

УДК 621.3.087.54

## Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем

Ивашко А.М.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Пеленг»,

ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь

<sup>2</sup>НИЦ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета,  
пр. Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь

Поступила 29.05.2017

Принята к печати 24.06.2017

Усовершенствованию характеристик лазеров для использования в измерительных приборах уделяется большое внимание. Одним из перспективных направлений по уменьшению массогабаритных характеристик и энергопотребления для твердотельных лазеров является использование диодной накачки и микрочип-конфигурации резонатора. Увеличение выходной мощности при сохранении качества лазерного пучка для данного класса излучателей затруднительно из-за тепловых эффектов, возникающих в активной среде при увеличении мощности накачки. Целью данной работы было исследование возможности увеличения выходной мощности микрочип-лазера, построенного по принципу мультипликации прокачиваемых зон, при сохранении качества генерируемого лазерного пучка, близкого к дифракционному.

Проведено исследование непрерывного микрочип-лазера с продольной диодной накачкой на основе кристалла Yb:YAG. В представленном лазере излучение от нескольких лазерных диодов фокусируется в отдельные области активного элемента (мультипликация прокачиваемых зон), что позволяет реализовать одновременную генерацию нескольких лазерных пучков. Предметом исследования были энергетические и пространственные характеристики генерируемых лазерных пучков.

Обнаружен эффект взаимного влияния прокачиваемых зон на энергетические и пространственные характеристики отдельного лазерного пучка и, как следствие, на характеристики суммированного излучения. Определены зависимости изменения выходной мощности лазера от расстояния между соседними прокачиваемыми областями и их количеством. При одинаковой мощности накачки мощность отдельного лазерного пучка уменьшается с уменьшением расстояния между прокачиваемыми зонами и при увеличении их количества с одновременным улучшением качества генерируемого лазерного пучка.

Эффект взаимного влияния прокачиваемых зон Yb:YAG микрочип-лазера позволил получить Гауссов профиль интенсивности отдельного лазерного пучка при мощности генерируемого излучения 2 Вт при прокачке четырех зон, что на 30 % больше, чем для случая отсутствия прокачки соседних областей.

**Ключевые слова:** микрочип-лазер, качество лазерного пучка, продольная диодная накачка.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

---

**Адрес для переписки:**

Ивашко А.М.  
ОАО «Пеленг»,  
ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь  
e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

**Address for correspondence:**

Ivashko A.M.  
JSC «Peleng»,  
Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus  
e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

---

**Для цитирования:**

Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.  
Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 3. С. 222–227.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

**For citation:**

Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.  
[Power Scaling in Continuous-Wave Yb:YAG Microchip Laser for Measuring Applications].  
Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 3, pp. 222–227 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

# Power Scaling in Continuous-Wave Yb:YAG Microchip Laser for Measuring Applications

Ivashko A.M.<sup>1</sup>, Kisel V.E.<sup>2</sup>, Kuleshov N.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Peleng»,

Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus

<sup>2</sup>Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University,

Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 29.05.2017

Accepted for publication 24.06.2017

## Abstract

Characteristics optimization of lasers used in different measuring systems is of great interest up to now. Diode-pumped microchip lasers is one of the most perspective ways for development of solid-state light sources with minimal size and weight together with low energy power consumption. Increasing of output power with good beam quality is rather difficult task for such type of lasers due to thermal effects in the gain crystal under high pump power.

The investigation results of continuous-wave longitudinally diode-pumped Yb:YAG microchip laser are presented. In the presented laser radiation from multiple pump laser diodes were focused into the separate zone in one gain crystal that provides simultaneous generation of multiple laser beams. The energy and spatial laser beam characteristics were investigated.

Influence of neighboring pumped regions on energy and spatial laser beams parameters both for separate and for sum laser output was observed. The dependences of laser output power from distance between neighboring pumped regions and their number were determined. Decreasing of laser output power was demonstrated with corresponding distance shortening between pumped regions and increasing their quantity with simultaneous improvement of laser beam quality.

Demonstrated mutual influence of neighboring pumped regions in the longitudinally diode pumped Yb:YAG microchip laser allow as to generate diffraction limited Gaussian beam with 2W of continuous-wave output power that 30 % higher than in case of one pumped zone.

**Keywords:** microchip laser, quality of the laser beam, longitudinally diode pumping.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

---

### Адрес для переписки:

Ивашко А.М.

ОАО «Пеленг»,

ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

### Address for correspondence:

Ivashko A.M.

JSC «Peleng»,

Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

---

### Для цитирования:

Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.

Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 222–227.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

### For citation:

Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.

[Power Scaling in Continuous-Wave Yb:YAG Microchip Laser for Measuring Applications].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 222–227 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

## Введение

Свойства лазерного излучения позволяют значительно улучшить характеристики существующих приборов и разрабатывать новые, параметры которых не могут быть получены при использовании обычных источников света. В измерительных приборах, где необходимо сосредоточить энергию излучения в небольшом телесном угле и узком спектральном интервале, преимущество использования лазеров в качестве источника излучения очевидно: повышается чувствительность прибора, упрощается оптическая система приборов, значительно упрощается интерпретация полученной информации [1]. Поэтому уделяется большое внимание разработке лазеров для измерительных приборов и усовершенствованию их характеристик, в частности снижению массогабаритных характеристик и энергопотребления.

Твердотельные лазеры достаточно часто применяются в измерительной технике [2–6], например в лазерно-индуцированной плазменной спектроскопии (*LIPS*), мониторинге окружающей среды, дальнометрии, определении оптических характеристик материалов и др. Одним из перспективных направлений по уменьшению массогабаритных характеристик и энергопотребления для твердотельных лазеров является использование диодной накачки в сочетании с микрочип конфигурацией резонатора [7]. На пространственный профиль генерируемого излучения для большинства микрочип-лазеров значительное влияние оказывают тепловые эффекты [8]. Поэтому масштабирование выходной мощности в широких пределах при необходимости получения близкой к дифракционной расходимости и Гауссова пространственного профиля лазерного пучка, что соответствует генерации на основной  $TEM_{00}$  моде, для данного класса лазеров является затруднительным. При увеличении мощности накачки для повышения выходной мощности из-за тепловых эффектов диаметр фундаментальной моды становится значительно меньше, чем диаметр пучка накачки, и происходит переход в многомодовый режим генерации [7] с соответствующим снижением пространственного качества излучения.

В нашей предыдущей работе [9] для реализации измерительного прибора для определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов описан компактный микрочип-лазер с диодной накачкой на основе кристалла

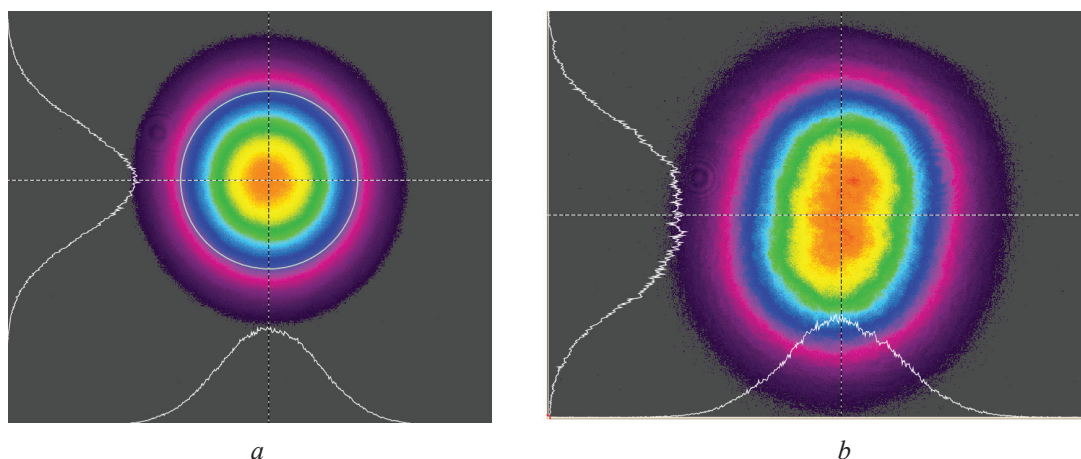
Yb:YAG, построенный по принципу мультипликаций прокачиваемых зон [10] и генерирующий два осесимметричных лазерных пучка с максимальной выходной мощностью 1,5 Вт на каждый пучок при сохранении Гауссова пространственного профиля. Целью данной работы было расширение возможности применения разработанного лазера в измерительной технике и в других прикладных сферах за счет увеличения его выходной мощности при сохранении качества генерируемого лазерного пучка, близкого к дифракционному.

## Основная часть

Принцип построения микрочип-лазера и его элементная база при исследованиях, результаты которых приведены в данной работе, аналогичны излучателю из работы [9]: излучение от нескольких лазерных диодов накачки с волоконным выводом фокусировалось с помощью оптической системы в отдельные, пространственно независимые друг от друга области активного элемента Yb:YAG, на торцах которого нанесены зеркала резонатора, являющиеся общими для всех прокачиваемых зон, в результате чего реализуется генерация нескольких лазерных пучков, количество которых равно количеству пучков накачки.

При прокачке только одной области микрочип-лазера при превышении уровня выходной мощности 1,5 Вт наблюдался переход в многомодовый режим генерации, что приводило к росту расходимости излучения и отступлению от Гауссова пространственного профиля, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на применимости разработанного излучателя в приложениях, требующих более высокой мощности. Пространственный профиль пучка генерации при мощности  $P_{\text{вых}} = 1,5$  Вт и 2 Вт (в отдельном лазерном пучке) показан на рисунке 1.

При увеличении количества лазерных диодов накачки, а соответственно, и количества прокачиваемых областей при их одновременном включении было обнаружено влияние прокачиваемых зон друг на друга и на характеристики генерируемого излучения. В описанном ранее в работе [9] излучателе, в котором использовалось два лазерных диода накачки, данный эффект не был зафиксирован, т.к. излучатель предполагал поочередное задействование прокачиваемых областей и использование генерируемых лазерных пучков по отдельности.



**Рисунок 1** – Пространственный профиль лазерного пучка в отсутствие прокачки соседних областей:  $a - P_{\text{вых}} = 1,5$  Вт;  $b - P_{\text{вых}} = 2,0$  Вт

**Figure 1** – Spatial shape of single laser beam without adjacent zone pumping:  $a - P_{\text{out}} = 1,5$  W;  $b - P_{\text{out}} = 2,0$  W

Было установлено, что задействование соседних прокачиваемых зон оказывает влияние на энергетические характеристики отдельного лазерного пучка. Для удобства интерпретации взаимного влияния прокачиваемых зон на энергетические характеристики суммированного излучения нами был введен коэффициент влияния  $K_n$ , определяемый как:

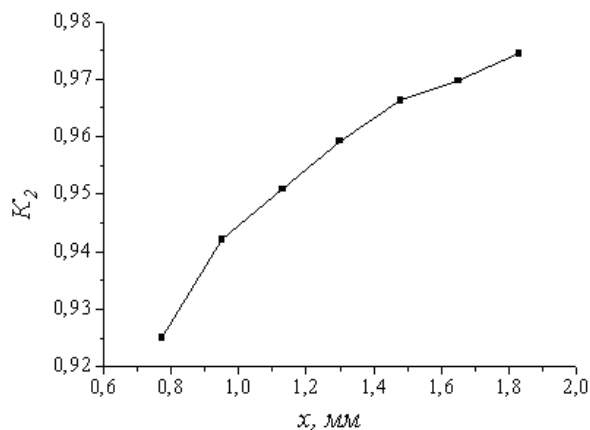
$$K_n = \frac{P_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n P_i},$$

где  $n$  – количество прокачиваемых областей;  $P_{\Sigma}$  – суммарная генерируемая мощность при прокачке  $n$  зон одновременно;  $P_i$  – мощность отдельного лазерного пучка в отсутствие прокачки соседних зон.

Если прокачиваемые зоны не влияют друг на друга, то коэффициент  $K_n = 1$ .

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента  $K_2$  при прокачке двух областей от расстояния  $x$  между центрами прокачиваемых зон при  $P_i = 2,0$  Вт (для других значений  $P_i$  характер зависимости в количественном и качественном выражении был практически идентичным).

Ожидается, что влияние на выходную мощность уменьшается при увеличении расстояния между прокачиваемыми зонами. Поэтому необходимо удалять прокачиваемые области друг от друга на максимально возможное конструктивно и технологически расстояние для снижения эффекта взаимного влияния на энергетические характеристики.

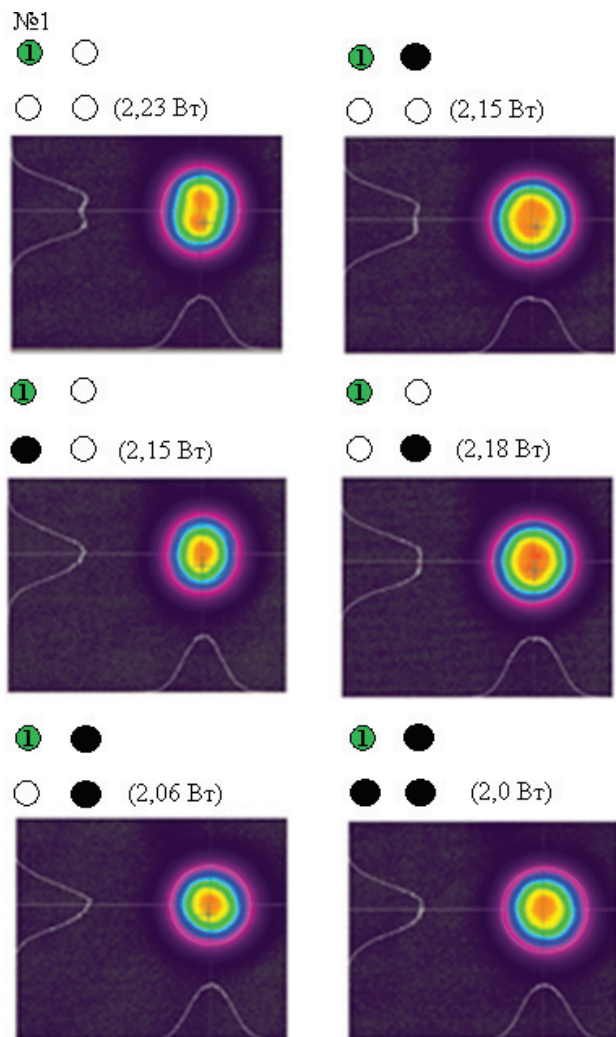


**Рисунок 2** – Зависимость коэффициента влияния  $K_2$  от расстояния  $x$  между прокачиваемыми областями

**Figure 2** – Dependence of coefficient  $K_2$  from spacing  $x$  between two pumped regions

Кроме эффекта влияния прокачиваемых областей друг на друга, выражающегося в изменении мощности генерируемого излучения, был обнаружен эффект взаимного влияния прокачиваемых зон на пространственные характеристики генерируемого излучения.

На рисунке 3 показана эволюция пространственного профиля отдельного лазерного пучка (прокачиваемая зона № 1) при прокачке соседних зон в различных комбинациях. В скобках указана мощность лазерного пучка от прокачиваемой зоны № 1. Соседняя с зоной № 1 активная прокачиваемая область на рисунке 3 условно показана черным кругом. Пространственное расположение осей прокачиваемых областей внутри активного элемента в его поперечном сечении соответствовало вершинам квадрата с диагональю 1,4 мм.



**Рисунок 3** – Эволюция пространственного профиля отдельного лазерного пучка при прокачке соседних зон в различных комбинациях

**Figure 3** – Evolution of spatial shape of single laser beam for various combination of neighboring pumped regions

Для пространственного профиля отдельного лазерного пучка при одновременной прокачке четырех зон было характерно Гауссово распределение интенсивности, что эквивалентно генерации на основной  $TEM_{00}$  моде ( $M^2$ -фактор менее 1,2).

Значения мощности отдельного лазерного пучка при различных комбинациях прокачиваемых зон из эксперимента, результаты которого приведены на рисунке 3, позволяют определить зависимость коэффициента влияния  $K_n$  от количества прокачиваемых зон, которая близка к функции вида:

$$K_n = (K_2)^{n-1},$$

где  $K_n$  – суммарный коэффициент влияния при прокачке  $n$  зон ( $n \geq 2$ );  $K_2$  – коэффициент влияния при прокачке двух зон.

Предположительно физической основой эффектов взаимного влияния отдельных прокачиваемых зон в активной среде является изменение распределения температуры в окрестности прокачиваемых областей, что приводит к изменению профиля показателя преломления в областях генерации и снижению величины aberrаций локально наведенной термолинзы.

Таким образом, прокачка соседних зон Yb:YAG микрочип-лазера позволила получить Гауссов профиль интенсивности отдельного лазерного пучка при мощности генерируемого излучения 2 Вт при прокачке четырех зон, что на 30 % больше, чем для случая отсутствия прокачки соседних областей. Дальнейшее увеличение выходной мощности при прокачке соседних областей приводило к распределению интенсивности, которое близко к П-образному, при этом не наблюдалось астигматизма в распределении и локальных провалов плотности мощности по всему поперечному сечению лазерного пучка.

## Заключение

Установлено взаимное влияние соседних прокачиваемых зон на энергетические и пространственные характеристики отдельного лазерного пучка и, как следствие, на характеристики суммированного излучения для Yb:YAG микрочип-лазера, построенного по принципу мультипликации прокачиваемых областей. Определена зависимость изменения выходной мощности излучателя от расстояния между соседними прокачиваемыми областями и их количеством. Обнаружен эффект взаимного влияния прокачиваемых зон на пространственные характеристики генерируемого излучения. Установлено, что изменение суммарного пространственного распределения интенсивности обусловлено изменением пространственного профиля отдельного лазерного пучка при наличии прокачки соседних зон.

Эффект взаимного влияния прокачиваемых зон Yb:YAG микрочип-лазера позволил получить Гауссов профиль интенсивности отдельного лазерного пучка при мощности генерируемого излучения 2 Вт при прокачке четырех зон, что на 30 % больше, чем для случая отсутствия прокачки соседних областей. Это позволяет расширить возможности практического применения излучателя в измерительной технике.

## Список использованных источников

1. Андреев, А.Н. Оптические измерения / А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов, Г.Г. Ишанин. – М. : Логос, 2008. – 416 с.
2. Gornushkin, I.B. Microchip laser-induced breakdown spectroscopy: preliminary feasibility investigation / I.B. Gornushkin [et al.] // *Appl. Spectrosc.* – 2004. – No. 58. – P. 762–769.
3. Hoehse, M. Assessment of suitable diode pumped solid state lasers for laser induced breakdown and Raman spectroscopy / M. Hoehse, I. Gornushkin, S. Merk, U. Panne // *J. Anal. At. Spectrom.* – 2011. – No. 26. – P. 414–424.
4. Moulton, P. Recent Advances in Solid State Lasers and Nonlinear Optics for Remote Sensing / P. Moulton [et al.] // *Proceedings of SPIE.* – 2003. – Vol. 4893. – P. 193–202.
5. Nejad, S.M. Low-Noise High-Accuracy TOF Laser Range Finder / S.M. Nejad, S. Olyaei // *American Journal of Applied Sciences.* – 2008. – No. 5 (7). – P. 755–762.
6. Karavanskii, V.A. Linear and nonlinear optical properties of gold-doped porous glass / V.A. Karavanskii, V.I. Krasovskii // *Proc. of SPIE.* – 2006. – Vol. 6344. – 63442M-1 (6 p.).
7. Denker, B. Handbook of solid-state lasers. Materials, systems and applications / B. Denker, E. Shklovsky. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. – 660 p.
8. Zayhowski, J. Thermal guiding in microchip lasers / J. Zayhowski, H. Jenssen, G. Dube // *OSA Proc. Advanced Solid-State Lasers.* – 1991. – No. 6. – P. 9–13.
9. Ивашко, А.М. Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов / А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов // *Приборы и методы измерений.* – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 49–54.
10. Осветительная система : пат. 19694 Респ. Беларусь, МПК G 02 F 1/01 / В.В. Батюшков [и др.]; заявитель ОАО «Пеленг». – № а20121492 ; заявл. 26.10.2012 ; опубл. 30.06.2014 // *Официальный бюл. / Нац. центр интелект. собственности.* – 2014. – 6 с.

## References

1. Andreev A.N. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Logos Publ., 2008, 416 p.
2. Gornushkin I.B., Amponsah-Manager K., Smith B.W., Omenetto N., Winefordner J.D. Microchip laser-induced breakdown spectroscopy: preliminary feasibility investigation. *Appl. Spectrosc.*, 2004, no. 58, pp. 762–769. doi: 10.1366/0003702041389427
3. Hoehse M., Gornushkin I., Merk S., Panne U. Assessment of suitable diode pumped solid state lasers for laser induced breakdown and Raman spectroscopy. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2011, no. 26, pp. 414–424. doi: 10.1039/C0JA00038H
4. Moulton P., Dergachev A., Isyanova Y., Pati B., Rines G. Recent Advances in Solid State Lasers and Nonlinear Optics for Remote Sensing. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4893, pp. 193–202. doi: 10.1117/12.466664
5. Nejad S.M., Olyaei S. Low-Noise High-Accuracy TOF Laser Range Finder. *American Journal of Applied Sciences*, 2008, no. 5 (7), pp. 755–762. doi: 10.3844/ajassp.2008.755.762
6. Karavanskii V.A., Krasovskii V.I. Linear and nonlinear optical properties of gold-doped porous glass. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6344, 63442M-1 (6 p.). doi: 10.1117/12.693656
7. Denker B., Shklovsky E. Handbook of solid-state lasers. Materials, systems and applications. Cambridge, Woodhead Publishing, 2013, 660 p.
8. Zayhowski J., Jenssen H., Dube G. Thermal guiding in microchip lasers. *OSA Proc. Advanced Solid-State Lasers*, 1991, no. 6, pp. 9–13.
9. Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V. [Method for determination of focal plane location of focusing components]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 49–54 (in Russian). doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54
10. Batyshkov V.V., Vasilieva I.V., Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Kurilchik S.V., Litviakov S.B., Nemenenok A.I., Tareev A.M. *Osvetlitel'naya sistema* [Illumination system]. Patent BY, no. 19694, 2012.