

УДК 53.534.2

Георгій БЛІННІКОВ,
кандидат технічних наук, доцент
Національна академія Державної прикордонної служби України
імені Б. Хмельницького, м. Хмельницький

Вікторія ШЕВЧУК,
кандидат педагогічних наук, доцент
Національна академія Державної прикордонної служби України
імені Б. Хмельницького, м. Хмельницький

ВИКОРИСТАННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ЯВИЩ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ОПТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

У роботі досліджено збільшення чутливості оптичних приладів шляхом використання дифракційних явищ, зокрема методу зон Френеля. Дослідження методу зон Френеля показало, що амплітуда коливань, яка створюється у точці спостереження сферичною хвильовою поверхнею, дорівнює половині амплітуди коливань, що створюється однією центральною зоною. Здійснено аналіз методу графічного складання амплітуд, який показав, що амплітуда світла, яка створюється половиною першої зони Френеля, удвічі перевищує амплітуду, що створюється усією хвильовою поверхнею.

Ключові слова: дифракційні явища, зона Френеля, зонна пластинка, прилад нічного бачення, амплітуда коливань, векторна діаграма.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Досить вагомим є практичне значення оптики та її вплив на інші галузі знань. Винахід

© Блінніков Г., Шевчук В.

телескопа і спектроскопа відкрив перед людиною найдивовижніший і найбагатший світ явищ, які відбуваються в неосяжному Всесвіті. Винахід мікроскопа зробив революцію у біології. Фотографія допомогла і продовжує допомагати мало не усім галузям науки. Одним із найважливіших елементів оптичної наукової апаратури є лінза. Без неї не було б мікроскопа, телескопа, спектроскопа, фотоапарата, кіно, телебачення, не було б й окулярів. Тому значна кількість людей була б позбавлена можливості читати і виконувати різноманітні зорові роботи.

Область явищ, які вивчаються фізичною оптикою, досить велика. Оптичні явища найтіснішим чином пов'язані з явищами, які розглядаються в інших розділах фізики. Оптичні методи досліджень належать до найбільш точних. Тому не дивно, що оптиці впродовж тривалого часу належала провідна роль у багатьох фундаментальних дослідженнях і розвитку основних фізичних переконань. Зауважимо, що обидві основні фізичні теорії минулого століття – теорія відносності і теорія квантів – зародилися і значною мірою розвинулися на ґрунті оптичних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опираються автори. У працях [1–3] відзначено, що одним із перспективних напрямів розробки оптико-електронного обладнання є розробка електронно-оптичних пристроїв. Їх розвиток і впровадження у різні сфери людської діяльності обумовлений рядом цінних властивостей і особливостей, які притаманні сучасним оптоелектронним приладам.

За допомогою електронно-оптичних приладів можна забезпечити багатократне (у сотні тисяч разів) посилення яскравості зображення, створюючи безпосередню можливість спостереження і дослідження об'єктів в умовах низької освітленості і в майже суцільній темряві. Такі прилади дозволяють досягати спектрального перетворення енергії випромінювання однієї ділянки оптичного спектра в іншу. Подібна властивість сприяє проникненню не лише у світ ультрафіолетового і інфрачервоного діапазонів спектра, але дозволяє зрозуміти нові явища природи, розширити наявні уявлення.

Дуже широкий діапазон використання електронно-оптичних пелетворювачів (ЕОП) і підсилювачів світла. У галузі фізики і спектроскопії плазми практично усі дослідження іскрових розрядів здійснюються за допомогою ЕОП. У біологічних дослідженнях ЕОП дозволили істотно зменшити дозу шкідливого рентгенівського опромінення. Такий же ефект отриманий у галузі рентгенотехніки під час медичної діагностики. У квантовій оптиці завдяки ЕОП вдалося детально досліджувати явище лазерного пробою. В астрономії ЕОП дозволили сфотографувати спектри далеких зірок, газових туманностей. У фототехніці при реєстрації зображення на фотоплівці вдалося скоротити час експозиції у тисячі разів. Електронно-оптичні прилади на основі ЕОП застосовуються і для спостереження за несприятливих умов бачення, наприклад, під час навігації суден уночі.

Незважаючи на широкий спектр завдань, які вирішуються за допомогою ЕОП, одна з основних функцій приладів електронно-оптичної техніки пов'язана безпосередньо із спостереженням об'єктів при малих рівнях оптичного сигналу у тій або іншій ділянці оптичного спектра. Тому такі електронно-оптичні прилади у вітчизняній практиці дістали специфічну назву – прилади нічного бачення. Робота приладу нічного бачення пов'язана не лише з параметрами ЕОП та його оптичних елементів, але й з параметрами і характеристиками ока спостерігача. Око спостерігача, який отримує інформацію, слід розглядати як кінцевий елемент у загальній системі “об'єкт – прилад спостереження – око”.

Метою статті є дослідження збільшення чутливості оптичних приладів шляхом використанням дифракційних явищ, зокрема методу зон Френеля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дифракція є одним із найважливіших явищ оптики. Урахування дифракційних явищ важливе під час проектування різних оптичних приладів, а також при поширенні радіохвиль, зокрема при радіолокації.

Дифракцією називаються явища, що спостерігаються при поширенні світла у середовищі з різкими неоднорідностями: щілини, отвори тощо, які пов'язані з відхиленнями від законів геометричної оптики [4–6].

Дифракція приводить до огинання світловими хвилями різноманітних перешкод і проникнення в область геометричної тіні. Зауважимо, що між інтерференцією і дифракцією немає суттєвої фізичної різниці. Зміст обох явищ міститься у перерозподілі світлового потоку в результаті суперпозиції хвиль. Для спостереження дифракції світлових хвиль необхідно створити спеціальні умови. Це обумовлено тим, що чіткість дифракційної картини суттєво залежать від співвідношення розмірів перешкод і довжини хвиль. У випадку, коли довжина хвиль наближена до розмірів перешкоди, дифракція виражена сильно. Якщо довжина хвиль значно менша за розміри перешкоди, дифракція виражена слабо. Але, крім цього, масштаби дифракції залежать і від відстані від перешкоди до точки спостереження. Для кількісної оцінки дифракції вводиться хвильовий параметр

$$\rho = \frac{\sqrt{r\lambda}}{D}, \quad (1)$$

де D – розмір перешкоди; r – відстань від перешкоди до точки спостереження; λ – довжина хвилі. При $\rho \ll 1$ дифракція майже не спостерігається, тому застосовуються закони геометричної оптики. При $\rho \gg 1$ обов'язково присутні дифракційні ефекти. Явище дифракції хвиль можна пояснити за допомогою принципу Гюйгенса: кожна точка, до якої доходить світлове збудження в певний момент часу t , є, у свою чергу, центром вторинних сферичних хвиль. Поверхня, яка огинає ці вторинні хвилі, вказує на положення нового хвильового фронту в момент часу $t + \Delta t$.

Однак, принцип Гюйгенса не дає ніякої інформації про амплітуду, а отже, про інтенсивність хвиль, що поширюються у різних напрямках. Цей недолік був усунений Френелем, який доповнив принцип Гюйгенса уявленням про інтерференцію вторинних хвиль. Удосконалений таким чином, принцип Гюйгенса носить назву принципу Гюйгенса – Френеля. За допомогою цього принципу, враховуючи амплітуду і фазу вторинних хвиль, можна знайти амплітуду результуючої хвилі в будь-якій точці простору.

Аналітичний вираз принципу Гюйгенса – Френеля має такий вигляд:

$$E = \int_S dE_i = \int_S k(\alpha) \cdot E_0 \cdot \cos(\omega t - kr) dS. \quad (2)$$

Обрахування за формулою (2) являє собою у загальному випадку надзвичайно складну задачу. Однак, як показав Френель, у випадках, що відрізняються симетрією хвильового фронту, інтегрування може бути замінено простим алгебраїчним додаванням. Він запропонував розбити хвильові поверхні не на елементарні ділянки, а кільцеві зони, в яких вектори напруженості електричного поля однієї зони спрямовані однаково, однак у сусідніх зонах напрямки векторів протилежний. Цей метод, коли для знаходження результуючого коливання в точці спостереження використовується алгебраїчне або геометричне додавання амплітуд коливань, називається методом зон Френеля.

Досліджуючи цей метод, з урахуванням принципу Гюйгенса-Френеля можна отримати такі результати:

площі зон Френеля приблизно однакові;

амплітуди коливань, що збуджуються у певній точці M зонами Френеля, утворюють монотонно спадаючу послідовність:

$$E_1 \succ E_2 \succ E_3 \succ \dots \succ E_{m-1} \succ E_m \succ E_{m+1} \dots \quad (3)$$

Фази коливань, які збуджуються сусідніми зонами, відрізняються на π . Тому амплітуда E_p результуючого коливання у точці M може бути знайдена алгебраїчно:

$$E_p = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots \quad (4)$$

У цьому виразі всі амплітуди від непарних зон входять зі знаком "+", а від парних – зі знаком "-". Напишемо цей вираз в іншому вигляді:

$$E_p = \frac{E_1}{2} + \left(\frac{E_1}{2} - E_2 + \frac{E_3}{2} \right) + \left(\frac{E_3}{2} - E_4 + \frac{E_5}{2} \right) + \dots \quad (5)$$

Унаслідок монотонного зменшення E_m можна наближено вважати таким:

$$E_m = \frac{E_{m-1} + E_{m+1}}{2}. \quad (6)$$

За цією умови у виразі (5) усі члени, які знаходяться в дужках, будуть дорівнювати нулю і цей вираз набуде такого вигляду:

$$E_p = \frac{E_1}{2}. \quad (7)$$

Отже, результуюча амплітуда E_p , що створюється у деякій точці спостереження, сферичною хвильовою поверхнею дорівнює половині амплітуди, яка створюється тільки однією центральною зоною. Інакше кажучи, дія всієї хвильової поверхні еквівалентна половині дії центральної зони. Для решти зон вона компенсується за рахунок інтерференції вторинних хвиль. Результат інтерференції вторинних хвиль можна отримати графічним методом [5, 6]. Якщо на шляху хвилі поставити непрозорий екран з отвором, який залишає відкритою тільки центральну зону Френеля, амплітуда в точці спостереження буде дорівнювати E , тобто у два рази перевищить амплітуду, що визначається за формулою (7). Відповідно інтенсивність світла в точці спостереження буде у цьому випадку в чотири рази більше, ніж за відсутності перешкод між точками збудження і спостереження. Тепер розв'яжемо завдання про поширення світла від джерела збудження до точки спостереження методом графічного складання амплітуд. Розіб'ємо хвильову поверхню на рівні за площею кільцеві зони, аналогічні зонам Френеля, але набагато менші завширшки.

Коливання, які створюються в точці спостереження кожною такою зоною, можна зображувати у вигляді вектора, довжина якого дорівнює амплітуді коливання. Кут, що утворюється вектором амплітуди з напрямом, прийнятим за початок відліку, дає початкову фазу коливання. Коливання, що створюються в точці спостереження будь-якої з таких зон, мають приблизно таку ж амплітуду, як і коливання, що створюються попередньою зоною, але відставатимуть від нього по фазі на практично однакову для усіх сусідніх зон величину. Отже, векторна діаграма, яка отримується при складанні коливань, що збуджуються окремими зонами, має вигляд, показаний на рис. 1.

Якби величина амплітуди при переході від зони до зони залишалася чітко сталою, кінець останнього із зображених на рис. 2 векторів збігся б з початком першого вектора. Насправді величина амплітуди, хоча і дуже повільно, але убуває, внаслідок чого вектори утворюють не

замкнуту фігуру, а ламану спіралеподібну лінію. Якщо ширину кільцевих зон спрямувати до нуля (кількість їх при цьому необмежено зростатиме), то векторна діаграма набуде вигляду спіралі, яка закручується до точки С (рис. 2).



Рис. 1. Теоретична векторна діаграма поширення світла

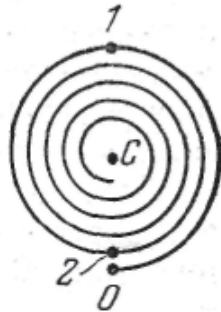


Рис. 2. Дійсна векторна діаграма поширення світла

Фази коливання в точках 0 і 1 відрізняються на π (нескінченно малі вектори, що утворюють спіраль, спрямовані у цих точках в протилежні сторони). Отже, ділянка спіралі 0-1 відповідає першій зоні Френеля. Вектор, проведений з точки 0 у точку 1 (рис. 3, а), зображує коливання, що збуджується в точці С цією зоною. Аналогічно, вектор, проведений з точки 1 у точку 2 (рис. 3, б), зображує коливання, які збуджуються другою зоною Френеля. Відповідно до того, що коливання від першої і другої зон знаходяться в протифазі, вектори 01 і 12 спрямовані у протилежні сторони. Коливання, які збуджуються в точці С усією хвильовою поверхнею, зображується вектором ОС (див. рис. 3, в). З рис. 3, б видно, що амплітуда у цьому випадку дорівнює половині амплітуди,

яка створюється в точці С першою зоною. Цей результат ми отримали раніше алгебраїчно (див. формулу (7)).

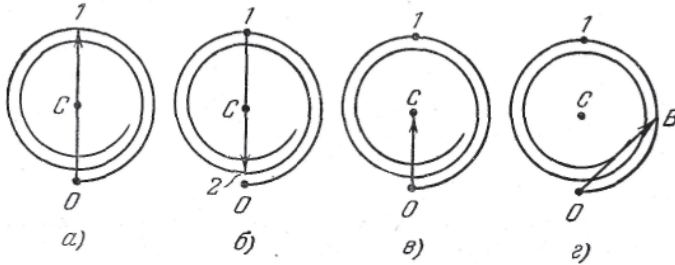


Рис. 3. Діаграма еквівалентності першої зони Френеля

Зауважимо, що коливання, які збуджуються внутрішньою половиною першої зони Френеля, зображаються вектором OB (див. рис. 3, г). Таким чином, половина дії першої зони Френеля нееквівалентна дії половини зони. Вектор OB у $\sqrt{2}$ рази більше за вектор OC . Тому інтенсивність світла, яка створюється половиною першої зони Френеля, у два рази перевищує інтенсивність, що створюється всією хвильовою поверхнею. Коливання від парних і непарних зон Френеля знаходяться у протифазі і, отже, взаємно послаблюють один одного. Якщо поставити на шляху світлової хвилі пластинку, яка перекривала б усі парні або усі непарні зони, то амплітуда коливання в точці С різко зросте. Така пластинка називається зонною. На рис. 4 зображена зонна пластинка, яка перекриває парні зони.

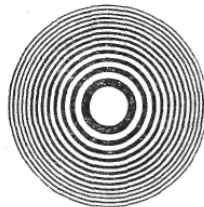


Рис. 4. Зонна пластинка

Зонна пластинка у m^2 разів збільшує інтенсивність світла в точці С, діючи подібно до збиральної лінзи.

Експериментальні дослідження. Відомо [4, 5], що площа m -ї зони Френеля дорівнює:

$$\Delta S_m = S_m - S_{m-1} = \frac{\pi RL}{R+L} \lambda. \quad (8)$$

Знайдемо радіус зон Френеля, використовуючи вираз (8):

$$\Delta S_m = S_m - S_{m-1} = \frac{\pi RL}{R+L} \lambda \Rightarrow r_m = \sqrt{\frac{RL}{R+L} \lambda m}. \quad (9)$$

Якщо у виразі (9) взяти $R=L=1\text{ м}$ і $\lambda=5 \cdot 10^{-7}\text{ м}$, то для радіуса першої (центральної) зони одержимо значення $r_1 = 0,5\text{ мм}$.

Знайдемо збільшення інших радіусів зон Френеля:

$$S_m = mS_1 = \pi r_m^2 \Rightarrow r_m = \sqrt{\frac{m\pi r_1^2}{\pi}} = r_1 \sqrt{m}. \quad (10)$$

Радіуси інших зон зростають як \sqrt{m} .

З аналізу останніх досліджень і публікацій [7-9] для підвищення інтенсивності світла використовують прилади нічного бачення (ПНБ). Принцип дії приладу нічного бачення пояснюється на рис. 5.

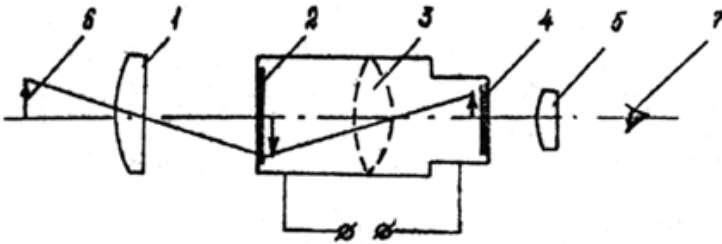


Рис. 5. Принципова схема приладу нічного бачення [2]

Прилад складається з трьох оптичних вузлів: об'єктива, окуляра і ЕОП. За допомогою об'єктива 1 на фотокатоді 2 електронно-оптичні перетворювачі створюють оптичне зображення об'єкта 6. Під впливом світлового випромінювання на фотокатоді виникає емісія електронів, число яких у кожній точці фотокатада пропорційне опроміненості. Відбувається первинне перетворення світлової енергії на електричну. Прискорювальним електричним полем електрони розганяються

і набувають енергію, достатню для виникнення світіння матеріалу, з якого виготовлений екран. У момент виходу з фотокатода електрони спрямовані рівномірно на всі боки, але електронно-оптична фокуруюча система 3, яка передбачена в ЕОП, стягує їх у вузький пучок і формує на люмінесцентному екрані 4 зображення фотокатода. У площині екрана відбувається перетворення електричної енергії на оптичну за допомогою люмінесцируючої речовини, яка світиться видимим світлом. З екрана зображення за допомогою лупи 5 сприймається оком людини 7 або фотоприймальним пристроєм.

Ми пропонуємо збільшити чутливість приладу використанням зонної плівки (пластинки), яка може бути використана (наклеєна, напилена, витравлена на поверхні об'єктива 1. При цьому можна обирати певний діапазон довжин хвиль. Використовуючи вирази (9, 10) та зробивши їх програмування для друку, ми виготовили зонні пластинки для зеленого світла ($\lambda=0,5$ мкм і $\lambda=0,55$ мкм) з кількістю зон Френеля ($m=20$ і $m=100$) відповідно. Результати наведені на рис. 6 і 7.

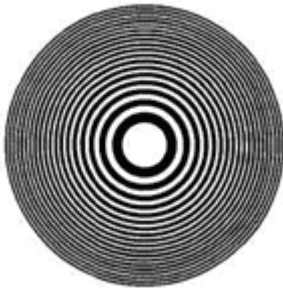


Рис. 6. Зонна пластинка для зеленого світла ($\lambda=0,5$ мкм) з кількістю зон Френеля ($m=20$)



Рис. 7. Зонна пластинка для зеленого світла ($\lambda=0,55$ мкм) з кількістю зон Френеля ($m=100$)

Ще більшого ефекту можна досягти, не перекриваючи парні (чи непарні) зони, а змінюючи фазу їх коливань на π . Це можна здійснити за допомогою прозорої пластинки, товщина якої в місцях, що відповідають парним і непарним зонам, відрізняється певним чином на підібрану величину. Така пластинка називається фазовою зонною

пластинкою. У порівнянні із звичайною (чи амплітудною) зонною пластинкою фазова дає додаткове зростання амплітуди удвічі, а інтенсивності світла – у чотири рази.

Висновки. Під час дослідження інтерференції вторинних хвиль за методом зон Френеля отримані такі результати:

площі зон Френеля однакові при невеликій їх кількості;

радіуси зон Френеля збільшуються відповідно квадратному кореню з числа зон Френеля (\sqrt{m});

амплітуда коливань, яка створюється у точці спостереження сферичною хвильовою поверхнею, дорівнює половині амплітуди коливань, що створюється однією центральною зоною;

за методом графічного складання амплітуд доведено, що амплітуда світла, яка створюється половиною першої зони Френеля, удвічі перевищує амплітуду, що створюється всією хвильовою поверхнею;

якщо на шляху хвилі встановити непрозорий екран з отвором, який залишає відкритою тільки центральну зону Френеля, то амплітуда в точці спостереження буде дорівнювати E_1 , що у 2 рази перевищує амплітуду E_p . Тобто інтенсивність світла в точці спостереження буде у 4 рази більше, ніж за відсутності перешкод між точками утворення і спостереження хвильового фронту;

коливання від парних і непарних зон Френеля знаходяться у протифазі і тому послаблюють одна одну. Якщо на шляху світлової хвилі розташувати пластинку, яка б перекривала усі парні або непарні зони, то амплітуда коливання в точці спостереження різко б зросла відповідно до квадрата числа зон Френеля (m^2);

виготовлені зонні пластинки для зеленого світла ($\lambda=0,5$ мкм і $\lambda=0,55$ мкм) з кількістю зон Френеля ($m=20$ і $m=100$) відповідно.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Використовуючи отримані результати дослідження зон Френеля, провести розрахунки та виготовити зонні, у тому числі фазові, пластинки для видимого та інфрачервоного діапазону хвиль, які можна було б використовувати в оптичних системах стрілецького озброєння.

Список використаної літератури

1. http://de.ifmo.ru/bk_netra/start.php?bn=26
2. Прилади нічного бачення. – М., 1991. – 362 с.
3. Використання оптичних систем у стрілецькому озброєнні. – М., 1991. – 291 с.
4. Лопатинський І. Є. Фізика : підручник / І. Є. Лопатинський та ін. – Львів : Афіша, 2009. – 386 с.
5. Савельєв І. В. Курс загальної фізики. / І. В. Савельєв. – М., 1981. – Т. 3. – 528 с.
6. Поль Р. В. Оптика й атомна фізика / Р. В. Поль. – М., 1966. – 552 с.
7. <http://www.markbook.chat.ru>
8. <http://www.college.ru>
9. <http://som.fio.ru>

Рецензент – кандидат технічних наук, доцент Рачок Р. В.

Блинников Г., Шевчук В. Применение дифракционных явлений для улучшения качества оптических приборов

В работе исследовано увеличение чувствительности оптических приборов путем использования дифракционных явлений, в частности метода зон Френеля.

Исследование метода зон Френеля показало, что амплитуда колебаний, которая создается в точке наблюдения сферической волновой поверхностью, равна половине амплитуды колебаний, которая создается одной центральной зоной. Осуществлен анализ метода графического сложения амплитуд, который показал, что амплитуда света, которая создается половиной первой зоны Френеля, в два раза превышает амплитуду, которая создается всей волновой поверхностью.

Ключевые слова: дифракционные явления, зона Френеля, зонная пластинка, прибор ночного виденья, амплитуда колебаний, векторная диаграмма.

Blinnikov G., Shevchuk V. Using the diffraction phenomenon for improvement the quality of optical devices

The development of electronic-optical devices is one of the perspective directions in development of optical-electronic equipment. The valuable prop-

erties and features that appropriate to the modern optical-electronic devices causes their using and development in different spheres of human activity.

Electronic-optical transformers (EOT) and light strengtheners are widely used in different spheres of science and techniques. In the astronomy, EOT allowed to shoot the spectrums of distant stars and gas fogs. In the photographic technique during registration the image on film, it was succeeded to shorten the display time in thousand times. Electronic-optical devices based on EOT are used for the supervision at the unfavorable terms of vision, for example, at driving the ships at night.

Besides the wide spectrum of tasks that solved by means of EOT, one of the basic functions of electronic-optical devices is directly related to the supervision of objects at small levels of visual signal – in different areas of optical spectrum. Because of that, such electronic-optical devices got the specific name – devices of nightly vision. Functioning of nightly vision device is related not only to the parameters of EOT and to its optical elements, but also to the parameters and characteristics of the observer eye. The eye of observer, which gets information, must be considered as an ending element in general system “object – device of supervision – eye”.

This paper is dedicated to the research of sensitiveness increase of the optical devices by using the diffraction phenomenon, in particular to the method of Fresnel zones. Research of the Fresnel zones method revealed that the amplitude of vibrations, which is created by a spherical wave surface in a point of supervision, equaled the half of the amplitude of vibrations, which is created by the one central zone. The analysis of graphic stowage of amplitudes method is carried out. That method showed that the amplitude of light, which is created by the half of the first Fresnel zone, in two times exceeds the amplitude which is created by the whole wave surface. It is proven that if on the way of light wave to dispose a plate, which would cover all pair or odd areas, and then the oscillation amplitude in a point of supervision would increase abruptly according to the amount of the Fresnel zones (m^2). Zone plates for green light ($\lambda=0,5 \mu\text{m}$ and $\lambda=0,55 \mu\text{m}$) with the amount of the Fresnel zones ($m=20$ and $m=100$) accordingly was made.

Keywords: *the diffraction phenomenon, Fresnel zone, zoneplate, device of nightly vision, amplitude of vibrations, vectogram.*