

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА
ПРОТЯЖЕННЫХ НИТЕЙ

П. В. ЖУГАЛЕВ, В. А. ДАЛИМАЕВ

Научный руководитель П. Я. ЧУДАКОВСКИЙ, канд. физ.-мат. наук
БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

К актуальным задачам современной физики относятся дифракционные задачи, имеющие прикладное значение, например, при технологическом контроле линейных размеров текстильных объектов (прядельные волокна и нити), объектов оптоэлектроники (оптические световоды), при производстве тонких проводящих металлических нитей.

Целью исследования являлось определения диаметра протяженных непрозрачных нитей оптическим дифракционным способом. В качестве образца была выбрана металлическая нить. Следует отметить, что при соответствующей оценке, в строгой теории дифракции, основанной на системе электродинамических уравнений Максвелла, необходимо учитывать проводимость объекта, т. к. под воздействием электромагнитного излучения (света) на поверхности образца могут возникать токи, порождающие электромагнитные волны, существенно влияющие на дифракцию светового пучка. В теоретическом аспекте дифракционные задачи относятся к числу труднейших задач электродинамики. В классической электродинамике получено точное аналитическое решение лишь в случае дифракции плоской волны на бесконечном идеально проводящем цилиндре, которое в цилиндрической системе координат (r, φ) имеет вид [1]

$$E_{zs} = E_{z0} e^{i\beta r \cos \varphi} + \sum_{k=0}^{\infty} C_k H_k^{(2)}(\beta r) \cos(k\varphi),$$

где E_{zs} – общее поле; E_{z0} – амплитуда падающей плоской волны (направление колебаний совпадает с осью цилиндра); $C_0 = -E_{z0} \frac{J_0(\beta r_0)}{H_0^{(2)}(\beta r_0)}$,

$C_k = -2(i)^k E_{z0} \frac{J_k(\beta r_0)}{H_k^{(2)}(\beta r_0)}$ – амплитудные коэффициенты суммарного вторичного поля; $\beta^2 = \omega^2 \mu \varepsilon$; ω – циклическая частота; μ, ε – магнитная и диэлектрическая проницаемость сред; r_0 – радиус цилиндра. Амплитудные коэффициенты содержат J_0, J_k – функции Бесселя 1-го рода нулевого и k -го порядка, $H_k^{(2)}$ – функции Ханкеля 2-го рода порядка k . Из представленного решения видно, что даже в простейшем случае оно малоприспособно для восстановления геометрических размеров металлических нитей.

В случае физической оптики дифракционные эффекты, обусловленные проводимостью металла, не учитываются. Тем не менее, при условии, что световой пучок имеет не большие размеры, а нить является протяженной,

теория оптической дифракции вполне применима для оценки диаметра металлической нити. В классических оптических экспериментах поступают следующим образом. Нить освещают монохроматическим светом и на экране наблюдают дифракционную картину. Для наблюдения дифракционной картины использовалось лазерное излучение с длиной волны 632 нм и шириной пучка в 5 мм. Схема эксперимента и наблюдаемая дифракционная картина представлены на рис. 1.

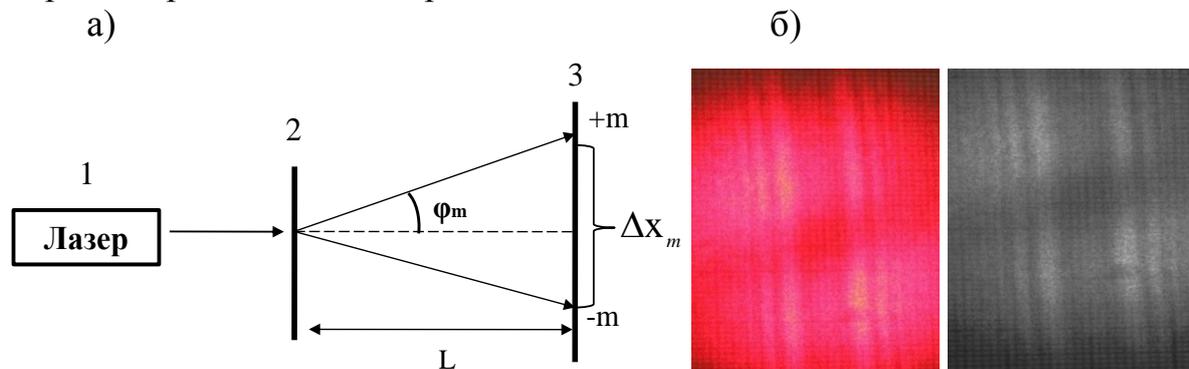


Рис. 1. Экспериментальная схема (а) и дифракционная картина, регистрируемая матрицей цифрового фотоаппарата (б): 1 – лазер; 2 – металлическая нить; 3 – экран

В дифракционной картине на рис. 1, б отчетливо видны два самых ярких максимума интенсивности, отстоящих на некотором расстоянии друг от друга. Между ними расположен ещё один максимум, но с гораздо меньшей интенсивностью, что является отличительной особенностью от других дифракционных картин, например картины от дифракционной решетки с прямоугольными щелями, или от широкого прямоугольного отверстия. Для оценки толщины нити в теории оптической дифракции нить рассматривают как узкое прямоугольное отверстие и полагают, что выполняется условие минимумов интенсивности в дифракционной картине

$$b \sin \varphi = m\lambda ,$$

где b – толщина нити; φ – угол дифракции; λ – длина волны; $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ – порядок (номер) минимума.

Записав это условие для двух минимумов разного порядка (m_2, m_1), и учтя малые значения углов дифракции (φ_2, φ_1), можно записать выражение

$$\frac{\lambda}{b} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta m} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{m_2 - m_1} .$$

При этом справедливо уравнение для угла дифракции m -го порядка

$$\varphi_m = \Delta X_m / 2L ,$$

где ΔX_m – расстояние между минимумами левого и правого m -го порядка; L – расстояние от нити до экрана (рис. 1).

Построив зависимость угла дифракции $\varphi_m(m)$, представленную на рис. 2, определили тангенс угла наклона данной зависимости $tg\alpha = \Delta\varphi/\Delta m$. Согласно рисунку значки «+» – экспериментальные значения углов дифракции, сплошная линия результат интерполяции. Толщина нити была оценена по формуле $b = \lambda/tg\alpha$ и составила $b = 0,177$ мм. Для сравнения, толщина этой же нити была найдена с помощью микроскопа и имела значение $0,18$ мм. Данный способ легко реализуется в лабораторных условиях. В условиях же промышленного изготовления нитей используют другой метод.

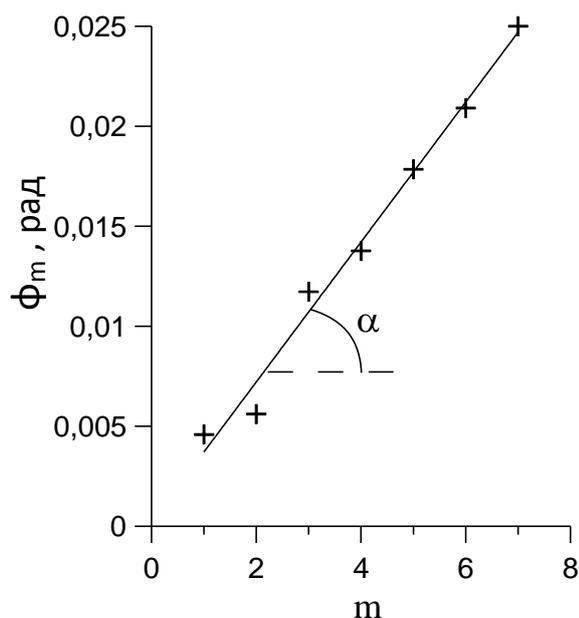


Рис. 2. Зависимость угла дифракции φ_m от порядка минимума m

Для этого в экспериментальной схеме на рис. 1, а экран 3 меняют на линейку фотоприемников, что позволяет оценить значения интенсивностей в экстремальных точках дифракционной картины. Дальнейшее восстановление толщины может быть получено из аналитического выражения [2]:

$$b = \frac{\Delta I \sqrt{5\lambda L}}{8S} \left(1 - \frac{5\lambda L}{4S^2} \right),$$

где L – расстояние от нити до линейки фотоприёмников; S – расстояние между главными максимумами в дифракционной картине; $\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ –

контраст дифракционной картины; I_{\max}, I_{\min} – максимальные и минимальные значения интенсивности в дифрак-

ционной картине; λ – длина волны. На данном этапе осуществляется проверка второго способа. Предполагается, что его использование позволит определить толщину колеблющейся металлической нити, оценить температурные флуктуации толщины нити, что важно при их технологическом производстве и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, Н. Н. Основы электродинамики: учеб пособие для вузов / Н. Н. Федоров. – М. : Высш. шк., 1980. – 399с.
2. Пат. 2310159 РФ. Способ измерения диаметра тонких протяженных нитей / Ю. В. Чугуй, 2007.