

# Мощность излучения He-Ne лазера при произвольной поперечной геометрии активного элемента с учетом изменения инверсии населенностей на оси

В. А. Кожевников, В. Е. Привалов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vaevpriv@yandex.ru*

Ранее авторами был предложен метод расчета мощности излучения He-Ne лазера с произвольной геометрией активного элемента. В данной работе этот метод усовершенствуется путем учета зависимости инверсии населенностей на оси трубки от поперечных размеров трубки. Эта зависимость получена из разработанной авторами модели положительного столба разряда в лазерных трубках плавно изменяющегося диаметра. Результаты численных расчетов соответствуют экспериментальным данным.

**Ключевые слова:** He-Ne лазер, сечение активного элемента, инверсия населенностей, мощность излучения, положительный столб

## Введение

В работе [1] был предложен метод оценки мощности излучения He-Ne лазера с произвольной геометрической формой активного элемента, использующий новую величину – эффективный модовый объем. В работах [1, 2] была посчитана мощность излучения лазера с круглым, прямоугольным и эллиптическим сечениями активного элемента с различными поперечными размерами. Были исследованы зависимости этих мощностей от отношений, соответственно, сторон прямоугольника и полуосей эллипса, и произведено сравнение мощности излучения лазера с прямоугольным и эллиптическим сечениями с мощностью лазера с цилиндрической трубкой. При этом расчеты производились в предположении слабой зависимости инверсии населенностей  $\delta N_0$  на оси лазера от его поперечных геометрических размеров. В данной работе мы уточнили нашу модель.

## Получение зависимости инверсии населенности от размеров трубки

В работе [3] нами были исследованы процессы в положительном столбе (ПС) разряда в лазерных трубках плавно изменяющегося диаметра, и получена система уравнений, решающая задачу связи внешних, контролируемых параметров ПС (радиус разрядного канала  $R(z)$ , давление напуска газа  $p_H$ , и разрядный ток  $I_p$ ) с его основными внутренними характеристиками: электронной температурой  $T_e$ , концентрацией заряженных частиц  $n$ , напряженностью продольного электрического поля  $E_z$ . В частности, было получено выражение для концентрации электронов как функции радиальной  $r$  и продольной  $z$  координат:  $n_e = n_e(r, z)$ . Зная концентрацию электронов  $n_e$  в ПС и используя константы скоростей соответствующих реакций, радиационные времена жизни соответствующих состояний и частоты ухода атомов на стенки разрядной трубки, можно оценить [4] концентрации метастабильных атомов гелия и возбужденных атомов неона в He-Ne лазере при оптимальных условиях его работы, а затем и инверсию населенности  $\delta N_0$  на оси трубки. Таким образом, можно получить зависимость  $\delta N_0$  от поперечного размера активного элемента, и затем учесть её при построении зависимости мощности излучения He-Ne лазера различной формы геометрической трубки от поперечного размера трубки.

## Результаты расчетов

Мы использовали значения параметров ПС и соответствующих констант из [4–9], а также соотношения между параметрами ПС при оптимальной работе He-Ne

лазера из классических работ [9, 10] (интерполяция по приведенным в этих работах графикам):  $p \cdot 2r = 0.2 \cdot 2r + 2.4$  (где  $r$  – радиус трубки в мм,  $p$  – давление в мм рт. ст.),  $I_p = 14.8 \cdot 2r - 4.4$  (где  $r$  – радиус трубки в мм,  $I_p$  – сила тока в мА). Численные расчеты для активного элемента в виде цилиндра показали уменьшение как электронной температуры  $T_e$  на оси, так и инверсии населенностей  $\delta N_0$  с увеличением радиуса цилиндра. Затем были рассмотрены прямоугольное и эллиптическое сечения активного элемента. Для прямоугольника со сторонами  $a$  и  $b$  выбирался характерный размер зависимости  $\delta N_0 = \delta N_0(r)$  в виде  $r = (a^2 + b^2)^{1/2}$ , для эллипса с полуосями  $a$  и  $b$  выбирался характерный размер  $r = (ab)^{1/2}$ . Вид зависимости мощности излучения лазера от отношения сторон прямоугольника ( $a/b$ ) (отношения сторон эллипса ( $a/b$ )) при увеличении большей стороны (большей полуоси) для прямоугольного (эллиптического) сечения несколько отличается от соответствующей зависимости в [2]. Для прямоугольного сечения наблюдается небольшой максимум мощности при определенном значении отношения  $a/b$ , а затем монотонный спад при росте этого отношения. Для эллиптического сечения мощность монотонно падает с ростом отношения  $a/b$ , достигая максимума для круглого сечения ( $a/b=1$ ).

В качестве примера на рис. показана зависимость приведенной мощности лазера  $P/\alpha$  (где коэффициент  $\alpha$  выражается как  $\alpha = \varepsilon E_0^2/k$ ,  $E_0$  – модуль электрического поля при  $r=0$  и  $z=R_e/2$ ,  $R_e$  – радиус кривизны соответствующего эквивалентного конфокального резонатора,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число) от отношения сторон прямоугольника ( $a/b$ ) при следующих значениях параметров: резонатор плоскость-сфера с  $d = 2,2$  м и  $R = 10$  м,  $b = 5$  мм,  $a$  меняется от 5 до 150 мм, длина трубки  $l = 1,2$  м, активный элемент расположен в центре резонатора (именно такие параметры были в эксперименте работы [11]). Эта зависимость отлично согласуется с этим экспериментом.

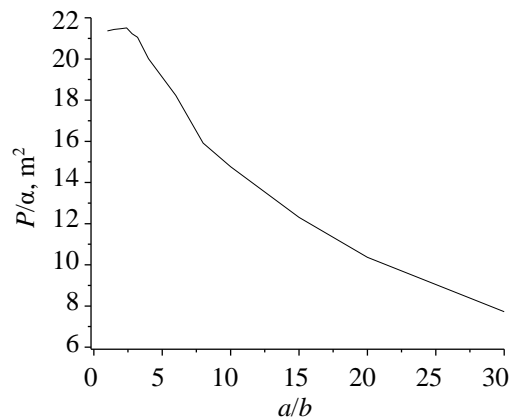


Рис. – Зависимость мощности излучения лазера  $P/\alpha$  ( $\alpha = \varepsilon E_0^2/k$ ) от отношения сторон прямоугольника  $a/b$ .

### Заключение

Уточнение нашей модели – добавление рассчитанной зависимости инверсии населенностей  $\delta N_0$  – позволило добиться более точного согласия с экспериментом. Также сравнение мощности излучения лазера с прямоугольным и эллиптическим сечениями с мощностью лазера с цилиндрической трубкой при одинаковой площади их сечения хорошо согласуется с нашими работами по расчету среднего по сечению усиления [12]. Отсюда можно сделать вывод о правильности нашего метода расчета. В настоящее время проводятся расчеты мощности лазера для других форм сечений активного элемента в поисках оптимального сечения.

## Литература

1. Кожевников В. А., Привалов В. Е., Фотиади А. Э. Эффективный модовый объем и оценка мощности выходного излучения гелий-неонового лазера. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 4. С. 119–132.
2. Кожевников В. А., Привалов В. Е., Фотиади А. Э. Новый подход к оценке мощности излучения He-Ne лазера с различной геометрией поперечного сечения активного элемента. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 133–145.
3. Кожевников В. А., Привалов В. Е., Фотиади А. Э. Положительный столб разряда постоянного тока в лазерных трубках переменного диаметра. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 4. С. 97–107.
4. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Газовые лазеры. М.: Атомиздат, 1971.
5. Смирнов Б. М. Кинетика электронов в газах и конденсированных системах. УФН. 2002. Т. 172. № 12. С. 1411–1447.
6. Кристя В. И. Кинетика заряженных частиц в катодном слое тлеющего разряда в гелий-неоновой смеси. Теплофизика высоких температур, 1996. Т. 34. № 2. С. 197–202.
7. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1971.
8. Королёв Ю. Д. Элементарные и кинетические процессы в газоразрядной плазме. Томск: Издательство ТПУ, 2008.
9. Cherrington V. E. Gaseous electronics and gas lasers. (International Series in Natural Philosophy; Vol. 94). Oxford: Pergamon Press, 1979.
10. Field R. L, Jr. Operating Parameters of dc-Excited He-Ne Gas Lasers. Review of Scientific Instruments. 1967. V. 3 No. 12, pp. 1720–1722.
11. Привалов В. Е., Ходовой В. А. Экспериментальное исследование He-Ne лазера с разрядным промежутком прямоугольного сечения. Оптика и спектроскопия. 1974, Т. 37, С. 797–799.
12. Кожевников В.А., Привалов В.Е. Усиление в лазерах при неоднородных граничных условиях. Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63, № 9 (730), С. 165–171.

## **Radiation power of a He-Ne laser for an arbitrary transverse geometry of the active element, taking into account the change in the population inversion on the axis**

V.A. Kozhevnikov, V. E. Privalov

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;  
e-mail: vaevpriv@yandex.ru*

Previously, the authors proposed a method for calculating the radiation power of a He-Ne laser with an arbitrary geometry of the active element. In this work, this method is improved by taking into account the dependence of the population inversion on the tube axis on the transverse dimensions of the tube. This dependence was obtained from the model developed by the authors of a positive discharge column in laser tubes of smoothly varying diameter. The results of numerical calculations are in agreement with experimental data.

**Keywords:** He-Ne laser, active element cross section, population inversion, radiation power, positive column.