

УДК 621.378.535

## Селекция моды $TEM_{00}$ в двухзеркальном выпукло-вогнутым резонаторе газового лазера на ионах ArII и ArIII

А.Г. Мальцев, И.А. Мальцев, С.М. Зверев

*В настоящей работе рассчитана и экспериментально исследована селекция поперечной моды в широкоапертурном лазере на ионах ArII и ArIII с двухзеркальным выпукло-вогнутым резонатором. Получена генерация в основном типе колебаний, моде  $TEM_{00}$  в видимой области спектра на линиях с  $\lambda=476,5, 514,5$  нм мощностью  $W=43$  Вт и в ультрафиолетовой области спектра на линиях с  $\lambda=334, 364$  нм мощностью  $W=12$  Вт. Показано, что выпукло-вогнутый резонатор обладает более лучшими селективными свойствами, чем телескопический резонатор, а также более прост и удобен в эксплуатации.*

PACS: 42.55.Lt

*Ключевые слова:* аргоновый ионный лазер, выпукло-вогнутый резонатор, селекция мод, ультрафиолетовое излучение.

### Введение

Газовые лазеры на ионах ArII, ArIII, KrII и KrIII перекрывают широкую область оптического спектра и являются самыми мощными источниками непрерывного лазерного излучения в видимом и ультрафиолетовом диапазонах оптического спектра. Эти лазеры имеют большие потенциальные возможности в разработке передовых методов научных исследований и практическую ценность в разработке лазерных технологий. По этим причинам проблема получения качественного равномерного гауссова распределения оптической энергии по поперечному сечению луча лазера, которым обладает мода  $TEM_{00}$ , в настоящее время является актуальной задачей.

Для генерации больших мощностей излучения применяют максимально возможные диаметры до  $\approx 16$  мм дуговых разрядных каналов, т.к. мощность на единицу длины пропорциональна диаметру разрядного канала [1]. Лазеры с разрядными каналами больших диаметров, с обычным устойчивым двухзеркальным плоско-вогнутым резонатором, обладают многомодовым составом излучения. Поперечный размер моды  $TEM_{00}$  в таких резонаторах  $w \approx \sqrt{\lambda L} \sim 1$  мм гораздо меньше диаметров разрядных каналов ионных лазеров. Поэтому основную часть разрядного канала занимают

моды высших порядков. С целью преобразования энергии излучения мод высших порядков в моду  $TEM_{00}$  применялись трех и четырехзеркальные телескопические резонаторы большой эффективной длины, но обладающие малым числом Френеля  $F \approx 2-3$  [1]. При помощи телескопических резонаторов, эквивалентных плоскопараллельным, увеличивался объем основной поперечной моды  $TEM_{00}$  в инверсной среде. Таким образом осуществлялась селекция моды  $TEM_{00}$ . Коэффициент преобразования многомодового излучения в моду  $TEM_{00}$  в этих резонаторах составлял 40%. Диаметр генерируемого луча внутри резонатора, в его телескопической части, не превышал 2 мм. В результате диэлектрические покрытия зеркал не выдерживали большой мощности оптического поля и выходили из строя.

В настоящей работе для селекции моды  $TEM_{00}$  был применен двухзеркальный выпукло-вогнутый резонатор, в котором коэффициент преобразования многомодового состава излучения в моду  $TEM_{00}$  достигает 69%.

### Параметры каустики выпукло-вогнутых резонаторов

В выпукло-вогнутых резонаторах селекция моды  $TEM_{00}$  происходит в далекой от перетяжки расширяющейся части гауссова пучка [2]. Расстояние от перетяжки пучка до зеркала  $R_2$  принято считать эффективной длиной  $L_{\text{eff}}$ , т.е.  $L_{\text{eff}} \sim R_2 \approx -R_1$  (рис. 1). Большой коэффициент преобразования многомодового состава излучения в моду  $TEM_{00}$  достигается при выполнении условия  $w \approx \sqrt{\lambda L} \sim d$ , где  $w$  — диаметр моды  $TEM_{00}$ ,  $d$  — диаметр разрядного канала.

Мальцев Александр Григорьевич, старший научный сотрудник.

Мальцев Игорь Александрович, научный сотрудник.

Зверев Сергей Михайлович, студент.

Белорусский национальный технический университет.

Беларусь, 220013, Минск, пр-т Независимости, 65.

Тел.: +375 29 55 12832. E-mail: regphys@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25 мая 2014 г.

Мальцев А.Г., Мальцев И. А., Зверев С.М., 2014

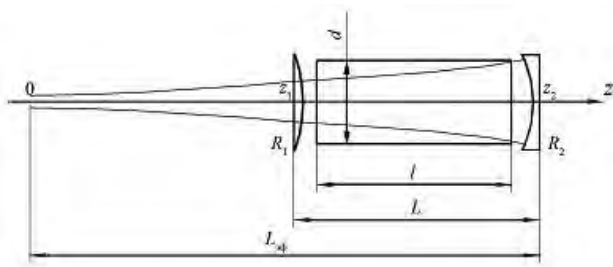


Рис. 1. Схема выпукло-вогнутого резонатора для расчета кривизны зеркал.

Для  $d = 7\text{мм}$  условие  $w \cong \sqrt{\lambda L_{eff}}$  выполняется при  $R_2 = 14\text{ м}$  и  $R_1 = -13\text{ м}$ , причем эти значения намного больше расстояния между зеркалами  $L$ . Далее представлен расчет параметров резонатора с указанными радиусами кривизны зеркал и результаты эксперимента, демонстрирующего высокую эффективность селекции (до 70%) моды  $TEM_{00}$  выпукло-вогнутого резонатора [3].

Воспользуемся приближением гауссовых пучков [4] и приведем расчет параметров каустики выпукло-вогнутого резонатора.

$$w(z) = 2w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}$$

$$\rho(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $w$  — диаметр пучка,  $w_0$  — радиус пучка в перетяжке,  $\rho$  — радиус кривизны волнового фронта пучка.

Введем обозначения:

$R_1$  — радиус кривизны выпуклого зеркала (рис. 1),

$R_2$  — радиус кривизны вогнутого зеркала,

$L$  — длина резонатора.

Тогда из системы уравнений:

$$R_1 = -z_1 \left[ 1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z_1}\right)^2 \right]$$

$$R_2 = z_2 \left[ 1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z_2}\right)^2 \right]$$

$$L = z_2 - z_1$$

получаем:

$$z_1 = L \frac{R_2 - L}{2L - R_1 - R_2}$$

$$z_2 = L_{eff} = L \frac{L - R_1}{2L - R_1 - R_2} \quad (2)$$

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{\sqrt{L(L - R_1)(L - R_2)(L - R_1 - R_2)}}{2L - R_1 - R_2}$$

После подстановки этих выражений в формулы (1) для диаметров пучка  $w_1$  и  $w_2$ , получаем размеры каустики на зеркалах резонатора:

$$w_1 = 2\sqrt{\frac{\lambda(-R_1)}{\pi}} \left( \frac{R_2 - L}{L - R_1} \frac{L}{L - R_1 - R_2} \right)^{1/4} \quad (3)$$

$$w_2 = 2\sqrt{\frac{\lambda R_2}{\pi}} \left( \frac{L - R_1}{R_2 - L} \frac{L}{L - R_1 - R_2} \right)^{1/4} \quad (4)$$

Чтобы увеличить диаметры каустик на зеркалах резонатора, т.е. увеличить объем моды  $TEM_{00}$ , надо увеличить эффективную длину резонатора. Это можно сделать соответствующим расчетом кривизны зеркал  $R_1$  и  $R_2$ .

Из графика на рис. 2 видно, что при радиусе кривизны плотного вогнутого зеркала  $R_2 = 14\text{ м}$  наибольший диаметр каустики на выходном зеркале  $R_1$  будет при наименьшем радиусе кривизны этого зеркала с сохранением устойчивости резонатора. Из формул (3) и (4) видно, что резонатор устойчив, когда  $L - R_1 - R_2 > 0$ . С радиусом кривизны выходного зеркала  $R_1 = -13\text{ м}$  наибольший диаметр каустики на этом зеркале будет при наибольшем радиусе кривизны плотного зеркала  $R_2$  с сохранением устойчивости резонатора.

Из рис. 2 видна сильная зависимость диаметров каустики от длины резонатора  $L$ . На границе устойчивости диаметры каустик на зеркалах обращаются в бесконечность. В случае, когда  $R_2 = -R_1 = R$ , формулы (3) и (4) упрощаются и принимают вид:

$$w_1 = 2\sqrt{\frac{\lambda R}{\pi}} \cdot \left(\frac{R - L}{R + L}\right)^{1/4}$$

$$w_2 = 2\sqrt{\frac{\lambda R}{\pi}} \cdot \left(\frac{R + L}{R - L}\right)^{1/4}$$

На рис. 3 приведены графики зависимости диаметров каустик на плотном зеркале  $R_2$  и полупрозрачном зеркале  $R_1$  для радиусов сфер зеркал резонаторов, в которых  $R_2 = -R_1 = R$  для видимой и ультрафиолетовой об-

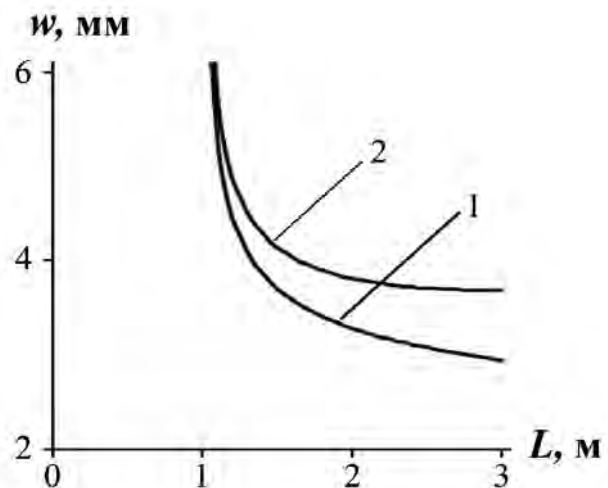


Рис. 2. Графики зависимости диаметров каустик на зеркалах  $R_1 = -13\text{ м}$  (кривая 1) и  $R_2 = 14\text{ м}$  (кривая 2) от длины  $L$  выпукло-вогнутого резонатора.

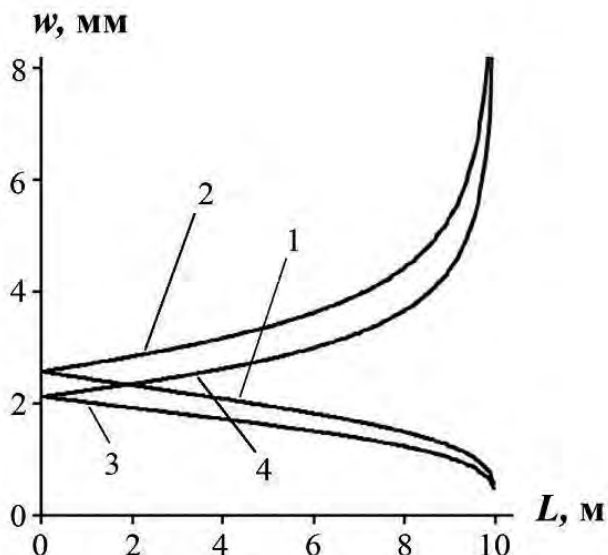


Рис. 3. Графики зависимости диаметров каустик на зеркалах от длины  $L$  выпукло-вогнутого резонатора при  $R_1 = -10$  м,  $R_2 = 10$  м: кривые 1, 2 — для  $l = 514,5$  нм; кривые 3, 4 — для  $l = 351,1$  нм.

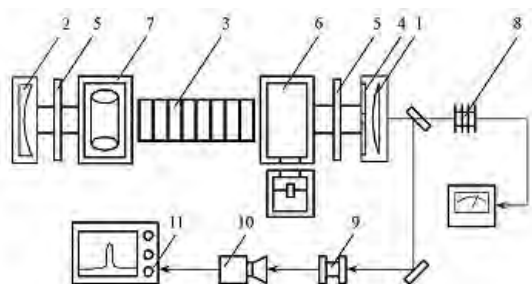


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 — выпуклое полупрозрачное зеркало; 2 — плотное вогнутое зеркало; 3 — разрядный канал лазера; 4 — диафрагма; 5 — магнитная шторка; 6 — катодный узел; 7 — анодный узел; 8 — измеритель мощности; 9 — сканирующий интерферометр; 10 — фотоприемное устройство; 11 — анализатор спектра.

ласти оптического спектра. Расчет проводился для радиусов кривизны зеркал  $R_1 = -10$  м,  $R_2 = 10$  м, с длиной резонатора 1,46 м. Согласно приведенным формулам диаметр каустики на зеркале  $R_1$  равен 2,4 мм (график 1, рис.3), на зеркале  $R_2$  диаметр каустики был равен 2,7 мм (график 2, рис.3) для видимой области спектра. Для ультрафиолетовой области спектра диаметр каустики на зеркале  $R_1$  равен 1,9 мм (график 3, рис.3) и на зеркале  $R_2$  диаметр каустики равен 2,1 мм (график 4, рис.3). Расчеты показали, что зеркала с одинаковыми радиусами сфер для резонатора с  $L = 146$  см образуют меньшие диаметры каустик, следовательно, такой резонатор менее эффективен.

### Эксперимент

На рис. 4 приведена блок-схема газового лазера на ионах ArII. Резонатор образован двумя внутренними выпукло-вогнутыми зеркалами 1 и 2. Перед выпуклым полупрозрачным зеркалом

1 устанавливалась диафрагма 4 диаметром 5 мм. Разрядный канал лазера 4 имеет диаметр 7 мм и собран в наборе отдельных секций аналогично работам [1, 5]. Эксперименты по селекции моды  $TEM_{00}$  видимого и ультрафиолетового диапазонов излучения проводились с длиной разрядного канала лазера 90 см. Такая длина разрядного канала обеспечивает продольную однородность разряда и одинаковый коэффициент усиления по всей длине разрядной трубки. Для выравнивания давления газа по длине дугового разряда осуществлялась непрерывная прокачка газа от катода к аноду.

Длина резонатора экспериментального лазера составляла  $L = 146$  см. При этом эффективная длина резонатора  $L_{eff}$ , рассчитанная по формуле для  $z_2$ , составляла 11 м. Расчетный оптимальный радиус кривизны полупрозрачного зеркала 1 на рис. 4 с выпуклой поверхностью  $R_1 = -13$  м. Расчетный радиус кривизны плотного вогнутого зеркала 2 на рис. 4 с вогнутой поверхностью  $R_2 = 14$  м. Расчетный диаметр каустики  $w_1$  видимого диапазона спектра на  $\lambda = 488-514,5$  нм на зеркале  $R_1$  равен 3,8 мм (кривая 1, рис.2). На плотном зеркале  $R_2$  диаметр каустики  $w_2$  видимого диапазона спектра равен 4,2 мм (кривая 2 рис. 2). Эффективная длина  $L_{eff}$  согласно формуле (4) равна 11 м.

Обычный двухзеркальный плоско-вогнутый полуконфокальный резонатор с аналогичными свойствами имел бы длину  $L = 11$  м с радиусом кривизны зеркала 22 м, что неприемлемо на практике.

Эксперимент показал, что в выпукло-вогнутом резонаторе с эффективной длиной  $L_{eff} = 11$  м осуществляется селекция только основного поперечного типа колебаний моды  $TEM_{00}$ .

Для лазера на ионах ArII-ArIII с диаметром разрядного канала  $d = 7$  мм и длиной  $l = 90$  см, работающего в режиме насыщения мощности генерации по току разряда, для селекции моды  $TEM_{00}$  необходимо, чтобы число Френеля  $F$  не превышало 2,3 единиц [1].

Используем известное выражение для определения числа Френеля экспериментального лазера:

$$F = \frac{d^2}{4\lambda L_{eff}}$$

В нашем эксперименте число Френеля  $F = 1,14$ . Таким образом, наблюдается хорошее согласие эксперимента с литературными данными.

Измерения диаметров каустики на зеркалах в процессе генерации лазера выявили отличие от расчетных данных. На полупрозрачном зеркале  $R_1$  диаметр каустики генерируемого луча  $w_1$  на  $\lambda = 488-514,5$  нм был равен 4,5 мм. На плотном зеркале  $R_2$  диаметр каустики  $w_2$  видимого диапазона спектра был равен 6 мм.

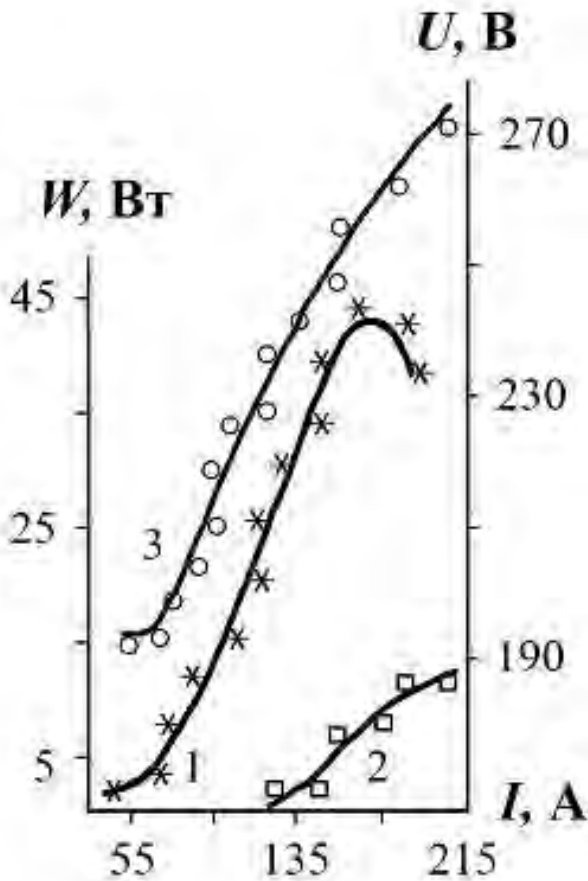


Рис. 5. Зависимость мощности генерации  $W$ : на  $\lambda=476,5 \div 514,5$  нм — кривая 1; на  $\lambda=334 \div 364$  нм — кривая 2, от величины тока разряда  $I$ . Вольтамперная характеристика разряда — кривая 3.

В эксперименте для получения одной линии генерации на  $\lambda = 514,5$  нм использовались селективные зеркала. Мощность излучения на  $\lambda = 514,5$  нм в моде  $TEM_{00}$  достигала 18 Вт. Модовый состав излучения лазера анализировался десятисантиметровым сканирующим интерферометром Фабри-Перо 9 (см. рис. 4) и контролировался визуально, а именно, излучение направлялось через линзу на экран. Коэффициенты пропускания для зеркал  $R_1$  и  $R_2$  для линии  $\lambda = 514,5$  нм были равны  $\tau_1 = 7\%$  и  $\tau_2 = 0,2\%$  и значительно больше для всех остальных линий видимого диапазона.

Максимальная мощность излучения  $W = 43$  Вт в моде  $TEM_{00}$  в видимой области спектра была получена с широкополосными зеркалами на линиях с  $\lambda = 476,5 \div 514,5$  нм [3]. Максимальная мощность излучения  $W = 12$  Вт в моде  $TEM_{00}$  в ультрафиолетовой области спектра была получена также с широкополосными зеркалами на линиях с  $\lambda = 334 \div 364$  нм. Коэффициенты пропускания зеркал  $R_1$  и  $R_2$  в ультрафиолетовой области спектра были равны  $\tau_1 = 2\%$  и  $\tau_2 = 0,3\%$ .

Суммарная мощность многомодового состава излучения в видимой области спектра на пяти линиях генерации в плоско-вогнутом резонаторе

с зеркалами  $R_1 = \infty$  и  $R_2 = 14$  м с диаметром разрядного канала  $d = 7$  мм и длиной  $l = 90$  см достигала 62 Вт.

Таким образом, коэффициент преобразования многомодового излучения в моду  $TEM_{00}$  в выпукло-вогнутом резонаторе составляет  $\sim 69\%$ .

Из графика 1 (рис. 5) видно, что генерация лазерного излучения в видимой области спектра начиналась при величине разрядного тока 45 А. Максимальная мощность излучения в видимой области спектра в моде  $TEM_{00}$  достигалась при величине разрядного тока 170 А. При дальнейшем увеличении тока дугового разряда до 180–190 А происходило уменьшение мощности излучения лазера видимого диапазона спектра на  $\lambda = 476,5 \div 514,5$  нм. Таким образом, величины токов дугового разряда 180–190 А, для диаметра разрядного канала  $d = 7$  мм, являются насыщающими значениями в лазере на ионах  $ArII$ . Характерно, что в ультрафиолетовой области спектра (график 2, рис. 5) генерация на ионах  $ArIII$  на  $\lambda = 334 \div 364$  нм начиналась при величине разрядного тока  $I = 120$  А, в отличие от видимой области спектра с началом генерации при токе  $I = 45$  А.

В ультрафиолетовой области спектра при генерации излучения на ионах  $ArIII$  насыщающих значений величины разрядного тока получить не удалось, так как до наибольшей величины разрядного тока, которую мог выдержать источник питания дугового разряда, мощность генерации увеличивалась. В процессе эксперимента выяснилось, что во время генерации видимого диапазона излучения лазера на ионах  $ArII$ , при плотностях разрядного тока больше насыщающих значений, однократно ионизированные атомы  $ArII$  переходят в двукратно ионизированные атомы  $ArIII$ . Очевидно, что этот переход является причиной уменьшения мощности генерации видимого диапазона излучения лазера на ионах  $ArII$  при величинах разрядного тока  $I$  больше насыщающих значений.

### Заключение

В данной работе проведены исследования по селекции основного типа колебаний — моды  $TEM_{00}$  с помощью двухзеркальных выпукло-вогнутых резонаторов в широкоапертурном газовом лазере на ионах  $ArII$ . Показано, что полученная эффективность преобразования  $\sim 69\%$  общей мощности излучения в одну моду  $TEM_{00}$  значительно превосходит эффективность преобразования многомодового состава излучения в применяемых ранее трех и четырехзеркальных телескопических резонаторах [1].

В процессе работы выяснилось, что в двухзеркальных выпукло-вогнутых резонаторах площади

каустики на зеркалах в четыре раза больше, чем в многозеркальных телескопических резонаторах. Это значит, что диэлектрические покрытия зеркал выпукло-вогнутого резонатора способны выдерживать гораздо большую нагрузку мощных оптических полей ионных газовых лазеров. Такие резонаторы открывают возможность получения мощной генерации в основном типе колебаний — моде  $TEM_{00}$  в непрерывных газовых лазерах с большим объемом инверсной среды.

Ввиду того, что двухзеркальные резонаторы менее критичны к разъюстировке и обладают меньшими потерями на оптических элементах, получена мощная генерация  $W = 12$  Вт в моде  $TEM_{00}$  в ультрафиолетовом диапазоне оптического спектра на линиях  $\lambda = 334\div 364$  нм.

## Литература

1. Донин В.И. Мощные ионные газовые лазеры. — Новосибирск: «Наука», 1991.
2. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. — М.: «Наука», 1990.
3. Мальцев А.Г., Мальцев И.А. // Материалы Десятой международной научно-технической конференции «Наука — образованию, производству, экономике». 2012. Т. 3. С. 377. — Минск: БНТУ.
4. Nosov P.A., Pakhomov I.I., Shirankov A.F. // *Physics of Wave Phenomena*. 2011. V. 19. No.3. P. 202.
5. Мальцев А.Г. // ПТЭ. 1979. № 4. С. 233.

## Selection of $TEM_{00}$ mode in two-mirror convex-concave cavity of ArII and ArIII ion gas laser

A. G. Maltsev, I. A. Maltsev, and S. M. Zverev

Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty av., Minsk, 220013, Republic of Belarus

E-mail:

ia-maltsev@yandex.ru

Received May 25, 2014

*The paper presents calculation and experimental investigations of transverse mode selection in wide-aperture ArII and ArIII ions laser with a two-mirror convex-concave cavity. Lasing in the main oscillation mode,  $TEM_{00}$  mode, in the visible region of the spectrum lines with  $l=476,5\div 514,5$  nm capacity  $W=43$  W and in the ultraviolet region of the spectrum lines with  $l=334\div 364$  nm output  $W=12$  W has been obtained in the paper. It has been shown that a convex-concave cavity has better selection properties than telescopic resonator and it is easier and more convenient to operate.*

PACS: 42.55.Lt

*Keywords:* argon ion laser, convex-concave cavity, mode selection, ultraviolet radiation.

## References

1. V. I. Donin, *Powerful Ion Gas Lasers* (Nauka, Novosibirsk, 1991) [in Russian].
2. Yu. A. Anan'ev, *Optical Resonators and Laser Beams* (Nauka, Moscow, 1990) [in Russian].
3. A. G. Maltsev and I. A. Maltsev, in *Proceedings of the X International Conference «Science to*

*Education, Production, and Economics'* (Minsk, BNTU, 2012). Vol. 3, p. 377.

4. P. A. Nosov, I. I. Pakhomov, and A. F. Shirankov, *Physics of Wave Phenomena* **19**, 202 (2011).

5. A. G. Maltsev, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 4, 233 (1979).