

ISSN 1028-821X. Radiofiz. Electron. 2021. Vol. 26, No. 4: 28–33

DOI: <http://doi.org/10.15407/rej2021.04.028>

УДК 535.14+537.862

**М.І. Дзюбенко, С.О. Масалов, Ю.Ю. Каменєв, І.В. Коленов,  
В.П. Радіонов, М.Ф. Дахов, А.І. Пузак, О.І. Дмитрук**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна  
E-mail: mid41@ukr.net, radsvet@ukr.net

## **Застосування градієнтних металоплівкових вихідних дзеркал у газорозрядних лазерах терагерцового діапазону**

**Предмет і мета роботи.** При використанні лазерів терагерцового (ТГц) діапазону часто виникає проблема узгодження вихідного лазерного пучка з хвилевідною лінією передачі. Застосування спеціальних квазіоптичних пристроїв призводить до втрат випромінювання і додаткових матеріальних витрат. Метою роботи є розробка вихідних дзеркал для ТГц-лазерів, які дозволяють отримувати лазерний пучок, що узгоджується з лінією передачі заданого діаметра.

**Методи і методологія роботи.** Для експериментальних досліджень впливу конфігурації вихідного дзеркала на параметри лазерного ТГц-випромінювання були виготовлені градієнтні металоплівкові дзеркала. Вони являють собою прозору підкладку з тонким металевим шаром, товщина якого не рівномірна по поверхні дзеркала. У такому дзеркалі є центральна пляма прозорості з заданою зміною коефіцієнта пропускання. У роботі наведено результати дослідження властивостей градієнтних металоплівкових вихідних дзеркал у газорозрядному HCN-лазері з довжиною хвилі 337 мкм.

**Результати роботи.** За відповідної конфігурації градієнтні металоплівкові дзеркала дозволяють отримати лазерний пучок з перерізом, який дорівнює внутрішньому діаметру використовуваної лінії передачі, і з відповідним поперечним енергетичним розподілом. Це дозволяє підвищити ефективність передачі енергії лазерного випромінювання в лінію передачі. Додатковим позитивним чинником є те, що підвищена прозорість у центрі дзеркала може сприяти більш ефективному використанню енергії активної речовини і надавати плоскому дзеркалу фокусувальних властивостей, які сприяють зниженню дифракційних втрат.

**Висновки.** Використання градієнтних металоплівкових вихідних дзеркал дозволяє підвищити ефективність лазерної установки. Виявлені особливості металоплівкових дзеркал свідчать про перспективність їх використання і подальшого дослідження. Лл. 4. Бібліогр.: 7 назв.

**Ключові слова:** терагерцовий діапазон, лазер, градієнтне металоплівкове вихідне дзеркало, лазерний резонатор.

На цей час лазери знаходять застосування в якості основних джерел випромінювання в терагерцовому (ТГц) діапазоні. Зокрема, вони успішно використовуються в приладах для діагностики плазми на термоядерних установках типу «Токамак» [1, 2]. Для передачі й обробки лазерного ТГц-випромінювання на таких установках було розроблено й виготовлено низку квазіоптичних елементів та пристроїв на базі порожнистого діелектричного хвилеводу, які в подальшому безперервно вдосконалювалися і розвивалися [3]. Такі пристрої набули широко-

го застосування, зокрема, у вимірjuвальній техніці і медицині.

Базовим елементом у квазіоптичних пристроях є лінія передачі у вигляді порожнистого діелектричного хвилеводу круглого перерізу з внутрішнім діаметром, рівним 20 мм. Уздовж діаметра такого хвилеводу укладається близько 100 довжин хвиль. Це дозволяє розглядати такі пристрої у квазіоптичному наближенні.

Такі хвилеводи не слід згинати, оскільки при цьому різко зростають втрати. Тому їх виготовляють прямолінійними і жорсткими, а для ви-

конання вигинів застосовуються кутові з'єднувачі на основі металевих дзеркал. Таким чином хвилевід обраного типорозміру комплектується широким набором сумісних з ним допоміжних пристроїв — різноманітних кутових з'єднувачів, розділювачів променя тощо. Перехід на інший діаметр хвилеводу вимагає істотних витрат, що економічно не виправдано.

Часто виникає проблема узгодження вихідного лазерного пучка з основною хвилею, що розповсюджується по такому порожнистому хвилеводу. Наприклад, коли потрібно отримати потужність порядку десятків міліват, можна використовувати газорозрядні HCN-лазери з довжиною резонатора 1...3 м. Оптимальний діаметр лазерного резонатора при цьому становить 40...60 мм. Якщо в такому лазері використовується вихідне дзеркало у вигляді металевої решітки, то переріз вихідного лазерного пучка дорівнює діаметру лазерного резонатора, що більш ніж удвічі перевищує діаметр лінії передачі. Якщо використовується вихідне металеве дзеркало з отвором, то діаметр лазерного пучка дорівнює діаметру вихідного отвору. Оптимальний діаметр отвору, залежно від розмірів резонатора, становить 4...15 мм. В обох випадках діаметр лазерного пучка не збігається з діаметром хвилевідної лінії передачі. Для мінімізації втрат випромінювання, що надходить від лазера до лінії передачі, потрібні додаткові пристрої, що перетворюють діаметр лазерного пучка, на зразок лінз або конічних хвилевідних переходів. Це ускладнює лазерну установку, збільшує її габарити і вносить додаткові втрати.

Метою роботи є розробка та дослідження вихідних дзеркал для ТГц-лазерів, що дозволяють отримувати лазерний пучок, який узгоджується з лінією передачі за діаметром перерізу.

**1. Експериментальна установка.** Для отримання вихідних дзеркал було використано властивість часткового пропускання випромінювання тонкими металевими плівками. Такі плівки можуть працювати в широкому діапазоні частот, а їх здатність пропускати лазерне випромінювання можна змінювати в широких межах шляхом зміни товщини металевого шару. Для виготовлення таких плівок було застосовано технологію вакуумного напилювання алюмінію на діелектричну підкладку. В якос-

ті підкладки використано полімерну плівку товщиною 50 мкм. Було виготовлено декілька зразків з металевим шаром різної товщини. Виготовлені метало-діелектричні плівки закріплювалися в спеціальних кільцевих оправках, що забезпечують рівномірний натяг (рис. 1).

Металоплівкові дзеркала були випробувані в газорозрядному HCN-лазері з довжиною хвилі 337 мкм, який має високочастотне накачування (рис. 2).

Лазер має резонатор хвилевідного типу довжиною 1,5 м. Розрядна трубка 1 одночасно є діелектричним хвилеводом з внутрішнім діаметром 50 мм. Збудження газового розряду здійснюється високочастотним струмом крізь стінки розрядної трубки за допомогою трьох циліндричних електродів 2, встановлених зовні розрядної трубки, і високочастотного генератора 3. Резонатор утворений двома плоскими дзеркалами 4, 5, встановленими в юстувальних пристроях 6. Дзеркало 4 — металеве, воно споряджено механізмом 7 для переміщення уздовж осі резонатора. З його допомогою здійснюється налаштування резонатора на частоту генерації. В якості вихідного дзеркала 5 використовувалися плівкові дзеркала, зображені на рис. 1. Для зниження втрат плівкове дзеркало встановлювалося металевим шаром всередину резонатора. Випромінювання лазера подавалося на вхід порожнистого діелектричного хвилеводу 8 з внутрішнім діаметром 20 мм. Хвилевід мав довжину 600 мм. На другому кінці хвилеводу 1 встановлювався піроелектричний детектор 9, підключений до приладів реєстрації сигналу.

**2. Методика і результати досліджень.** Була виготовлена і випробувана партія плівкових дзеркал з різними коефіцієнтами пропускання. Кожне з цих дзеркал мало рівномірний коефіцієнт пропускання по всій його поверхні (рис. 1, а). Дзеркала послідовно встановлювалися в лазері, і в результаті були знайдені значення, близькі до оптимумів пропускання. Залежно від режиму накачування лазера, оптимальні коефіцієнти пропускання вихідних дзеркал змінювалися в інтервалі 1...4 %. Випробування показали, що такі дзеркала цілком прийнятно працюють в умовах вакууму і підвищеної температури, викликаній газовим розрядом. Природно, що так само, як і в разі ви-

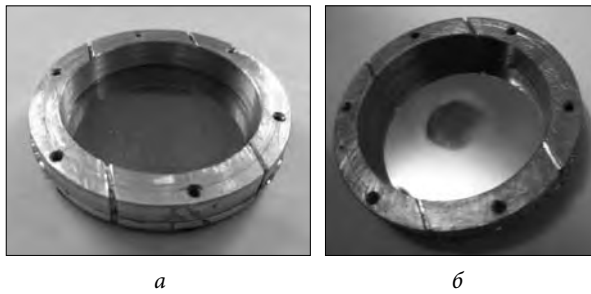


Рис. 1. Металоплівкові дзеркала: з рівномірним шаром металу (а); градієнтне, з металевим шаром змінної товщини (б)

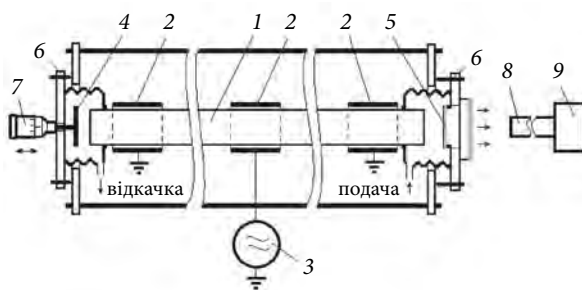


Рис. 2. Схема лазерної установки

користання металевих решіток, не можна допускати безпосереднього потрапляння газового розряду на таке дзеркало.

Значення потужності лазерного випромінювання виявилися близькими до тих, що були отримані при використанні дротяних решіток, з урахуванням втрат, що вносяться підкладкою. Використовувана підкладка (без металевих шарів) знижує потужність випромінювання, що крізь неї пройшло, на 40 %. Отже, є резерв підвищення потужності вихідного випромінювання за рахунок оптимізації товщини підкладки і використання матеріалів з меншими втратами. Наприклад, на цих частотах шар кристалічного кварцу завтовшки 1 мм поглинає  $\approx 25\%$  випромінювання, фторопласт товщиною 0,1 мм — близько 10 %, поліметилпентен товщиною 0,2 мм — близько 15 %, поліетилен товщиною 3 мм — близько 10 % [4]. Однак слід враховувати, що до матеріалу підкладки висуваються також інші вимоги. Зокрема, вона повинна мати достатню термостійкість, прийнятний коефіцієнт теплового розширення і гарну адгезію з металевим шаром. Оскільки металоплівкове дзеркало звернено металевим шаром усередину резонатора, то підкладка тільки зменшує потужність вихідного випро-

мінювання і практично не вносить додаткових втрат у резонатор. Тому підвищені втрати в підкладці не створюють істотних труднощів при дослідженні фізичних аспектів впливу товщини і конфігурації металевих шарів металоплівкового дзеркала на процеси генерації та узгодження вихідного лазерного випромінювання з лінією передачі.

Таким чином, випробування металоплівкових дзеркал підтвердили їх працездатність. Однак, так само як і металеві решітки, рівномірно напилені металоплівкові дзеркала не дозволяють без перетворення отримати лазерний пучок необхідного діаметра (відмінного від діаметра лазерного резонатора). Для вирішення цієї проблеми були розроблені і випробувані градієнтні металоплівкові дзеркала (рис. 1, б). Методика виготовлення таких дзеркал наступна. Проводилося напилювання металевих шарів до повної його непрозорості. Потім шляхом механічного полірування видалялася частина металевих шарів в центральній області, яка відповідає діаметру лінії передачі. Виготовляючи такі дзеркала, прагнули забезпечити центральну симетрію, наскільки це дозволяло механічне полірування.

Перевагою такої механічної обробки є те, що дзеркало можна кілька разів доопрацьовувати і випробувати, поступово домагаючись оптимальної конфігурації та прозорості.

Під час досліджень було випробувано декілька конфігурацій дзеркал. Найбільш високу потужність лазерного випромінювання в лінії передачі було отримано при конфігурації, коли прозорість плавно збільшувалася до центру в межах центральної області діаметром 20 мм (рис. 3). Коефіцієнт пропускання вказано для металевих шарів, не враховуючи загасання в підкладці.

Вимірювання коефіцієнта пропускання проводилися таким чином. На шляху лазерного випромінювання до піроелектричного приймача встановлювалася діафрагма з діаметром отвору 1 мм. Відразу за діафрагмою встановлювалося досліджуване дзеркало з механізмом переміщення поперек лазерного пучка. Дзеркало переміщалося таким чином, що отвір у діафрагмі перетинав його в діаметральному напрямку. Приймач реєстрував відносну зміну потужності лазерного випромінювання, що

пройшло через діафрагму і досліджуване дзеркало. За 100 % прийнято значення потужності, коли замість дзеркала встановлена підкладка без металевго шару.

Потужність випромінювання, отримана в лінії передачі, при використанні в лазері градієнтного металоплівкового дзеркала, конфігурацію якого наведено на рис. 3, виявилася більш ніж удвічі вищою за ту, що отримали при використанні металоплівкового дзеркала з рівномірним шаром металу, і на 20 % вищою, ніж при використанні дротяної решітки. Це цікавий результат з урахуванням того, що підкладка металоплівкового дзеркала має істотне поглинання.

Модовий склад лазера з градієнтним металоплівковим дзеркалом показано на рис. 4, де продемонстрована залежність потужності лазерного випромінювання від зміни оптичної довжини резонатора шляхом переміщення рухомого дзеркала. Дзеркало переміщалося за допомогою мікрометричного механізму з кроком 1 мкм у бік збільшення довжини резонатора. На кожному кроці автоматично знімалися показання потужності випромінювання.

Під час переміщення рухомого дзеркала лазерного резонатора на відстань половини довжини хвилі спостерігалася п'ять типів коливань лазерної генерації. При подальшому переміщенні дзеркала картина повторюється. Оскільки з резонатора виводиться тільки випромінювання осьової області, то аналіз енергетичного розподілу в резонаторі та ідентифікацію мод за параметрами лазерного пучка достовірно провести неможливо. Дослідити енергетичний розподіл безпосередньо в газорозрядному резонаторі з внутрішніми дзеркалами вкрай важко. Однак оціночну ідентифікацію мод можна зробити, використовуючи теоретичні обґрунтування [5] і досліджуючи поляризаційні характеристики вихідного лазерного пучка.

Оцінка поляризації проводилася за допомогою поляризатора у вигляді дротяної решітки. З високою ймовірністю можна стверджувати, що максимальна амплітуда (рис. 4, крива 1) відповідає моді  $EH_{11}$ , яка має мінімальні втрати у хвилевідному резонаторі, лінійну поляризацію і максимум потужності в осьовій зоні. Саме ця мода має основну практичну

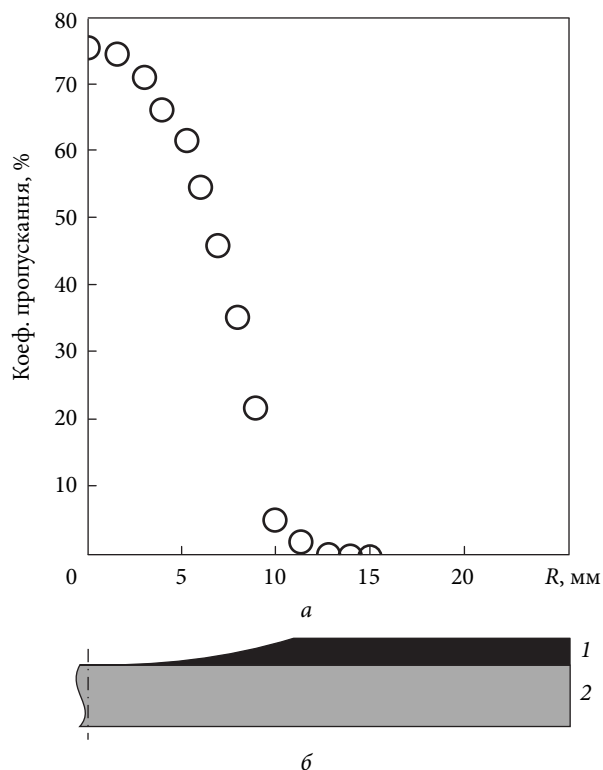


Рис. 3. Розподіл коефіцієнта пропускання (а) і схема зміни товщини металевго шару уздовж радіуса градієнтного металоплівкового дзеркала (б): 1 — металевий шар; 2 — діелектрична підкладка

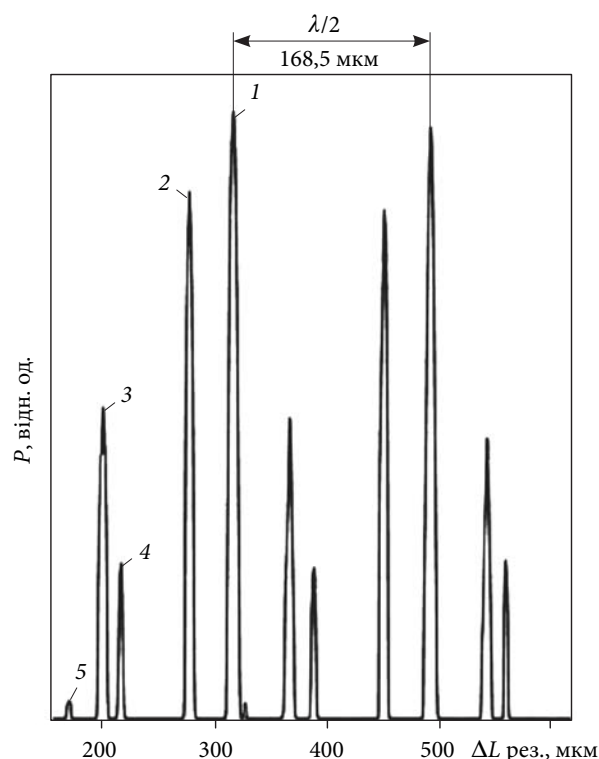


Рис. 4. Залежність потужності лазерного випромінювання від зміни оптичної довжини резонатора шляхом переміщення рухомого дзеркала

цінність, оскільки саме на неї орієнтована вся квазіоптична апаратура. На цій моді проводилися порівняння енергетичних характеристик досліджених дзеркал. Три типи коливань меншої потужності (криві 2–4, рис. 4) можуть представляти моди  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  з азимутальною і радіальною поляризаціями, а також комбіновану моду  $TE_{01} + EH_{21}$  з лінійною поляризацією [4]. Ці моди мають приблизно однакові втрати у хвилевідному резонаторі. Коливання, амплітуда якого позначена цифрою 5 (рис. 4), при перелаштуванні резонатора на  $\lambda/2$  змінює своє положення щодо інших коливань. Це свідчить про те, що воно відповідає генерації на іншій довжині хвилі. Очевидно, що це лінія генерації 311 мкм, яка є другою за інтенсивністю в активній речовині HCN-лазера.

Моди  $TE_{01}$  і  $TM_{01}$  також можуть становити практичний інтерес. Азимутально і радіально поляризоване випромінювання, завдяки центральній симетрії енергетичних характеристик, добре фокусується за допомогою лінз і увігнутих дзеркал. Лазерні випромінювання з такими поляризаціями знаходять застосування в багатьох областях використання лазерів і для їх отримання розробляються навіть спеціальні вихідні дзеркала [6].

Підвищення потужності лазерного випромінювання в лінії передачі при використанні градієнтного дзеркала, вочевидь, викликано поліпшенням узгодження апертури вихідного лазерного пучка з внутрішнім діаметром лінії передачі. Крім того, поступова зміна прозорості в центральній області вихідного дзеркала дає можливість отримати на виході з лазера амплітудний розподіл поля по перерізу пучка, набли-

жений до власного енергетичного розподілу в лінії передачі. Також можуть діяти й інші чинники, що підвищують ефективність процесу генерації в лазері. Виведення лазерного випромінювання з осової зони резонатора призводить до більш рівномірного розподілу випромінювання по перерізу активної речовини під час генерації на моді  $EH_{11}$ . Поступова зміна коефіцієнта пропускання уздовж радіуса дзеркала може призводити до зміни фронту відбитих хвиль і хвиль, які пройшли, що притаманне кільцевим градієнтним структурам [7]. У результаті цього дзеркало може набувати фокусувальних властивостей, що приводить до зниження дифракційних втрат і розходження випромінювання.

**Висновки.** У роботі експериментально досліджено однорідні і градієнтні металоплівкові вихідні дзеркала для терагерцових лазерів. Встановлено, що такі дзеркала можуть успішно використовуватися в газорозрядних лазерах в умовах вакууму і підвищеної температури. Показано, що градієнтні дзеркала дозволяють узгодити діаметр лазерного пучка з внутрішнім діаметром лінії передачі і підвищити потужність лазерного випромінювання в лінії передачі. Це дозволяє підвищити ефективність лазерної установки. Такі дзеркала є ізотропними і дають можливість отримати як лінійну поляризацію лазерного випромінювання, так і інші види поляризації, зокрема, азимутальну і радіальну.

*Автори вдячні д-ру фіз.-мат. наук І.К. Кузьмічову за корисні зауваження і методичну допомогу у поданні результатів досліджень.*

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Bezborodov V.I., Kiseliyov V.K., Kuleshov Y.M., Yanovsky M.S. Sub-Terahertz quasi-optical reflectometer for CFRP surface inspection. *Adv. Mat. Res.* 2013. Vol. 664. P. 547–550.
2. Belyaeva A., Galuza A., Kolenov I., Mizrakhy S. Developments in Terahertz Ellipsometry: Portable Spectroscopic Quasi-Optical Ellipsometer-Reflectometer and Its Applications. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2021. Vol. 42, Iss. 2. P. 130–152.
3. Киселев В.К., Костенко А.А., Хлопов Г.И., Яновский М.С. *Квазиоптические антенно-фидерные системы*. Под ред. Г.И. Хлопова. Харьков: Контраст, 2013. С. 358–398.
4. *THz-материалы*. С.-Петербург, Россия. URL: [http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz\\_Materials.pdf](http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz_Materials.pdf)
5. Marcatili E.A.J., Schmelter R.A. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. *Bell. Syst. Tech. J.* 1964. Vol. 43, Iss. 4. P. 1783–1809.
6. Gurin O.V., Degtyarev A.V., Maslov V.A., Ryabikh V.N., Topkov A.N. Waveguide resonators of terahertz lasers with internal spherical mirrors. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2016. Vol. 75, Iss. 18. P. 1665–1677.
7. Дзюбенко М.И., Маслов В.А., Одаренко Е.Н., Радіонов В.П. Моделирование выходных зеркал терагерцевых лазеров на основе кольцевых градиентных структур. *Квантовая электроника.* 2019. Vol. 49, Iss. 5. P. 512–513.

Стаття надійшла 29.07.2021

REFERENCES

1. Bezborodov, V.I., Kiseliov, V.K., Kuleshov, Y.M., Yanovsky, M.S., 2013. Sub-Terahertz quasi-optical reflectometer for CFRP surface inspection. *Adv. Mat. Res.*, **664**, pp. 547–550.
2. Belyaeva, A., Galuza, A., Kolenov, I., Mizrakhly, S., 2021. Developments in Terahertz Ellipsometry: Portable Spectroscopic Quasi-Optical Ellipsometer-Reflectometer and Its Applications. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, **42**(2), pp. 130–152.
3. Kiselev, V.K., Kostenko, A.A., Khlopov, G.I. ed., Yanovskiy, M.S., 2013. *Quasi-optical antenna-feeder systems*. Kharkiv: Contrast Publ., pp. 358–398 (in Russian).
4. *THz materials*. [pdf]. St. Petersburg, Russia. Available from: [http://www.tydexoptics.com/pdf/THz\\_Materials.pdf](http://www.tydexoptics.com/pdf/THz_Materials.pdf)
5. Marcatili, E.A.J., Schmelter, R.A., 1964. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. *Bell. Syst. Tech. J.*, **43**(4), pp. 1783–1809.
6. Gurin, O.V., Degtyarev, A.V., Maslov, V.A., Ryabikh, V.N., Topkov, A.N., 2016. Waveguide resonators of terahertz lasers with internal spherical mirrors. *Telecommunications and Radio Engineering*, **75**(18), pp. 1665–1677.
7. Dzyubenko, M.I., Maslov, V.A., Odarenko, Ye.N., Radionov, V.P., 2019. Modelling of output mirrors based on circular gradient structures for THz lasers. *Quantum Electronics*, **49**(5), pp. 512–513.

Received 29.07.2021

M.I. Dzyubenko, S.O. Masalov, Y.E. Kamenev,  
I.V. Kolenov, V.P. Radionov, N.F. Dakhov, A.I. Puzak, O.I. Dmitruk

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

EMPLOYMENT OF GRADIENT METAL-FILM  
OUTPUT MIRRORS IN TERAHERTZ DISCHARGE LASERS

**Subject and Purpose.** The problem of output beam matching with the waveguide transmission line often arises when using terahertz lasers. The special quasi-optical devices that are used to combat the problem lead to radiation losses and additional material costs. The aim of this work is to develop appropriate output mirrors for THz lasers so as to make the output laser beam match the transmission line of a given diameter.

**Methods and Methodology.** As part of the experimental research into the action of the output mirror configuration on the parameters of THz laser radiation, gradient metal-film mirrors are made like a transparent substrate with a thin metal layer on it. The layer thickness varies over the substrate surface, forming therewith a transparency spot with a given change in the transmittance in the middle of the mirror. The properties of the gradient metal-film output mirrors are examined as applied to a gas-discharge HCN laser at a wavelength of 337  $\mu\text{m}$ .

**Results.** The gradient metal-film mirrors enable obtaining laser beams of a diameter equal to the inner diameter of the relevant transmission line and with a proper transverse energy distribution. The efficiency of the transmission of laser radiation energy into the waveguide line increases, and so does the performance of the laser installation. Another positive point is that the enhanced transparency in the middle of the mirror raises efficiency of the active substance energy utilization and conveys focusing properties to the flat mirror, which reduces diffraction losses.

**Conclusions.** The employment of gradient metal-film output mirrors makes it possible to raise efficiency of laser installations. The features of metal-film mirrors suggest broad potentials for their application and make reasonable their further research.

**Key words:** terahertz range, laser, gradient metal-film output mirror, laser resonator.