Известия НАН Армении, Физика, т.55, №4, с.487–491 (2020)

УДК 548.0

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ КРУГЛОГО ОТВЕРСТИЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО МЕЖДУ ВАКУУМОМ И ВЕЩЕСТВОМ С ОТЛИЧНЫМ ОТ ЕДИНИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

А.Р. МКРТЧЯН[1], А.А. ЛАЛАЯН[2*], О.С. ЕРИЦЯН[1,2],
А.Л. МАРГАРЯН[1], Ш.К. ЕРИЦЯН[2], Ж.Б. ХАЧАТРЯН[1,2]

[1]Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения
[2]Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

[*]e-mail: alalayan@ysu.am

(Поступила в редакцию 25 декабря 2019 г.)

Исследована дифракция электромагнитной волны от круглого отверстия на непрозрачном экране в ситуации, когда по разные стороны экрана не вакуум, как обычно рассматривается, а с одной стороны расположена преломляющая среда и с другой – вакуум. Выявлены особенности дифракции, обусловленные тем, что среда, в которую проникает волна из вакуума, обладает показателем преломления, отличным от единицы. Рассмотрен также случай дифракции в анизотропной среде, обладающей свойством двулучепреломления.

1. Введение

Дифракция электромагнитной волны на бесконечном экране с щелью или круглым отверстием, как известно, рассматривается в оптике в случае, когда перед экраном, а также после экрана расположен вакуум [1,2]. Что касается дифракции в материальных средах, то в таком случае это явление обычно рассматривается в ситуациях, когда она обусловлена не ограничением фронта волны (дифракция от краев щелей или отверстий), а, в основном, периодичностью неоднородностей самой среды, в которой распространяется волна [3–5].

В работе [6] рассмотрена Фраунгоферова дифракция плоской волны на бесконечной щели, когда по обе стороны экрана со щелью – не вакуум, а среды с разными значениями показателя преломления (одной из которых может быть и вакуум). Показано, в частности, что в такой ситуации имеет место невзаимность прохождения электромагнитной волны через щель. Учет данного явления имеет важное практическое значение при создании оптических систем, у которых имеется неэквивалентность взаимно противоположных направлений прохождения электромагнитных волн [7–8].

В настоящей работе рассматривается дифракция на круглом отверстии в материальной среде, при этом рассмотрены случаи, когда вакуум граничит через отверстие либо с изотропной, либо анизотропной однородной средой.

2. Расчет интенсивности дифрагированной электромагнитной волны

В основу расчета влияния показателя преломления среды, куда проникает дифрагированное излучение, на картину дифракции на круглом отверстии положена известная формула [9]

$$dI = I_0 \frac{J_1^2(ak\theta)}{\theta^2} d\theta \,, \qquad (1)$$

где I_0 – интенсивность излучения волны, падающей на круглое отверстие радиуса a, θ – угол отклонения дифрагированной волны от направления нормали к экрану (см. Рис.1), J_1^2 – функция Бесселя первого порядка, – телесный угол, в котором распространяются лучи в интервале направлений (θ, $\theta + d\theta$).

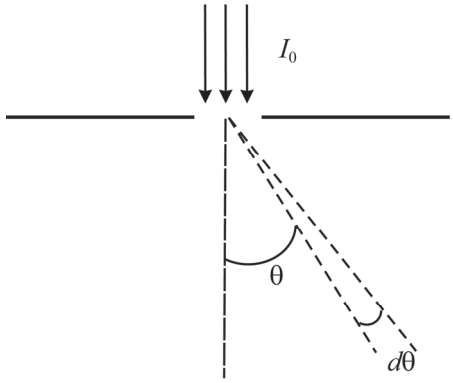

Рис.1. Схема дифракции электромагнитной волны на круглом отверстии.

При переходе от случая, когда за экраном вакуум, к случаю материальной среды, в формуле (1) меняется модуль волнового вектора k, и соответственно величина показателя преломления n.

Отметим, что в выражении (1) интеграл аналитически не вычисляется. На Рис.2 представлена зависимость I от a, приведенной в величинах длины волны λ, полученная численными методами, которая демонстрирует, что с ростом радиуса отверстия интенсивность волны за щелью растет, при этом форма этой кривой зависит от величины показателя преломления n.

Из вида выражения (1) следует ожидать также изменения углового распределения полной интенсивности дифрагированной волны при изменении величины показателя преломления.

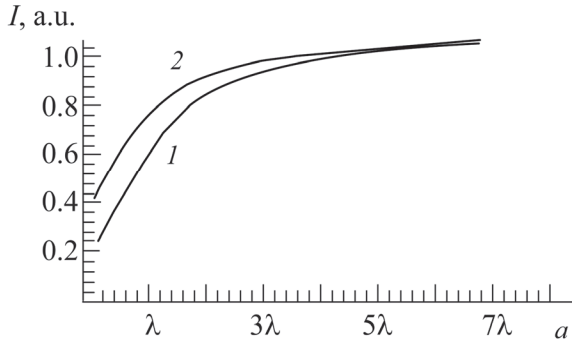

Рис.2. Зависимость интенсивности дифрагированной волны *I* от радиуса круглого отверстия *a*. Кривая *1* соответствует случаю $n = 1$, кривая *2* – случаю $n = 2$.

На рис.3 представлены расчетные зависимости углового распределения интенсивности дифрагированной волны при различных значениях величины показателя преломления в случае, когда за экраном – изотропная среда. Как видно из рисунка наблюдается заметное изменение углового распределения интенсивности дифрагированной волны при изменении показателя преломления.

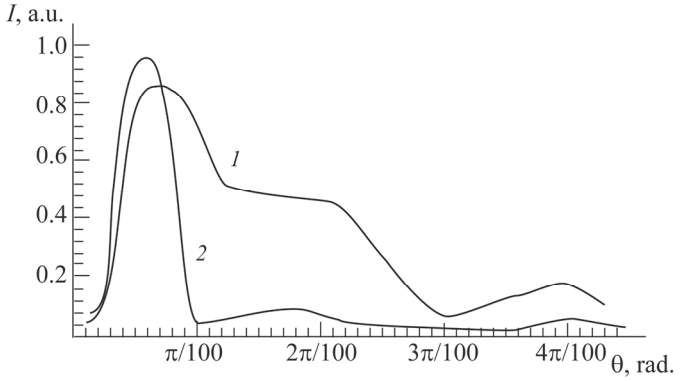

Рис.3. Угловое распределение интенсивности дифрагированной волны. Кривая *1* соответствует случаю $n = 1$, кривая *2* – случаю $n = 2$.

Исходя из полученного результата можно, отметить, что в случае размещения демонстрационного экрана за щелью, можно будет наблюдать хорошо известную дифракционную картину, состоящую из набора дифракционных колец, однако в отличие стандартной ситуации воздуха (вакуума) с $n = 1$ по обе стороны от отверстия, в рассматриваемом случае дистанция между интерференционными кольцами и распределение интенсивности между ними будут уже зависеть от значения показателя преломления среды.

Как видно из рисунка, наблюдается заметное изменение углового распределения интенсивности дифрагированной волны при изменении показателя преломления.

Вызывает также несомненный интерес случай дифракции, когда за экраном с апертурой размещена одноосная анизотропная среда с оптической осью, параллельной плоскости экрана. В этом случае при малых углах дифракции формулу (1) необходимо записать в отдельности для обыкновенной и необыкновенной волн:

$$dI_{\text{o}} = I_{0\text{o}} \frac{J_1^2(a\omega c^{-1} n_{\text{o}}\theta)}{\theta^2} d\theta,$$
$$dI_{\text{e}} = I_{0\text{e}} \frac{J_1^2(a\omega c^{-1} n_e\theta)}{\theta^2} d\theta, \qquad (2)$$

ограничиваясь случаем, когда изменением показателя преломления необыкновенной волны при отклонении дифрагированного необыкновенного луча от перпендикулярности к оптической оси можно пренебречь.

Таким образом, в данном случае, при размещении демонстрационного экрана за щелью, можно будет наблюдать сложную дифракционную картину, состоящую из двух наборов дифракционных колец, сформированных отдельно обыкновенной и необыкновенной волнами. Как следствие, детальное фотометрирование полученной дифракционной картины дает возможность анализа оптической анизотропии различных сред с использованием простой оптической схемы. Отметим, что исследование и анализ анизотропных сред с применением стандартных рефрактометров является достаточно сложной технической задачей.

3. Заключение

В настоящей работе исследовано явление дифракции на круглом отверстии в экране, расположенной между двумя средами, отличающимися своими показателями преломления. Проведен численный расчет интенсивности дифрагированной волны в указанной оптической системе. Исследованы особенности дифракционной картины в зависимости от показателя преломления среды, в том числе проанализирован случай двулучепреломляющей среды. Показано, что в зависимости от показателя преломления среды, куда проникает дифрагированное излучение, дифракционная картина меняется, а в присутствии двулучепреломления получаются два семейства дифрагированных колец.

Рассмотренное в настоящей работе явление может быть использовано для разработки новых оптических систем и элементов для исследования и анализа как изотропных так и анизотропныхоптических материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках проекта № 18T-1C395.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M. Born, E. Wolf,** Principles of Optics, 4th ed., Pergamon Press, 1968.
2. **R. Vaganov, B. Katzenelenbaum**, Osnovy teorii difraktsii (Bases of the diffraction theory), Moscow: Nauka, 1982.
3. **B.C. Kress, P. Meyrueis,** Applied Digital Optics: From Micro-Optics to Nanophotonics, John Wiley & Sons, 2009.
4. **V.A. Belyakov,** Diffraction Optics of complex-Structure Periodic Media, New York: Springer, 1992.
5. **О.С. Ерицян.** Изв. НАН Армении, Физика, **37**, 244 (2002).
6. **А.А. Лалаян, О.С. Ерицян, О.М. Аракелян, Ш.К. Ерицян.** Изв. НАН Армении, Физика, **53**, 50 (2018).
7. **И.А. Андронова, Г.Б. Малыкин.** УФН, **172**(8), 849 (2002).
8. **С.И. Назаров.** Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Электронный журнал, № 9, 479 (2013).
9. **Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.** Теория поля. Наука, Физматгиз., 1967.

ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻՔԻ ԴԻՖՐԱԿՑԻԱՆ ՎԱԿՈՒՈՒՄԻ ԵՎ ՄԵԿԻՑ ՏԱՐԲԵՐ ԲԵԿՄԱՆ ՑՈՒՑԻՉՈՎ ՆՅՈՒԹԻ ՍԱՀՄԱՆԻՆ ՏԵՂԱԴՐՎԱԾ ԷԿՐԱՆԻ ԿԼՈՐ ԱՆՑՔԻՑ

Ա.Ռ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ա.Ա. ԼԱԼԱԲԱՆ, Հ.Ս. ԵՐԻՑՅԱՆ,
Ա.Լ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Շ.Կ. ԵՐԻՑՅԱՆ, Ժ.Բ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

Հետազոտվել է էլեկտրամագնիսական ալիքի դիֆրակցիան անթափանց էկրանի կլոր անցքից, երբ էկրանի երկու կողմերում ոչ թե վակուում է, ինչպես սովորաբար, այլ մի կողմում բեկող միջավայր է, մյուս կողմում՝ վակուում: Բացահայտված են դիֆրակցիայի որոշ առանձնահատկություններ, որոնք պայմանավորված են նրանով, որ այն միջավայրն, ուր ալիքը թափանցում է վակուումից, մեկից տարբեր բեկման ցուցիչ ունի: Քննարկված է նաև այն դեպքը, երբ միջավայրը օժտված է երկբեկման հատկությամբ:

DIFFRACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES FROM A ROUND HOLE LOCATED BETWEEN VACUUM AND MATTER WITH A REFRACTION INDEXES DIFFERENT FROM ONE

A.R. MKRTCHYAN, A.A. LALAYAN, H.S. YERICYAN,
A.L. MARGARYAN, Sh.K. YERICYAN, Zh.B. KHACHATRYAN

The diffraction of an electromagnetic wave from a round hole on an opaque screen is studied in a situation where there is no vacuum on the opposite sides of the screen, as is usually considered, but on one side there is a refractive medium and on the other a vacuum. The diffraction peculiarities due to the fact that the medium into which the wave penetrates from the vacuum have a refractive index different from one are revealed. The case of diffraction in an anisotropic medium with the property of birefringence is also considered.