

УДК 621.373.826

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-104-113

ARTICLE HISTORY

Received 30.01.2024

Accepted 07.02.2024

Сандлер Альберт Кирилович¹, Палагін Олександр Миколайович²
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
sa@onma.edu.ua¹, apalagin113@gmail.com²

Вдосконалення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій

Sandler Albert¹, Palagin Oleksandr²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
sa@onma.edu.ua¹, apalagin113@gmail.com²

Improvement of the adaptive mirror of ships optical location stations

Резюме. Обґрунтовано схемотехнічне рішення адаптивного дзеркала суднової оптико-локаційної станції. У запропонованому дзеркалі відсутня необхідність корекційних дій з підтримки оптичних властивостей всіх елементів лінзи під впливом експлуатаційних чинників, розширений діапазон режимів роботи й одночасно можлива незалежна зміна оптичних властивостей різних поверхонь. Обґрунтовано застосування ніобату літію для виготовлення елементів дзеркала.

Summary. The schematic solution of the adaptive mirror of ship optical location stations is substantiated. In the proposed mirror, there is no need for corrective actions to maintain the optical properties of all lens elements under the influence of operating factors, the range of operating modes is expanded, and at the same time, independent changes in the optical properties of various surfaces are possible. The use of lithium niobate for the manufacture of mirror elements is substantiated.

Лазери суднових оптико-локаційних станцій мають ряд специфічних відмінностей, обумовлених співвідношенням геометрії резонатора та довжиною хвилі випромінювання. Звичайно поперечний переріз резонатора цих лазерів відрізняється від довжини хвилі

приблизно на два порядки. У таких лазерах застосовуються резонаторні елементи хвилеводного типу. Для виводу випромінювання використовуються частково прозорі вихідні дзеркала. Фізично дзеркала реалізуються у вигляді періодичних структур, період яких менший довжини хвилі. Структури, у більшості випадків, утворюються металевими провідниками різних конфігурацій. Важливими властивостями періодичних структур є достатньо великий діапазон варіювання коефіцієнта пропускання й можливість змінювати поляризаційні та енергетичні параметри оптичного випромінювання. Зазначені якості дозволили зайняти періодичним структурам домінуюче положення в галузі вихідних дзеркал лазерів.

Періодичні структури, утворені паралельними провідниками, дозволяють одержувати лінійно поляризоване випромінювання з напрямком вектору поляризації електричного поля, паралельним провідникам ґрат. Крім того, періодичні структури вносять фазове зрушення у електромагнітне випромінювання, яке відбивається від них або проходить наскрізь.

Величина фазового зрушення залежить від параметрів періодичної структури – геометричних розмірів провідників і відстаней між ними. Якщо параметри періодичної структури неідентичні уздовж її поверхні, то це приводить до зміни фазового фронту випромінювання. Тому періодична структура, яка створена на плоскій поверхні, може набувати властивості скривлених дзеркал і лінз. Такі властивості можуть бути корисні при використанні градієнтних ґрат як вихідних дзеркал лазерів. Адже в лазерах часто застосовуються сферичні дзеркала для досягнення необхідної каустики резонатора й зниження дифракційних втрат випромінювання. У резонаторах лазерів діапазону для зниження дифракційних втрат використовуються сферичні дзеркала з більшим радіусом кривизни. Такі дзеркала дозволяють зменшити втрати не тільки в класичних відкритих резонаторах, але й у резонаторах хвилеводного типу, оскільки зменшують негативний вплив неоднорідностей хвилеводу й зазорів між хвилеводом і дзеркалами. Однак сферичні дзеркала великого радіуса кривизни значно складніше у виготовленні, ніж плоскі дзеркала. Тому створення плоских частково прозорих дзеркал, здатних викривляти фазовий фронт електромагнітних хвиль, що властиве сферичним дзеркалам і лінзам, є досить актуальним завданням [1, 2].

Відома велика кількість конструктивного виконання періодичних ґрат. Найбільш технологічними є металеві ґрати, виконані на прозорій діелектричній підложці. На підложці можна виконувати структури різноманітних конфігурацій, наприклад, у вигляді суцільних або

фрагментованих провідників. Особливий інтерес представляють періодичні структури у вигляді концентричних кілець і радіальних смуг, які дозволяють одержувати лазерне випромінювання з радіальною та азимутальною поляризацією.

Відоме дзеркало, що виконане з металу та має на своїй поверхні періодичні структури у вигляді ґрат з паралельних провідників (рис. 1) [3].

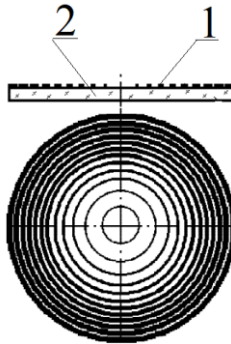


Рис. 1. Дзеркало лазера: 1 – металеві кільця; 2 – прозора пластина

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням металу, як основи дзеркала:

- необхідність постійного корегування зміни оптичних властивостей металеві поверхні при контакті з навколишнім середовищем (очищення та шліфування);

- необхідність додаткової термокомпенсації деформації основи дзеркала;

- необхідність компенсації впливу еліптичності випромінювання, яка обумовлена анізотропією дзеркала.

Найбільш близьким за технічною сутністю та результатом, що досягається до рішення задачі вдосконалення дзеркала лазера, є азимутальне вихідне дзеркало, що містить металеві кільця, концентрично розташовані на скляній прозорій плоскій основі-пластині, яке відрізняється тим, що ширина кілець та відстані між ними послідовно змінюються у напрямку від краю до центра пластини, причому послідовність зміни може бути плавною або плавно дискретною [4, 5].

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням сполучення металу та скла у основі дзеркала:

застосування матеріалів з показниками теплового поширення, що суттєво відрізняються;

необхідність постійного корегування зміни оптичних властивостей металеві поверхні при контакті з навколишнім середовищем (очищення та шліфування);

складність підтримки юстирування дзеркала в наслідок теплового впливу;

обмеженість діапазону режимів роботи.

Таким чином, доцільним є здійснення дослідження зі створення адаптивного дзеркала, у якому відсутня необхідність корекційних дій з підтримки оптичних властивостей всіх елементів лінзи під впливом експлуатаційних чинників, розширений діапазон режимів роботи й одночасна можливістю незалежної зміни оптичних властивостей різних поверхонь.

Поставлена задача вирішується тим, що адаптивне дзеркало корабельних оптико-локаційних станцій, що складається з основи, яка містить концентричні прозорі кільця, ширина яких та відстані між ними послідовно змінюються у напрямку від краю до центра дзеркала. Послідовність зміни може бути плавною або плавно дискретною. Відмінність пропонованого дзеркала полягає у тому, що кільця, які виконані з електрооптичного матеріалу та розділені шарами скла зі штучного сапфіру, згруповані в єдиний блок у межах основи та підключені до плати керування.

Конструкція дзеркала складається з основи 1, яка виконана з сапфірового скла. У внутрішньому просторі опори містяться концентричні прозорі кільця з електрооптичного матеріалу 3, які розділяються концентричними кільцями з штучного сапфірового скла 4, товщина яких перебуває у нанодіапазоні. Кільця з електрооптичного матеріалу та штучного сапфірового скла виконуються методом плазмового осадження. Кільця з арсеніду галію сполучені з відповідними контактами плати керування 2, яка, також міститься у просторі основи (рис. 2).

При включенні дзеркала до роботи з плати керування надходить напруга до відповідних кілець з арсеніду галію. Це дозволяє задати відповідні оптичні характеристики кожного кільця [5 - 7]. Таким чином відбувається формування необхідної азимутальної та радіальної поляризації лазерного випромінювання. Також з'являється можливість надати кільцевій періодичній структурі властивостей вигнутого дзеркала та фокусууючої лінзи. Основа та концентричні шари зі штучного сапфірового скла застосовані для запобігання додаткових

термічних деформацій у обсязі дзеркала та перекручувань оптичного шляху світла [8 – 10].

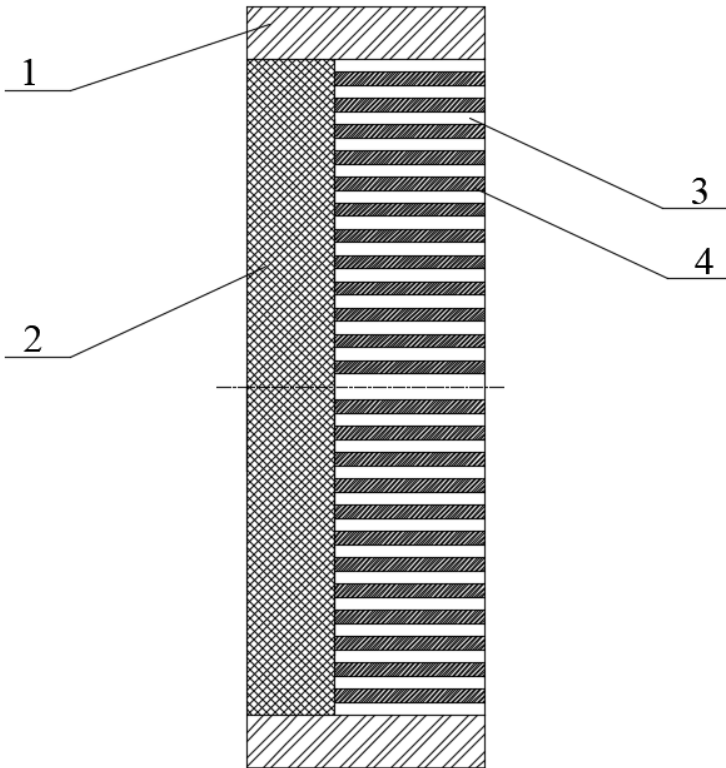


Рис. 2. Адаптивне дзеркало лазерів корабельних оптико-локаційних станцій: 1 – основа; 2 – плата керування; 3 – концентричні прозорі кільця з електрооптичного матеріалу; 4 – концентричні шари з сапфірового скла

У динамічному режимі (включенні дзеркала до роботи) відбувається вихід лазера на стабільний робочий режим і налаштування дзеркала на центральну частоту. Налаштування полягає у з тому, що з плати керування надходить напруга до відповідних кілець з електрооптичного матеріалу. Це дозволяє задати відповідні оптичні характеристики кожного кільця. Таким чином відбувається формування

необхідної азимутальної та радіальної поляризації лазерного випромінювання.

Використання електрооптичного керування дзеркала представляє більші можливості при здійсненні різних режимів роботи лазера. Електрооптичне керування резонатором лазера засноване на електрооптичному ефекті Поккельса, що полягає в зміні показника заломлення світла в матеріалах, поміщених в електричне поле [11].

Мода резонатора з подібними дзеркалами являє стоячу хвилю, яка еквівалентна двом хвилям, що біжать, рівної інтенсивності, що поширюються в протилежних напрямках. Якщо потік енергії в кожній із хвиль, що біжать, дорівнює P , то при відбитті від двох однакових дзеркал відбувається втрата потужності на рівні $2P(1 - R)$. Отже, енергія втрачена за період коливання буде становити $2P(1 - R)\lambda/c$. Енергія ж, накопичена в резонаторі, складе $2PL/c$. Звідки добротність резонатора [12]:

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{1}{1 - R},$$

де R – коефіцієнт відбиття; λ – довжина хвилі випромінювання; L – геометричний розмір дзеркала.

При впливі зовнішнього електричного поля матеріал стає оптично анізотропним, що проявляється в зміні показника заломлення Δn для хвилі випромінювання, поляризованої паралельно зовнішньому електричному полю, на рівні

$$\Delta n = \frac{r_{ij} n_0^3 E_{BH}}{2},$$

где r_{ij} – тензор лінійного електрооптичного ефекту; n_0 – показник заломлення матеріалу без електричного поля; E_{BH} – напруженість зовнішнього електричного поля.

З відомих матеріалів найбільшою мірою відповідають завданню електрооптичного керування дзеркалом арсенід галію та ніобат літію. Електрооптичний коефіцієнт арсенід галію, який відмінний від нуля, $r_{41} = 1,41$. Електрооптичні коефіцієнти ніобату літію, які відмінні від нуля: $r_{33} = 30,8$, $r_{13} = 8,6$, $r_{22} = 3,4$, $r_{42} = 28,0$ [13, 14].

Порівняння цих матеріалів з точки зору керування добротністю завдяки впливу електричного поля за різними напрямками на показник заломлення, дало такі результати (рис. 3).

Аналіз залежностей (рис. 3) дозволяє вважати доцільним використання у дзеркалі запропонованого схемотехнічного рішення ніобату літію, як матеріалу, що забезпечує більший діапазон керування оптичними властивостями дзеркала.

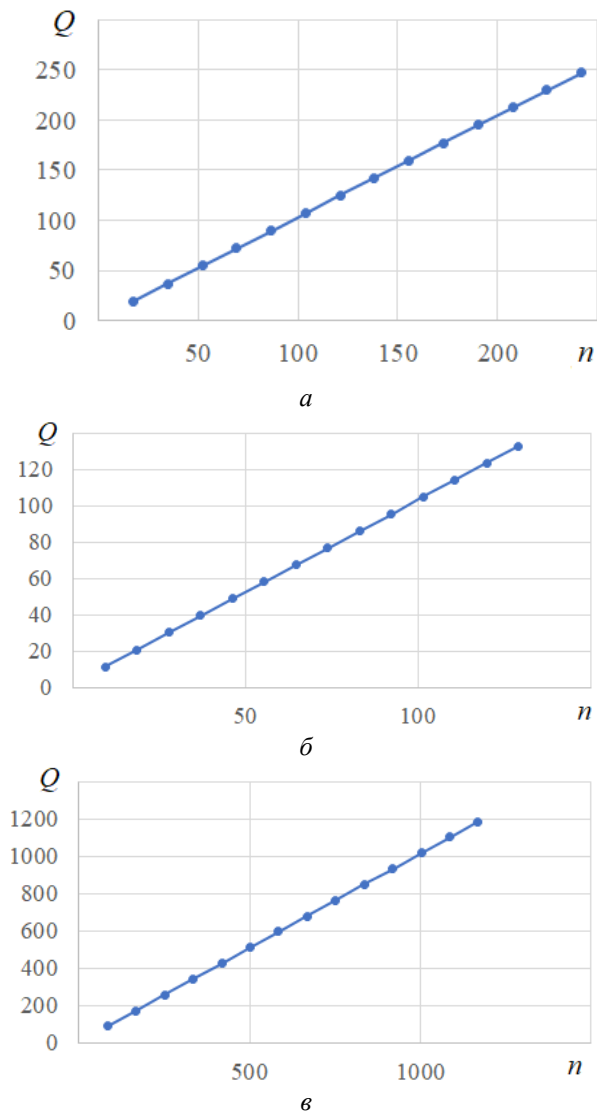


Рис. 3. Залежність величини добротності від показника заломлення
для: a – арсеніду галію ($r_{41} = 1,41$); $б$ – ніобату літію ($r_{22} = 3,4$);
 $в$ – ніобату літію ($r_{33} = 30,8$)

Крім того застосування ніобату літію для виготовлення концентричних електрокерованих кілець дзеркала, забезпечить: відсутність необхідності постійного корегування оптичних властивостей дзеркала;

спрощення юстирування дзеркала;

розширений діапазон робочих режимів.

Адаптивне дзеркало запропонованої конструкції має певні обмеження щодо свого застосування. Головне з таких обмежень відноситься до механічної стійкості та впливу підвищеної температури.

З оглядом на можливості, обмеження та недоліки, розвиток дослідження має полягати у:

подальшому вдосконаленні моделі адаптивного дзеркала, яка дозволить забезпечити інваріантність до більшості експлуатаційних факторів протягом тривалих термінів часу;

пошуках альтернативних матеріалів з більш досконалыми фізико-механічними властивостями для керованих елементів дзеркала;

оптимізації конструкції за критеріями довготривалої надійності та швидкодії.

У відповідності до сформульованої задачі запропоновано нове схемотехнічне рішення адаптивного дзеркала суднових оптико-локаційних станцій. На відміну від існуючих, запропоноване схемотехнічне рішення спроможне значним чином збільшити робочий діапазон керування. Впровадження нового адаптивного дзеркала дозволить підвищити якість й надійність функціонування встаткування.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Дзюбенко, М. И., Маслов, В. А., Одаренко, Е. Н., Радионов, В. П. Перспективы использования градиентных решеток в лазерах терагерцевого диапазона // Радиофизика і радіоастрономія. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 302 - 312.

2. Молебный, В. В. Оптико-локационные системы: Основы функционирования и построения. – М.: Машиностроение, 1981. – 183 с.

3. Шестопалов, В. П., Кириленко, А. А., Масалов, С. А., Сиренко, Ю. К. Резонансное рассеяние волн. – Т. 1. – Дифракционные решетки. – К.: Наукова думка, 1986. – 227 с.

4. Патент України № 115126. МПК H01S 3/08 (2006.01), H01S 3/034 (2006.01), B23K 26/064 (2014.01). Азимутальне вихідне дзеркало

лазерного резонатора / М. І. Дзюбенко, В. О. Маслов, В. П. Радіонов; заявник та володар патенту Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усікова Національної академії наук України. – № u201607610. – заявл. 11.07.2016. – опубл. 10.04.2017, бюл. № 7. – 3 с.

5. Dzyubenko, M. I., Kiseliiov, V. K., Radionov, V. P., 2015. Resonator Methods of Measuring Refractive Index of a Transparent Substance in the Terahertz Band // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – № 74(8). – P. 725 – 733.

6. Гуляев, Ю. В., Меш, М. Я., Проклов, В. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 150 с.

7. Платонов, Р. А. Электрически перенастраиваемые устройства на основе нелинейных диэлектриков для управления диаграммой направленности в антенных системах миллиметрового диапазона длин волн: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01/ ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ". – С-Пб., 2018. – 20 с.

8. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2019. – С. 27 - 33.

9. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 - 279.

10. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – 2023. – Vol. 5. – № 5(125). – P. 24 - 31: DOI: 10.15587/1729-4061.2023.289773.

11. Быков, М. М., Скринник, Н. Г. Лазеры с модулированной добротностью резонатора с помощью фототропных сред // Радиотехника. – 2000. – Вып. 116. – С. 121 - 123.

12. Черняков, Е. І., Мачехін, Ю. П., Кухтін, М. П., Кухтін, С. М. Оптоелектроніка. – Х.: ХНУРЕ, 2016. – 292 с.

13. Нарасимхамурти, Т. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

14. Кузьминов, Ю. С. Ниобат и танталат лития. – М.: Наука, 1975. – 224 с.

Abstract. *One of the directions that determine the improvement of the quality and probability of functioning of the ship's optical location station is the use of the latest materials based on nanotechnology. The lasers of the ship's optical location stations have a number of specific differences due to the ratio of the geometry of the resonator and the wavelength of the radiation. Physically, mirrors are realized in the form of periodic structures, the period of which is less than the wavelength. Spherical mirrors with a larger radius of curvature are used in resonators of range lasers to reduce diffraction losses. Such mirrors make it possible to reduce losses not only in classic open resonators, but also in waveguide-type resonators, as they reduce the negative impact of waveguide inhomogeneities and gaps between the waveguide and mirrors. However, spherical mirrors with a large radius of curvature are much more difficult to manufacture than flat mirrors. Therefore, the creation of flat partially transparent mirrors capable of bending the phase front of electromagnetic waves, which is characteristic of spherical mirrors and lenses, is a rather urgent task. The goal of the work is to implement the latest constructive implementation of the adaptive mirror of optical location stations. The object of research is the processes of formation and transformation of an optical signal in an adaptive mirror. The subject of additional research is electro-optical mirrors. It is proposed to solve the given problem due to the introduction of a new mirror consisting of a base made of sapphire glass. The inner space of the support contains concentric transparent rings made of electro-optical material, which are separated by concentric rings made of artificial sapphire glass, the thickness of which is in the nano range. Rings made of electro-optical material and artificial sapphire glass are made by the method of plasma deposition. Gallium arsenide rings are connected to the corresponding contacts of the control board, which is also contained in the space of the base. The introduction of a new adaptive mirror will improve the quality and reliability of the equipment's functioning.*