

# Модернізація конструкції дискового лазера використанням еліпсоїдного освітлювача

О.Д. Кагляк<sup>1</sup> • А.Г.Клімова<sup>1</sup> • О.П. Полешко<sup>1</sup> • О.О. Гончарук<sup>1</sup> • Л.Ф. Головка<sup>1</sup>

Received: 6 April 2022 / Accepted: 30 May 2022

**Анотація.** Тверdotільні дискові лазери мають ряд переваг порівняно з лазерами зі стрижневим активним елементом. Зокрема, за рахунок ефективного тепловідведення, фактично відсутня теплова деформація активного середовища та перетворення його, з оптичної точки зору, в лінзу, що в свою чергу, сприяє підвищенню стабільності характеристик генерованого лазерного променя та знижує ризик втрати резонатором стійкості. Також дискові лазери мають високу якість генерованого пучка [1]. Окрім того, дискові лазери здатні генерувати достатньо високу потужність при компактних розмірах та мають високий оптичний ККД [2]. Однак, для забезпечення спрямування випромінювання накачки на активний елемент, дискові лазери потребують складної дзеркальної системи перевідбиття променів накачки, і через це мають конструктивні обмеження по введенню енергії накачки в активне середовище.

Дана стаття присвячена розробці конструкції освітлювача, який дозволить підвищити інтенсивність накачки активного елемента дискового лазер, що дозволить підвищити генеровану потужність. В статті представлена оригінальна конструкція дискового лазера з еліпсоїдним освітлювачем та ярусною системою накачування активного середовища випромінюванням діодних лазерів. Представлені результати моделювання відведення тепла від активного елемента до холодильника. Приведена оцінка ефективності збудження активного елемента при використанні еліпсоїдного освітлювача та порядок розрахунку параметрів генерованого лазерного променя.

**Ключові слова:** дисковий лазер, випромінювання накачки, активне середовище.

## Вступ

Інтерес до дискових лазерів пов'язаний з тим, що вони мають високу добротність резонатора, що дозволяє отримати лазери зі значно меншими енергетичними витратами. Характерною особливістю цих лазерів, завдяки якій вони отримали свою назву, є використання активного середовища у формі диска. Така форма дозволяє забезпечити значну площу прилягання охолоджуючого елемента до одного з торців активного середовища, чим забезпечувати його ефективне охолодження та, фактично, усувати термічне спотворення активного елемента у теплову лінзу. Як наслідок, це сприяє стабільності параметрів лазерного променя та усуває ризик переходу резонатора лазера у нестійку

область. Також це дозволяє підвищувати рівень потужності накачування у відносно незначний об'єм активного елемента (АЕ), порівняно зі стрижневими лазерами. Також слід зазначити, що дискові лазери здатні генерувати значну потужність [3], додатковим шляхом її підвищення є об'єднання випромінювання від кількох дисків в один пучок.

## Формулювання проблеми та мета дослідження

Окрім, зазначених вище, переваг, дискові лазери мають суттєвий недолік, а саме, складність та висока вартість системи накачування. Це пов'язано з тим, що шлях проходження випромінювання накачки незначний, отже потрібно організувати багаторазове спрямування променя накачки на АЕ, щоб забезпечити повне його поглинання. Для цього необхідно використовувати складні багатодзеркальні оптичні системи. Такі

✉ О. Д. Кагляк  
Kaglyak\_o@meta.ua

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

системи пов'язані з багаторазовим перевідбиттям випромінювання накачки від допоміжних оптичних елементів, що привносить додаткові втрати в процес збудження АЕ та, як наслідок, знижує генеровану потужність та ККД лазера. Окрім того, подібні системи обмежені по кількості та потужності джерел накачки.

Отже розроблення нових систем накачування дискових лазерів, позбавлених вказаних недоліків, є важливим та актуальним.

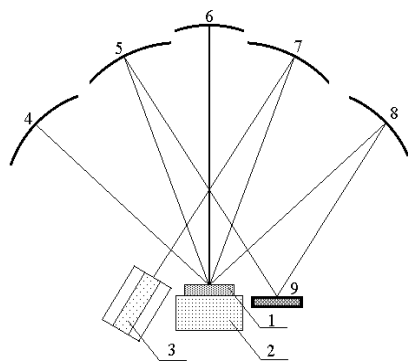
Виходячи з вищенаведеного, метою даної роботи є підвищення ефективності накачки дискового лазера за рахунок розробки нової схеми доставки випромінювання накачки до АЕ, яка дозволяє використовувати декілька джерел накачки, має можливість регулювання світлової енергії, що подається на АЕ, та має мінімальну кількість відбиттів випромінювання накачки від допоміжних оптичних елементів. Об'єктом дослідження є процес збудження (накачування) АЕ випромінюванням діодних лазерів. А предметом дослідження являється вплив схеми накачування на ефективність процесу генерації.

При розробці системи накачування, слід враховувати, що збільшення енерговкладу в АЕ не повинно призводити до його перегріву та спотворення в теплову лінзу, що порушить характеристики резонатора та умови генерації.

### Аналіз відомих схем передачі випромінювання накачки на АЕ

Для усунення, недоліків притаманних відомих схемам накачки АЕ дискового лазера, необхідно проаналізувати їх конструкцію та особливості.

Загалом, традиційною можна назвати схему представлену на рис. 1 [4], однак вона використовується і в сьогоденних розробках [5].



**Рис. 1.** Традиційна оптична схема дискового твердотілого лазера. 1 – активний елемент у формі диска; 2 – його холодильник; 3 – світловолокно по якому передається проміння діодних лазерів для накачки елемента 1; 4, 5, 7, 8 – сферичні і 9 – плоске дзеркала освітлювача; 6 – дзеркало резонатора [4]

За такою схемою, промінь накачки вісім разів проходить через активне середовище поетапно поглинаючись в ньому. Однак, при цьому, частина потужності накачування втрачається на френелівське відбиття, при кожному переході (16 разів) межі зовнішня атмосфера-АЕ та у зворотному напрямку та при відбитті від дзеркал освітлювача (8 разів). Знижують ці втрати за рахунок просвітлення торців АЕ та використання якісних дзеркал, але повністю уникнути їх не вдається. Очевидно, що чим більше таких переходів та перевідбиттів, тим більші сумарні втрати енергії накачки. Окрім того, оскільки промінь лазера накачки має певну розбіжність, то при кожному наступному відбитті характер його взаємодії з АЕ змінюється по мірі збільшення діаметру променя накачки. Розробники в роботі [6], вирішують питання розбіжності променя накачки за рахунок використання колімаційної та фокусувальної лінз. Це дозволяє зменшити розсіяння випромінювання накачки, однак дана схема має недоліки притаманні попередній, зокрема велику кількість перевідбиттів випромінювання накачки від допоміжних оптичних елементів. Окрім того, її недоліком є те, що випромінювання накачки поглинається АЕ не повністю, що знижує ефективність збудження та вироблену потужність.

Розробники схеми [7] використовують групу напівпровідникових лазерів для генерації збудження, коліматор та параболічні дзеркала для спрямування випромінювання накачки на активний елемент. Схема ускладнюється тим, що випромінювання накачки, перш ніж потрапити на АЕ, проходить через вхідний канал коригувального відбивача та порожнину фокусування. Недоліком цієї схеми є втрати енергії через багаторазове відбиття променя збудження, а також потреба чітко юстувати всі оптичні елементи, оскільки похибки в їх позиціонуванні, погіршують умови опромінення АЕ.

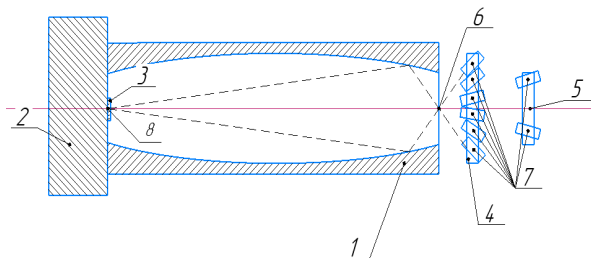
Автори роботи [8] пішли шляхом організації багаторазового перенаправлення випромінювання накачки на активний елемент за допомогою сферичної лінзи. Однак, значна частина випромінювання проходить через периферичну зону лінзи, отже, якість даного випромінювання буде погіршуватися та розмиватися за рахунок сферичної аберації. В даній схемі також присутнє багаторазове перевідбиття променя накачки та багаторазове його проходження через оптичні елементи.

### Розробка нової схеми накачування з використанням еліпсоїдного освітлювача та ярусної системи розміщення діодів накачування

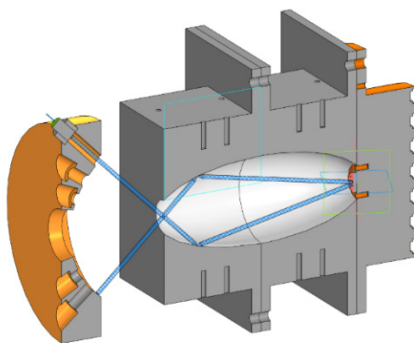
Базуючись на аналізі відомих схем доставки випромінювання накачки до АЕ та враховуючи згадані недоліки, притаманні цим схемам, було запропоновано

нову конструкцію системи накачування дискового лазера з використанням еліпсоїдного освітлювача. В конструкції використовується оптична властивість еліпса, а саме: всі промені що проходять через один фокус еліпса, відбиваючись від внутрішньої дзеркальної поверхні, потраплятимуть у другий його фокус.

Для доставки випромінювання накачки на АЕ пропонується використовувати об'ємний еліпсоїдний освітлювач 1 (рис. 2) з дзеркальною внутрішньою поверхнею. У лівому фокусі освітлювача, на холодильнику 2 розташовано дисковий активний елемент 3. Через правий фокус спрямовується випромінювання лазерних діодів накачки 7, які розташовуються на ярусній кільцевій системі 4, 5. Випромінювання накачки, пройшовши через правий фокус, відбивається від бічної поверхні та спрямовується у другий фокус на АЕ. Проходячи через АЕ, випромінювання накачки частково поглинається. На торець АЕ, що прилягає до холодильника нанесено дзеркальне покриття, і не поглинута частка випромінювання накачки, відбившись знову проходить через АЕ і знову поглинається. Після виходу з АЕ, не поглинута частка випромінювання накачки потрапляє на протилежну сторону освітлювача, відбивається від неї та прямує на дзеркальну ділянку ярусної системи, там відбивається і спрямовується зворотнім шляхом, де після двох наступних проходів повністю поглинається АЕ (рис. 3).

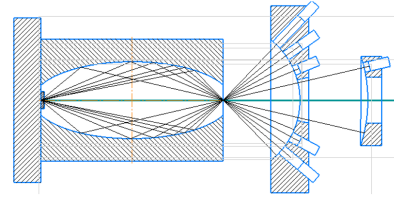


**Рис. 2.** Оптична схема дискового лазера з еліпсоїдним освітлювачем 1 – еліпсоїдний освітлювач, 2 – холодильник, 3 – активний елемент, 4, 5 – ярусна кільцева система, 6 – правий фокус еліпсоїдного освітлювача, 7 – діоди збудження, 8 – лівий фокус еліпсоїдного освітлювача



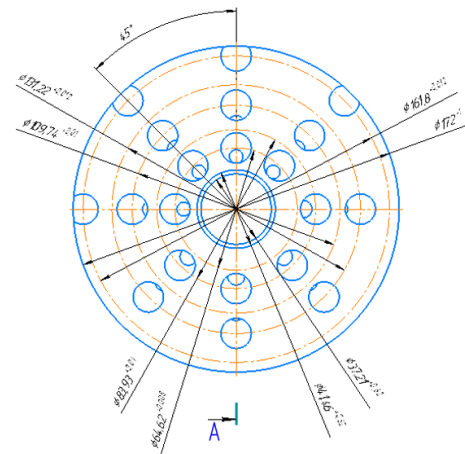
**Рис. 3.** Траєкторія руху променя від одиничного діоду накачування

Потужність діодів накачки потрібно обирати такою, щоб вона була поглинута АЕ за 4 проходи, а наרוшувати загальну потужність накачування за рахунок збільшення кількості діодів накачування (рис. 4).



**Рис. 4.** Множина діодів накачки на ярусній системі

Діоди накачки на ярусній системі розташовані за певним законом (рис. 5), тут можлива поліваріантність, однак потрібно, щоб промінь, пройшовши коло, потрапляв не на інший діод, а на дзеркальну ділянку для спрямування його зворотнім шляхом.



**Рис. 5.** Схема розташування отворів під установку діодів накачування на ярусній системі

Для можливості точного спрямування променя діода накачування на фокус еліпсоїдного освітлювача, пропонується виконувати посадкове місце зі сферичною частиною (рис. 6), що підвищить варіативність позиціонування.

За запропонованою схемою, з використанням еліпсоїдного освітлювача, випромінювання накачки відбивається від дзеркальних поверхонь 4 рази, що вдвічі менше, порівняно з традиційною схемою. Втрати потужності накачки на кожному відбитті 1–2 %, тобто зменшення кількості відбиттів дозволяє знизити втрати енергії накачки та посилити ефективність збудження. Використання ярусної схеми розміщення діодів дозволяє збільшити сумарну інтенсивність накачування, порівняно з використанням одного променя накачки в класичній схемі. Можливість підбору потужності окремого діода в ярусній схемі, дозволить забезпечити поглинання цього випромінювання за 4 проходи через

АЕ, що вдвічі зменшить потребу в багаторазовому перевідбитті та знизить втрати потужності накачки на френелівське відбиття. Отже, використання еліпсоїдного освітлювача, дозволить підвищити ефективність накачування, і, як наслідок, підвищити потужність генерації.

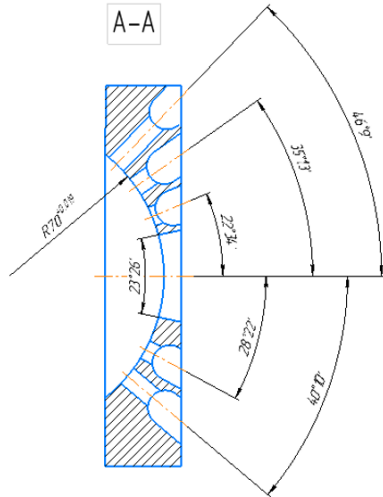


Рис. 6. Розрахункові кути нахилу та форма посадкових отворів

### Розрахунок відведення тепла від АЕ до холодильника під час генерації та опромінення його групою діодів накачування

Збільшення кількості діодів накачування та, як наслідок, збільшення потужності накачування, збільшує ризик перегріву активного елемента та його термічного спотворення в лінзу. В цьому випадку змінюються характеристики резонатора та лазерного променя, що формується в ньому. І хоча плоско-сферичний резонатор, що використовується в дискових лазерах, має достатній запас стійкості, оскільки перебуває в середині стійкої області на діаграмі стійкості, та в будь-якому випадку термічна деформація АЕ є явищем негативним. Зміна характеристик резонатора в процесі роботи, спричиняє погіршення якості генерованого лазерного променя, збільшення його розбіжності, зміщення області фокусування, зміну розміру горловини сфокусованого променя та порушення стабільності цих параметрів в процесі роботи. Тому необхідно визначити, чи в таких умовах ефективність тепловідведення від АЕ до холодильника буде достатньою, для уникнення теплової деформації активного елемента.

Для розрахункової схеми було обрано випадок накачування дискового АЕ діаметром 5 мм та висотою 0,5 мм. Дані розміри є характерними для дискових лазерів згідно [9, 10]. Збудження проводимо 24 лазерними діодами накачки потужністю 5 Вт. кожен.

Частина енергії накачування поглинається АЕ та спричиняє його збудження, а частина йде на теплове поглинання, не спричиняє переходу атомів АЕ у збуджений стан, натомість призводить до його нагрівання. Для досягнення найвищого значення енергетичного ККД (0,9), в якості АЕ використовують ІАГ легований ітербієм а накачування проводять на довжині хвилі 1,03 мкм. [4].

Відведення теплової енергії від АЕ здійснюється через нижній його торець на який нанесене дзеркальне покриття і який являється глухим дзеркалом резонатора. Цей торець контактує з мідним холодильником. В зоні прилягання торця АЕ до холодильника організовано вискоєфективний тепловий контакт. Окрім неактивного поглинання в АЕ, нагрівання також спричиняє поглинання частини енергії накачки глухим дзеркалом резонатора. Величина цієї частки залежить від якості нанесеного покриття, але загалом становить 1–2 %.

Моделювання тепловідведення від АЕ проводилося за допомогою програми “COMSOL”. Результати моделювання представлені на рис. 7; 8, на яких показано теплові поля та ізотерми розподілу температур в тілі холодильника після виходу резонатора на стаціонарний режим роботи.

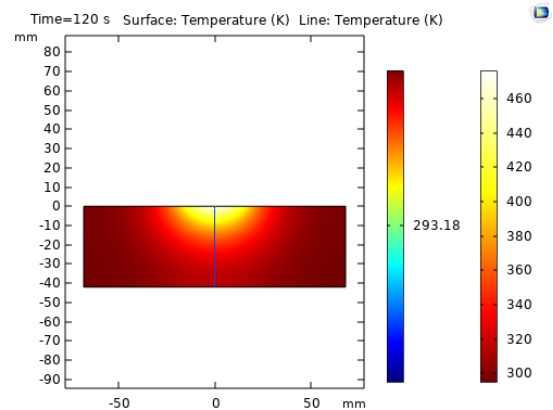


Рис. 7. Теплові поля розподілу температур в тілі холодильника

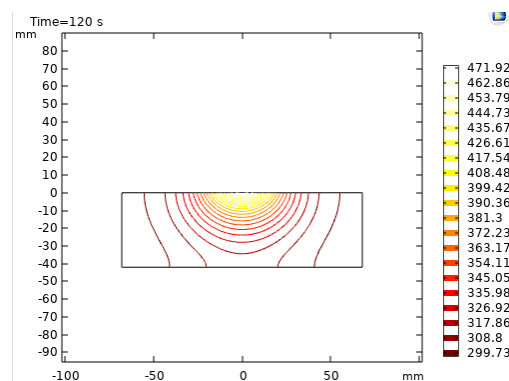


Рис. 8. Ізотермічне представлення розподілу температур в тілі холодильника

Виходячи з наведеного розподілу температур, бачимо, що активний елемент перебуває в області дозволених температур. Тепловідведення від АЕ до холодильника є ефективним, при енерговкладі від 24 діодів накачки. Тобто, АЕ не спотворюється в лінзу та не вносить змін в геометрію резонатора та не спричиняє зміни характеристик лазерного променя в процесі роботи.

### Оцінка характеристик генерованого лазерного променя

Оскільки, за рахунок ефективного охолодження, геометрія АЕ залишається сталою, то можна розглядати резонатор дискового лазера як плоско-сферичний, виходячи з того, що одне з дзеркал резонатора нанесене на плоский торець активного елемента, а інше є виносним сферичним.

Виходячи з властивостей такого резонатора та умови, що фазовий фронт світлового пучка співпадає з поверхнею дзеркала, можна сказати, що горловина пучка, який формується в такому резонаторі лежатиме на плоскому дзеркалі.

Загалом, згідно [4], ІАГ легований ітербієм має наступні характеристики: коефіцієнт підсилення слабкого сигналу  $k_0 = 0,25 \text{ см}^{-1}$ , втрати на неактивне поглинання в АС  $\rho_0 = 0,002 \text{ см}^{-1}$ , торець АС можна просвітити до рівня втрат на френелівське відбиття  $r_{fp} = 0,005$ .

Поширюючись плоско-сферичним резонатором, генерований лазерний промінь двічі проходить активним середовищем, підсилюючись в ньому, двічі на своєму шляху долатиме межу між АС та довколишнім середовищем, відіб'ється від глухого та частково відіб'ється від вихідного дзеркал резонатора. З огляду на це, можна записати баланс потужності для стаціонарної генерації:

$$P(1-r_{fp})^2 e^{2(k-\rho_{ac})l} r r_g = P.$$

Звідси можна вивести вираз для середнього коефіцієнта підсилення:

$$\bar{k} = \rho_{ac} + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{(1-r_{fp})} + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r} + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_g}.$$

А звідси, згрупувавши доданки, одержати вирази для сумарних шкідливих втрат:

$$\rho_{\Sigma} = \rho_{ac} + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{(1-r_{fp})} + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r}$$

та для радіаційних втрат в резонаторі:

$$k_r = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_g}.$$

При використанні схеми накачки показаної на рис. 1, з дискового активного елемента на ІАГ легового ітербієм, діаметром 5 мм та висотою 0,5 мм отримують до 300 Вт потужності [9]. Застосування схеми накачки з використанням еліпсоїдного освітлювача, дозволить збільшити ефективність накачування, отже підвищити інтенсивність насичення ( $I_{нас}$ ) активного середовища і, як наслідок, збільшити генеровану потужність. Очікуваний приріст потужності становить до 20 %.

При чому, не дивлячись на приріст потужності, розбіжність та стала перетворення пучка суттєвих змін не зазнають. Оскільки визначальними для них є геометричні розміри резонатора: довжина  $L$  та радіус кривизни сферичного дзеркала  $R$ , а стабільність цих параметрів забезпечується ефективним охолодженням. Конфокальний параметр резонатора можна обчислити за формулою:

$$z_0 = 2b = 2\sqrt{L(R-L)}.$$

Слід зазначити, що оскільки активний елемент має невелику товщину та ефективно охолоджується, то він не матиме оптичної сили. Однак, розмір його торця буде обмежувальною діафрагмою ( $a$ ) для генерованого пучка та впливатиме на величину його розбіжності, сталої перетворення та на порядок найстаршої моди що вийде в генерацію.

Порядок найстаршої моди визначається за формулою [4]:

$$2p+l+1 = \frac{\pi a^2}{\lambda b} = \frac{\pi a^2}{\lambda \sqrt{L(R-L)}},$$

де,  $p$  та  $l$  – радіальний та азимутальний індекси моди, що виходить в генерацію,  $a$  – радіус діафрагми, що обмежує поперечні розміри пучка,  $b$  – напівконфокальний параметр,  $\lambda$  – довжина хвилі генерації.

Тоді розбіжність лазерного пучка буде:

$$\theta_{pl} = \frac{a}{b} = \frac{a}{\sqrt{L(R-L)}},$$

а стала перетворення:

$$Q = \frac{a^2}{b} = \frac{a^2}{\sqrt{L(R-L)}}.$$

Виходячи з останніх виразів, можна зробити висновки, що, для зменшення значень розбіжності та сталої перетворення, доцільно йти шляхом збільшення радіусу кривизни сферичного дзеркала резонатора. Оскільки зменшення радіусу АЕ призведе до зменшення його об'єму і, як наслідок, до зменшення генерованої потужності, а збільшення довжини резонатора тягне за собою збільшення габаритів лазера.



## Висновки

1. Використання еліпсоїдного освітлювача дозволить вдвічі зменшити кількість відбиттів випромінювання накачки від дзеркальних елементів, а використання діодів накачки на ярусній системі, збільшить ефективність збудження активного елементу і, як наслідок, отримати більшу потужність генерації.

2. Використання нової схеми накачки АЕ зі значною кількістю діодів накачки не призведе до погіршення тепловідведення від активного елементу та не спричинить його спотворення в лінзу.

3. Для отримання малих значень розбіжності генерованого пучка та його сталої перетворення потрібно обирати дзеркало резонатора з більшим радіусом кривизни.

## References

- [1] Z.-W. Fan, Ji-Si Qiu, Zhi-Jun Kang, High beam quality 5 J, 200 Hz Nd: YAG laser system, *Light: Science & Applications* volume 6, pp. 17004, 2017. DOI:10.1038/lsa.2017.4
- [2] R. Lorbeer, B. Ewers, C. Santek, Monolithic thin-disk laser and amplifier concept, *Optica*, Vol. 7, No. 10, pp. 1409–1414, 2020. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.402164>
- [3] S. Feuchtenbeiner, S. Zaske, S. Schad, T. Gottwald, “New generation of compact high power disk lasers”, in *Proc. SPIE 10511, Solid State Lasers XXVII: Technology and Devices*, 105110L, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2289916>
- [4] V.P. Garashchuk, *Fundamentals of laser physics*. (Ukrainian), Kyiv: Pulsary, 2012. pp. 290–294.
- [5] S. Bian, Q. Chen, J. S. Qiu, X. X. Tang, “Simulation design of laser diode array side-pumped polygonal Nd: YAG thin-disk laser”, in *Proc. SPIE 11562, AOPC 2020: Advanced Laser Technology and Application*, 115620W, 2020. <https://doi.org/10.1117/12.2579802>
- [6] Patent US2015270677 МПК H01S 3/091, 3/06, “Optically pumped semiconductor disk laser i.e. vertical cavity surface emitting laser, has reflection element embodied and arranged such that pump light emerging from pump light source is guided through active region”, 25.09.2015.
- [7] Patent US8755416B2 МПК H01S 3/030, “Thin-disk solid state laser for use in field of e.g. shell plate welding on auto body, has semiconductor laser stack group producing pump light that is focused, collimated and deflected within focus cavity to converge on laser crystal”, 17.06.2014.
- [8] K. Schuhmann, T. W. Hansch, K. Kirch, “Thin-disk laser pump schemes for large number of passes and moderate pump source quality”, *Applied Optics*, September 2015. DOI: 10.1364/AO.54.009400
- [9] “Diodenlaser order Scheibenlaser”, *Europaischer Laser Markt*, Branschefuhrer, 2001. pp. 28, 30, 32.
- [10] “3 kW fur neue Markte”, *Euro laser*, Juni 2003. pp. 12–14.

## Modernization of disc laser design using ellipsoid illuminator

O.D. Kaglyak, A.H. Klimova, O.P. Poleshko, O.O. Honcharuk, L.F. Golovko

**Abstract.** Solid state disk lasers have a number of advantages over lasers with a rod active element. In particular, due to efficient heat dissipation, there is no thermal deformation of the active element and its transformation from the optical point of view into a lens. That in turn improves the stability of the generated laser beam and reduces the risk to lose of resonator stability. In addition, disk lasers are able to generate high power at a compact size. However, to ensure the direction of the pump radiation on the active element, disk lasers require a complex mirror system of reflection of the pump beams, and therefore have design limitations on the introduction of pump energy into the active element.

This article is dedicated to the development of the design of pumping system, which will increase the intensity of pumping the active element of the disk laser, which will increase the generated power. The article presents the original design of a disk laser with an ellipsoidal illuminator and a tiered system for pumping the active element by diode laser radiation. The results of modeling the heat dissipation from the active element to the refrigerator are presented. The estimation of the efficiency of excitation of the active element when using an ellipsoidal illuminator and the procedure for calculating the parameters of the generated laser beam are given.

**Keywords:** disk laser, pump radiation, active element.