du champ

$$x_1 - x = -\frac{e}{m_e} \sqrt{1 - \frac{v_{z0}^2}{c^2}} B_y \frac{lL}{v_{z0}}. \quad (15)$$

Le déplacement total de l'électron sur l'axe x s'obtient par addition des déplacements déterminés selon les expressions (14) и (15)

$$x_1 - x = -\frac{e}{m_e} \sqrt{1 - \frac{v_{z0}^2}{c^2}} B_y \frac{l}{v_{z0}} \left(\frac{l}{2} + L \right). \quad (16)$$

L'introduction des coordonnées polaires pour ce cas asymétrique conduit aux relations du déplacement total de l'électron sous la forme

$$|H| = \frac{(r_1 - r)v_{z0}}{\frac{e}{m_e} \sqrt{1 - \frac{v_{z0}^2}{c^2}} l \left(\frac{l}{2} + L \right) \mu_0}, \quad (17)$$

où r_0 – le rayon du cercle, par lequel les électrons pénètrent dans le champ à partir du bord supérieur du champ; $\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6}$; la tension d'accélération $U = 40$ кV; $e/m_e = 1.759 \cdot 10^{11}$; $l = 1 \cdot 10^{-2}$ m; $L = 0.4$ m.

Selon nos conditions de capture d'images on obtient la formule suivante

$$|H| = 1.44 \cdot 10^5 (r_1 - r_0). \quad (18)$$

La déviation des faisceaux d'électrons dans la direction intéressée peut être facilement mesurée par l'image du moiré, ainsi elle est égale au produit du numéro de franges (soustrait d'une valeur fixée, appelée habituellement nulle – frange-zéro, où $H_r = 0$) par la dimension de la cellule contenue dans l'image de la grille non déformée [7]. Par exemple, pour un courant de 8A (Fig. 4), la déviation du faisceau d'électron pour les franges d'intensité de champ $H = 170$ A/m est

$$r_1 - r_0 = n \cdot k = 3 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

où $n = 3$ – troisième par comptage des franges; $k = 0.4 \cdot 10^{-3}$ m – longueur du côté d'une cellule contenue dans l'image agrandie du réseau.

De cette façon, la méthode d'observation de champ magnétique parasite proposée par le moyen du modèle électro-optique du moiré permet de voir la distorsion du champ d'un conducteur soumis à un courant et simplifie la tâche de leur calcul.

Champ magnétique d'un courant circulaire

Il a été montré précédemment que, les lignes de champs magnétiques peuvent être observées dans l'image du moiré, qui s'obtient au moyen de faisceau d'électrons, dispersé, dévié sous l'effet de la force de Lorentz, passe à travers une grille de balayage pour atteindre l'écran du microscope électronique, ainsi pour la détermination de la valeur absolue de l'intensité du champ magnétique, des expériences ont été conduites sur un champ magnétique produit par un courant rectiligne. Notamment cette méthode est à la base de l'étude des champs magnétiques les plus complexes.

Des expériences ont également été effectuées grâce à un microscope électronique MEB-100A de tension d'accélération 40 kV.

La spire a été réalisée en fil de cuivre de diamètre 3.5 mm. Le diamètre de la spire est de 10 mm. L'objet d'investigation est placé dans la colonne d'un microscope électronique de sorte qu'on puisse observer les images du moiré sur l'écran (Fig. 5). Les conditions de l'expérience permettent d'obtenir à l'écran du microscope un grandissement de l'image du réseau et de l'objet.

L'image du moiré apparaît lors de la superposition des images de référence et déformée des réseaux. L'image déformée du réseau s'obtient, en raison de la déviation des électrons sous l'influence de la force de Lorentz. Un champ généré à un point quelconque de l'espace par une spire idéale peut s'exprimer en termes d'intégrales elliptiques de premier et deuxième ordre [9]. Au point de coordonnées (y, r) une spire de rayon 5 mm, crée un champ, axial et radial, les composantes duquel peuvent se présenter sous la forme [10]:

$$H_y(y; x) = \frac{\frac{2I}{10a}}{\left[\left(1 + \frac{r}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \left\{ K(\psi) + \frac{E(\psi) \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right]}{\left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right]^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2} \right\}, \quad (19)$$

$$H_r(y; x) = \frac{\frac{2I}{10a} \left(\frac{y}{r}\right)}{\left[\left(1 + \frac{r}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \left\{ -K(\psi) + \frac{E(\psi) \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right]}{\left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \right]^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2} \right\}, \quad (20)$$

où

$$\psi = \arcsin K; \quad (21)$$

$$K = \left[\frac{\frac{4r}{a}}{\left(1 + \frac{r}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

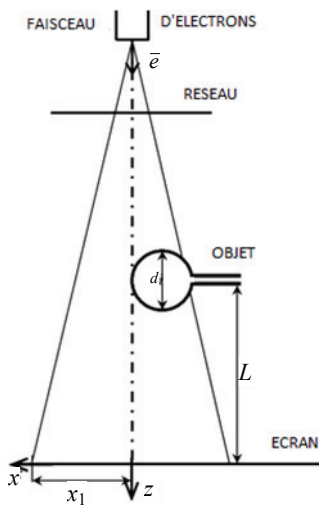


Fig. 5. Schéma d'obtention du moiré d'un champ magnétique créé par un conducteur circulaire

de l'axe z , alors la relation entre la déviation des électrons sur l'axe x (les lignes de coïncidence horizontales) et H_y – la composante axiale de l'intensité du champ magnétique peut être établie, en analysant l'équation du mouvement le long de cet axe

$$\frac{dv_x}{dt} m_e = ev_0 \mu_0 H_y(z), \quad (23)$$

où $v_0 = \frac{\sqrt{2eu}}{m_e}$ – la vitesse des électrons dans la direction z .

La variation relativiste de masse de la particule soumise à une tension d'accélération de l'ordre de dizaine de kilovolts, dans une première approche, peut être négligée. En substituant dt dans $\frac{dz}{dv_0}$ et en intégrant l'équation (23), on obtient

$$v_x = \frac{e}{m_e} \mu_0 \int H_y(z) dz. \quad (24)$$

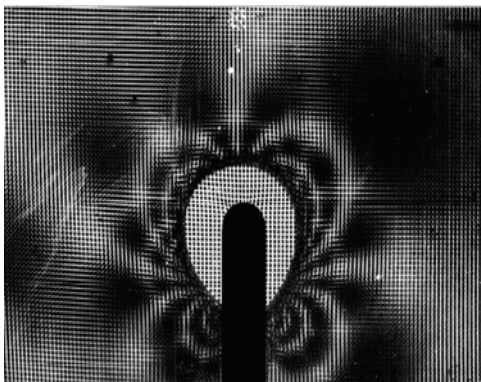


Fig. 6. Moiré électro-optique d'un champ magnétique créé par un conducteur circulaire

Les images du moiré d'un champ magnétique produit par une spire pour une valeur fixée du courant sur la Fig. 6.

Sur le modèle du moiré, on observe une coïncidence des lignes horizontales et verticales des images déformée et non déformée des réseaux.

Les lignes de coïncidence horizontale se sont formées à la suite de déplacements égaux des composantes axiales du champ magnétique, et les lignes de coïncidence verticale – grâce aux composantes radiales.

Les formes d'obtention des lignes des composantes axiales et radiales de l'intensité du champ magnétique correspondent aux distributions analytiques selon la formule (19) et (20). Sur la Fig. 6, l'image non déformée du réseau est représentée autour de l'ombre de la spire, elle s'est formée lors de la déviation des électrons à la surface, ce qui caractérise la concentration du champ magnétique dans cette zone.

Si le faisceau d'électrons se déplace le long

de l'axe z , alors le vecteur vitesse des électrons dans le champ magnétique peut être modifié uniquement que par sa direction, et non en grandeur. C'est pourquoi, dans l'apparition de la composante de la vitesse le long de l'axe x , la projection de la vitesse sur l'axe z diminue.

Cependant pour un petit angle de déviation du faisceau, apportant une place significative dans l'expérience, ce facteur peut également être négligé. Ainsi la déviation du faisceau par le champ magnétique, visible à l'écran, peut être calculée par la formule suivante

$$x_1 = v_x \frac{L}{v_0} = \frac{e}{m_e} \mu_0 \frac{L}{v_0} \int H_y(z) dz, \quad (25)$$

où L – la distance entre l'objet et l'écran est de 0.4 m.

Comme établie dans l'expression (25), la déviation du faisceau est proportionnelle à l'intégrale du champ mesuré dans la direction de déviation des électrons. Lors de la détermination de l'intégrale, il est nécessaire de spécifier la distribution du champ magnétique le long de l'axe y , qui aurait suffisamment exactement approximée l'intégration.

Habituellement dans de tels cas (par exemple, lors de calcul de lentilles magnétiques courtes) cette fonction suivante est employée, décrivant la distribution sous forme de cloche [8]

$$H_y(z) = \frac{H_{ym}}{1 + \left(\frac{z}{10\lambda}\right)^2}, \quad (26)$$

où $\lambda = 2.5$ mm – la distance à partir du centre de la spire, dans laquelle l'intensité du champ chute de deux fois.

En supposant, qu'aux bornes de l'intégrale $[-100\lambda \leq z \leq 100\lambda]$ les valeurs $H_y(z)$ chutent de 1 % de H_{ym} et en mettant les données et la distribution (26) dans l'équation (25) et en l'intégrant, on obtient le rapport entre les relations x и H_{ym}

$$x_1 = 0.74 \cdot 10^{-3} \cdot H_{ym}, \quad (27)$$

où le coefficient $0.74 \cdot 10^{-3}$ est d'unité m^2/A .

La déviation du faisceau dans le sens de l'axe x peut être facilement mesurée par l'image du moiré, ainsi elle est égale au produit du numéro de frange par la dimension de la cellule contenue dans l'image agrandie du réseau.

Par exemple, sur la Fig. 6, la deuxième frange selon le comptage à partir du centre de la spire donne une déviation

$$x_1 = n \cdot k = 2 \cdot 0.4 = 0.8 \text{ мм},$$

où n – le numéro de frange; $k = 0.4$ mm – la dimension de la cellule contenue dans l'image agrandie du réseau.

L'intensité du champ magnétique pour cette frange se calcule selon l'expression (27)

$$H_{ym} = \frac{x_1}{0.74 \cdot 10^{-3}} = 1080 \text{ A/m}.$$

Lors de la comparaison des données théoriques et expérimentales, nous constatons que l'écart est inférieur à 5 % pour toute l'étendue de l'image du moiré. Ainsi, la méthode proposée d'observation des champs parasites électriques et magnétiques grâce au modèle du moiré permet d'étudier la topographie de n'importe quelle configuration de champs et l'utiliser dans la radioélectronique pour le compte de l'hétérogénéité des états magnétiques dans divers appareils électriques, ainsi que de comparer la distorsion de ces champs sur différents objets et contrôler les processus de production et de réglage des produits électroniques.

Bibliographie

1. Исследование магнитного поля проводника с трещиной по электронно-оптическим муаровым картинам / В. М. Иванов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 2Б. – С. 574 – 577.

2. Электронно-оптическое муаровое моделирование процессов концентрации энергии в плоском проводнике с током на дефекте в виде трещины / В. М. Иванов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 4. – С. 633 – 637.
3. Разрушение дефектных проводников с током в магнитном поле / А. В. Лановая [и др.] // Изв. Рос. акад. наук. Сер. физическая. – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1341 – 1343.
4. О концентрации энергии на отверстиях в плоском проводнике с током / В. М. Иванов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. – 2000. – Т. 5, вып. 2–3. – С. 328 – 330.
5. Дорофеев, А. Л. Физические основы электромагнитной структуроскопии / А. Л. Дорофеев, Р. Е. Ершов. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1985. – 180 с.
6. Рязанов, Г. А. Электромагнитное моделирование / Г. А. Рязанов. – М. : Наука, 1969. – 337 с.
7. Дюрелли, А. Анализ деформаций с использованием муара : пер. с англ. / А. Дюрелли, В. Паркс. – М. : Мир, 1974. – 356 с.
8. Кельман, В. М. Электронная оптика / В. М. Кельман, С. Я. Явор. – М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1963. – 362 с.
9. Янке, Е. Таблицы функций : пер. с нем. / Е. Янке, Ф. Эмде. – М. : Мир, 1951. – 512 с.
10. Монтгомери, Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов : пер. с англ. / Д. Монтгомери. – М. : Мир, 1971. – 359 с.

Электронно-оптический муар в исследовании электрических и магнитных полей

В. М. Иванов, С. Фофана

Кафедра «Электроэнергетика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; ivanov.tstu@ru

Ключевые слова и фразы: визуализация силовых линий; магнитное поле; муаровая картина; пучок электронов; сила Лоренца; физическое и математическое моделирование; электрическое поле.

Аннотация: Предложен электронно-оптический метод муаровых картин для изучения параметров электрических и магнитных полей. Визуализация электрического поля конденсатора осуществлялась на экране электронного микроскопа в параллельном пучке электронов.

Магнитные поля в прямом и круговом проводнике наблюдались в рассеянном пучке электронов. Методами физического и математического моделирования установлены качественная и количественная оценки изучаемых полей по изменению электронно-оптических муаровых картин и геометрии экспериментов.

Показано, что чувствительность метода достаточна для исследования электромагнитных полей в малых объемах и местах их концентрации, где нарушается полевая симметрия. Установлено, что муаровые картины отображают топографию электрических и магнитных полей и могут служить их графо-аналитической оценкой.

Electro-Optical Moiré in the Study of Electric and Magnetic Fields

V. M. Ivanov, S. Fofana

Department "Electric Power Engineering", TSTU; ivanov.tstu@ru

Key words and phrases: electric field; electron beam; Lorentz force; magnetic field; moiré pattern; physical and mathematical modeling; visualization of field lines.

Abstract: Electro-optical method of the moiré pattern has been proposed to study parameters of electric and magnetic fields. Visualization of the electric field of the capacitor has been obtained on the display screen of the electronic microscope in a parallel beam of electrons. Magnetic fields in the direct and circular conductor observed in the scattered beam electrons. Methods of physical and mathematical modeling established qualitative and quantitative evaluation of the studied fields by the change of the electro-optical moiré patterns and the geometry in the experiments. It has been shown that the sensitivity of the method is sufficient for the study of electromagnetic fields in small volumes and in their areas of concentration, where the symmetry of the field is broken. It has been found that the moiré pattern shows the topography of electric and magnetic fields and can serve as their graphical- analytical evaluation.

References

1. Ivanov V.M., Lanovaya A.V., Pechagin E.A., Vinokurov E.B., Manushkin A.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 2B, pp. 574-577.
2. Ivanov V.M., Baryshev G.A., Baranov A.V., Pechagin E.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 633-637.
3. Lanovaya A.V., Ivanov V.M., Lozenkov A.A., Pluzhnikova T.N. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 2008, vol. 72, no. 9, pp. 1341-1343.
4. Ivanov V.M., Lanovaya A.V., Puchkov N.P., Baryshev G.A. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, Tambov, 2000, vol. 5, ussue 2-3, pp. 328-330.
5. Dorofeev A.L., Ershov R.E. *Fizicheskie osnovy elektromagnitnoi strukturoskopii* (Physical basis of electromagnetic structurescopy), Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение, 1985, 180 p.
6. Ryazanov G.A. *Elektromagnitnoe modelirovanie* (Electromagnetic simulation), Moscow: Nauka, 1969, 337 p.
7. Durelli A., Parks V. *Analiz deformatsii s ispol'zovaniem muara* (Deformation analysis using moire), Moscow: Mir, 1974, 356 p.
8. Kel'man V.M., Yavor S.Ya. *Elektronnaya optika* (Electron optics), Moscow-Leningrad: Izdatel'stvo AN SSSR, 1963, 362 p.
9. Jahnke E., Emde F. *Tablitsy funktsii* (Function table), Moscow: Mir, 1951, 512 p.
10. Montgomery D. *Poluchenie sil'nykh magnitnykh polei s pomoshch'yu solenoidov* (Solenoid magnet design), Moscow: Mir, 1971, 359 p.

Der Elektronenoptische Moire in der Forschung der elektrischen und magnetischen Felder

Zusammenfassung: Es ist die elektronenoptische Methode der geflammten Bilder für das Studium der Parameter der elektrischen und magnetischen Felder angeboten. Die Visualisierung des elektrischen Felder des Kondensators verwirklichte

sich am Bildschirm des elektronischen Mikroskop im parallelen Bündel der Elektronen. Die magnetischen Felder im geraden und kreisförmigen Schaffner wurden zerstreuten. Bündel der Elektronen beobachtet. Von den Methoden der physischen und mathematischen Modellierung sind die qualitativen und quantitativen Einschätzungen der studierten Felder nach der Veränderung der elektronenoptischen geflammten Bilder und der Geometrie der Experimente bestimmt. Es ist vorgeführt, dass die Sensibilität der Methode für die Forschung der elektromagnetischen Felder in den kleinen Umfängen und an den Stellen ihrer Konzentration ausreichend ist, wo die Feldsymmetrie verletzt wird. Es ist bestimmt, dass die geflammten Bilder der die Topographie der elektrischen und magnetischen Felder darstellen und können zu ihrer grafoanalytischen Einschätzung dienen.

Авторы: *Иванов Владимир Михайлович* – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика»; *Фофана Синду* – аспирант кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Фёдоров Виктор Александрович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая физика», ФГБОУ ВПО «Гамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина».
