

ДИФРАКЦИЯ ФРАУНГОФЕРА НА ЩЕЛИ В ОДНОРОДНУЮ АНИЗОТРОПНУЮ СРЕДУ С ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛНОВЫХ ВЕКТОРОВ

А.А. ЛАЛАЯН^{1*}, О.С. ЕРИЦЯН²

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

²Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: alalayan@ysu.am

(Поступила в редакцию 28 октября 2022 г.)

Рассмотрена фраунгоферова дифракция электромагнитной волны на щели на непрозрачном экране, расположенном между вакуумом и анизотропной средой с открытой поверхностью волновых векторов (ПВВ). Получена формула дифракции в материальной среде, включающая случай дифракции в одноосную анизотропную среду, в отсутствие поглощения и исследована картина формирования дифракционных минимумов и максимумов.

1. Введение

Особенности дифракции в оптике как известно установлены достаточно давно [1–4], при этом отметим, что были исследованы в основном случаи, когда дифрагированное излучение проникает в вакуум. Однако, на наш взгляд, несомненный интерес представляют также и те случаи, когда дифрагированное излучение проникает в материальную среду, ввиду того, что среда, в которой распространяется дифрагированное излучение, несомненно должна оставлять свой отпечаток на процесс формирования дифракционной картины. Учет особенностей дифракции света в материальную среду весьма актуален в задачах создания новых микронных и наноразмерных структур с применением дифракционных оптических и рентгеновских методов, а также для дифракционного оптического анализа различных материалов, в том числе в современной наноскопии [5–9]. В наших предыдущих работах было рассмотрено явление дифракции из вакуума в материальную среду [10], и, в частности, в обычную анизотропную оптически двулучепреломляющую среду, когда формируется не одна, а две серии максимумов и минимумов [11].

Представляет интерес также случай дифракции на щели для случая проникновения излучения в анизотропную среду с открытой поверхностью волновых векторов (ПВВ). Возможность существования такой оптической среды, обладающей рядом неординарных свойств, впервые была теоретически предсказана и проанализирована в работе [12]. В дальнейшем, оптические свойства таких сред, в частности, аномально высокий коэффициент отражения, был выявлен

экспериментально для кристалла фторида магния [13]. Другое необычное свойство материала с открытой ПВВ – это возможность фокусировки светового излучения плоскопараллельной пластиной вместо стандартной линзы [14].

В настоящей работе рассматривается фраунгоферова дифракция плоской волны, падающей нормально на щель, за которой расположена анизотропная среда с открытой поверхностью волновых векторов, с оптической осью, перпендикулярной к плоскости щели.

2. Распространение излучения в среде с открытой ПВВ

Рассмотрим распространение плоской монохроматической волны

$$E = E e^{i(kr - \omega t)} \quad (1)$$

в среде, описываемой тензором диэлектрической проницаемости

$$\epsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad \mu_{ij} = \delta_{ij} \quad (2)$$

при $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} > 0$ и $\epsilon_{zz} < 0$. В данных условиях в описываемой анизотропной среде будут распространяться две волны – обыкновенная и необыкновенная. Дисперсионное уравнение для необыкновенной волны в рассматриваемом случае имеет вид:

$$\frac{k_z^2}{\epsilon_{xx}} - \frac{k_x^2}{|\epsilon_{zz}|} = \frac{\omega^2}{c^2}, \quad (3)$$

где ϵ_{xx} и ϵ_{zz} – компоненты диэлектрической проницаемости среды соответственно в перпендикулярном и параллельном направлениях к оптической оси. Уравнение (3) описывает гиперболу, представленную на рис.1.

На рис.1 кривой линией, представляющей из себя гиперболу, показано сечение ПВВ необыкновенной волны.

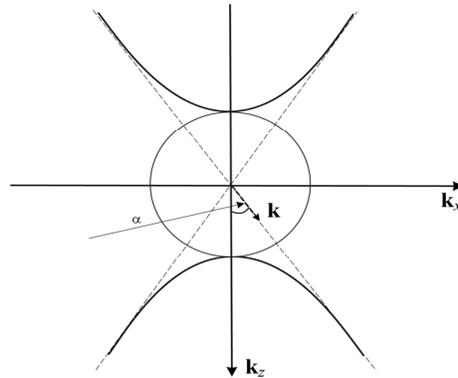


Рис.1. Схематичное представление среды с открытой ПВВ. Гиперболами представлено сечение поверхности волновых векторов необыкновенной волны с плоскостью, проходящей через ось z . Сферой представлено сечение поверхности волновых векторов обыкновенной волны с той же плоскостью.

Исходя из уравнения (3) для волнового вектора необыкновенной волны, получим выражение:

$$k^2 = \frac{\omega^2 / c^2}{\left(\frac{\cos^2 \alpha}{\epsilon_{xx}} - \frac{\sin^2 \alpha}{|\epsilon_{zz}|} \right)}. \quad (4)$$

Отметим, что согласно соотношению (4), данная волна может распространяться в интервале углов α , расположенных между касательными гипербол, и определяемом условием $0 \leq \alpha \leq \gamma$, где $\gamma = \arctan(|\epsilon_{zz}|/\epsilon_{xx})^{1/2}$. Вне этого интервала волновой вектор необыкновенной волны становится мнимой величиной, что означает затухание волны по мере распространения.

3. Фраунгоферова дифракция в непоглощающую анизотропную среду с открытой ПВВ

Рассмотрим случай плоской волны, падающей нормально на непрозрачный экран с щелью l , за которой расположена среда с открытой ПВВ. За щелью размещен экран 2 , на котором наблюдается дифракционная картина (см. рис.2) Прямая линия, соединяющая середину щели O с точкой наблюдения M отклонена на угол α от направления оптической оси z .

$$k = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{\epsilon_{xx}} - \frac{\sin^2 \alpha}{|\epsilon_{zz}|} \right)^{-1/2}. \quad (5)$$

Разность фаз между лучами, исходящими от краев щели в точку M будет равна $\delta\varphi = k_\alpha d \sin \alpha = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{\epsilon_{xx}} - \frac{\sin^2 \alpha}{|\epsilon_{zz}|} \right)^{-1/2} d \sin \alpha$, где k_α – модуль волнового вектора, составляющего угол α с нормалью к плоскости щели.

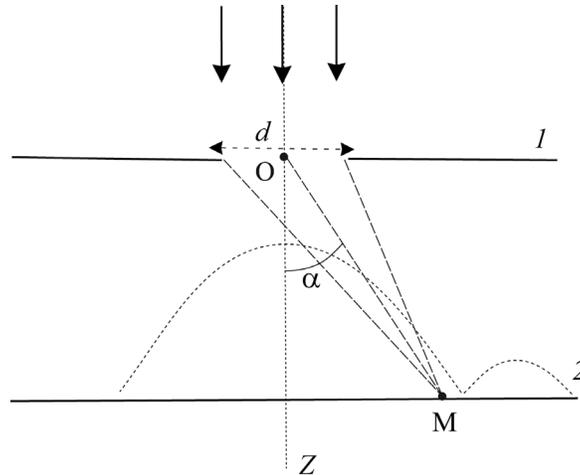


Рис.2. Схематичное представление дифракции Фраунгофера в анизотропную среду.

Так как каждый пучок, соответствующий минимуму, формируется суммированием полей элементарных пучков, которые все имеют одно и тоже направление, задаваемое углом α в фундаментальной формуле [4]

$$d \sin \alpha = m\lambda, \quad (6)$$

то условие минимумов для необыкновенной волн в анизотропной среде без поглощения на основании выражения (6) может быть записано в том же виде, однако любому направлению θ будет соответствовать своя длина волны $\lambda(\alpha)$:

$$d \sin \alpha = m\lambda(\alpha). \quad (7)$$

Приняв, как обычно, центральный дифракционный максимум нулевым, для m -ого минимума из выражений (5) и (7) получим

$$\frac{\omega d \sin \alpha}{c} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{\epsilon_{xx}} - \frac{\sin^2 \alpha}{|\epsilon_{zz}|} \right)^{-1/2} = 2\pi m. \quad (8)$$

Таким образом, при $\frac{\cos^2 \alpha}{\epsilon_{xx}} - \frac{\sin^2 \alpha}{|\epsilon_{zz}|} = 0$ величина m стремится к бесконечности, то есть при углах, близких к асимптотам гипербол (см. рис. 1), в которых волновой вектор стремится к бесконечности, интервал между дифракционными минимумами будет стремиться к нулю. Отметим, что обыкновенная волна ведет себя стандартно и формирует отдельную независимую картину дифракционных максимумов.

4. Заключение

Рассмотрена дифракция света на щели в анизотропной среде с открытой поверхностью волновых векторов ПВВ. В работе обобщена известная формула дифракции Фраунгофера в вакууме на случай материальной среды с открытой ПВВ, без учета поглощения. Исследована картина формирования дифракционных минимумов и максимумов, которая зависит от оптических характеристик этой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M. Born, E. Wolf.** Principles of Optics. 4-th.ed., New York, Pergamon Press, 1968.
2. **J.M. Cowley.** Diffraction Physics. Amsterdam, North-Holland Pub. Co, 1975.
3. **Р.Б. Ваганов, Б.З. Кацелбаум.** Основы теории дифракции. Москва, Наука, 1982.
4. **Д.В. Сивухин.** Общий курс физики. Оптика, т. IV, Москва, Наука, 1980.
5. **Y.E. Geints, O.V. Minin, I.V. Minin.** Annalen der Physik, **531**, 1900033 (2019).
6. **L. Yang, J. Wei, Z. Ma, P. Song, J. Ma, Y. Zhao, Z. Huang, M. Zhang, F. Yang, X. Wang.** Nanomaterials, **9**, 1789 (2019).
7. **D. Xu, K.P. Chen, K. Ohlinger, Y. Lin.** Nanotechnology, **22**, 035303 (2011).
8. **R.D. Johnson, P.G. Radaelli.** Annual Review of Material Research, **44**, 269 (2014).
9. **S. Mourdikoudis, R.M. Pallares, N.T.K. Thanh.** Nanoscale, **10**, 12871 (2018).
10. **A.R. Mkrtychyan, A.A. Lalayan, H.S. Yeritsyan, A.L. Margaryan, Sh.K. Yeritsyan, Zh.B. Khachatryan.** J. Contemp. Phys., **55**, 314 (2020).
11. **H.S. Eritsyan, A.A. Lalayan, A.L. Margaryan, A.G. Mkrtychyan, Zh.B. Khachatryan.**

- J. Contemp. Phys., **57**, 49 (2022).
12. **О.С. Ерицян**. Кристаллография, **11**, 461 (1978).
13. **O.S. Eritsyan, A.A. Lalayan, O.M. Arakelyan, A.A. Papoyan, R.B. Kostanyan**. J. Contemp. Phys., **41**, 14 (2006).
14. **O.S. Eritsyan, A.A. Lalayan, O.M. Arakelyan, A.A. Papoyan, R.B. Kostanyan**. Crystallography Reports, **55**, 938 (2010).

ՖՐԱՈՒԻՆԶՈՖԵՐԻ ԴԻՖՐԱԿՑԻԱՆ ՃԵՂՔԻՑ ԴԵՊԻ ԲԱՑ ԱԼԻՔԱՅԻՆ
ՎԵԿՏՈՐՆԵՐԻ ՄԱԿԵՐԵՍՈՎ ՀԱՄԱՍԵՌ ԱՆԻՉՈՏՐՈՊ ՄԻՋԱՎԱՅՐ

Ա.Ա. ԼԱԼԱՅԱՆ, Հ.Ս. ԵՐԻՑՅԱՆ

Դիտարկված է էլեկտրամագնիսական ալիքի Ֆրաունհոֆերյան դիֆրակցիան ճեղքից՝ անթափանց էկրանի վրա, որը գտնվում է վակուումի և բաց ալիքային վեկտորների մակերեսով (ՄՎՄ) անիզոտրոպ միջավայրի միջև: Ստացված է նյութական միջավայրում դիֆրակցիայի բանաձևը, որը ներառում է միառանցք միջավայրի դեպքը՝ երբ կլանումը բացակայում է և ուսումնասիրված է դիֆրակցիոն մինիմումների և մաքսիմումների ձևավորման օրինաչափությունը:

FRAUNHOFER DIFFRACTION BY SLIT INTO A HOMOGENEOUS
ANISOTROPIC MEDIUM WITH AN OPEN SURFACE OF WAVE VECTORS

A.A. LALAYAN, O.S. ERITSYAN

Fraunhofer diffraction of an electromagnetic wave by a slit on an opaque screen located between vacuum and an anisotropic medium with an open wave vector surface (WVS) is considered. A formula for diffraction in a material medium is obtained, including the case of diffraction into a uniaxial anisotropic medium in the absence of absorption, and the formation of diffraction minima and maxima is studied.