

07

Расчет параметров генерации мощного He–Ne-лазера на $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$

© В.В. Липский, В.Е. Привалов

С.-Петербургский государственный политехнический университет

Поступило в Редакцию 28 декабря 2004 г.

Существующие методы расчета параметров генерации He–Ne-лазера соответствуют эксперименту при мощностях, меньших 30–50 mW. Предлагается метод расчета для мощности более 100 mW.

Потребность в мощных He–Ne-лазерах определяется их применением в голографии, рамановской спектроскопии [1], а также в фотодинамической терапии [2].

Серийные лазеры ЛГ-38, ЛГН-215, ЛГН-220, ЛГН-222 в лучшем случае позволяют достичь 80 mW на основной TEM_{00q} моде. В [3] сообщается о достижении 108 mW на свернутом резонаторе, а в [4] о 320 mW в многомодовом режиме генерации. Последний лазер в эксплуатации практически не применяется из-за высоких массы и габаритов.

Представляет особый интерес оценка мощности генерации, диаметра пучка, расходимости, стабильности параметров He–Ne-лазеров повышенной мощности в одномодовом режиме.

В [5] приведен расчет мощности He–Ne-лазера ЛГН-222 на пяти длинах волн генерации в красной области спектра. Результат — 84 mW ограничивает величину максимальной мощности на $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ в указанном лазере.

В настоящей работе, как и в [5], применена формула расчета мощности излучения лазера для случая усиления слабого сигнала:

$$P = AG_m [1 - (a_c/G_m)^{1/2}]^2 \pi S_0^2 [1 - \exp(-2r_0^2/S_0^2)], \quad (1)$$

где $A = 30 \text{ W/sm}^2$ — коэффициент насыщения, G_m — суммарный ненасыщенный коэффициент усиления в центре доплеровски уширенного контура усиления атомов Ne, S_0 — радиус пучка на выходном зеркале, r_0 — радиус капилляра.

Известно [6,7], что

$$G_m = 3 \cdot 10^{-4} (1/2r_0), \quad (2)$$

где l — длина активной части капилляра, а

$$S_0 = (\lambda L/\pi)^{1/2} [L(R-L)]^{1/4}, \quad (3)$$

где λ — длина волны генерации, R — радиус кривизны зеркала резонатора плоскость–сфера, L — длина резонатора.

Целью работы является расчет возможности достижения уровня $P_{las} \geq 100 \text{ mW}$ в габаритах излучателя лазера ЛГН-222. Из формулы (1) следует, что для этого нужно увеличить G_m и S_0 , а также уменьшить a_c . Множитель $[1 - \exp(-2r_0^2/S_0^2)]$ в нашем случае близок к 1. Увеличение S_0 ограничено сверху предельным значением r_0 , обеспечивающим необходимый коэффициент G_m и одноодовый режим генерации, а минимальные потери в резонаторе a_{cmin} ограничены снизу диссипативными потерями, поэтому в работе проведен расчет P_{las} для увеличенного значения G_m , достигаемого за счет удвоения 1. Практически [3] это достигается за счет использования свернутого П-образного резонатора в базовом излучателе лазера ЛГН-222.

Для оценки вносимых потерь a_c учитывались потери на поглощение в каждом окне Брюстера параллельно расположенных активных элементов a_1 , потери при отражении от зеркал резонатора a_2 , дифракционных потерь a_3 и неучтенных потерь a_4 .

Согласно [7], поглощение в двух кварцевых окнах толщиной 2 мм при полном проходе резонатора составляет $a_{11} = 1.5 \cdot 10^{-3}$. В нашем случае $a_1 = 3 \cdot 10^{-3}$. Потери a_2 в зеркале резонатора, изготовленного методом вакуумного осаждения на кварцевую подложку материалов ZrO_2 и SiO_2 , оценивается [7] как $a_{21} = 1.5 \cdot 10^{-3}$. В нашем случае при использовании двух основных и двух поворотных зеркал данные потери $a_2 = 6 \cdot 10^{-3}$.

Оценка дифракционных потерь a_3 проводилась по методу определения чисел Френеля эквивалентного конфокального резонатора [6]. При этом числа Френеля N определялись по формулам:

$$N_1 = a^2/(\lambda L) [g_1/g_2(1 - g_1g_2)]^{1/2}, \quad (4a)$$

$$N_2 = a^2/(\lambda L) [g_2/g_1(1 - g_1g_2)]^{1/2}, \quad (4b)$$

где a — апертура резонатора, g — параметр резонатора, определяемый как $g_i = 1 - L/R_i$, $i = 1, 2$.

Таблица 1.

№	r_0	N_1	N_2	$a_{31} \cdot 10^{-2}$	$a_{32} \cdot 10^{-2}$	$a_{3c} \cdot 10^{-2}$
1	1.5	0.73	0.46	1	5	3
2	1.6	0.83	0.52	0.2	3	1.6

Таблица 2.

№	$r_k = 1.5 \text{ mm}$		$r_k = 1.6 \text{ mm}$	
	$a_s = 10^{-2}$	$P, \text{ mW}$	$a_s \cdot 10^{-2}$	$P, \text{ mW}$
1	4.1	133.2	2.7	151.1
2	5.0	118.9	3.0	142.4
3	6.0	105.5	4.0	122.9
4	7.0	93.8	5.0	106.9
5			6.0	94.3

Расчет N проводился для двух значений апертур резонатора a , которые определены радиусом капилляра $r_{01} = 1.5 \text{ mm}$ и $r_{02} = 1.6 \text{ mm}$. Данные значения r_0 выбраны из условий обеспечения генерации основной TEM_{00q} моды по методу, изложенному в [6]. В этих пределах отбираются капилляры активных элементов в производстве лазеров ЛГН-215 и ЛГН-222.

Результаты расчета a_d приведены в табл. 1.

В [7] неучтенные потери оценивались величиной $a_4 = 1 \cdot 10^{-3}$. В настоящей работе принято удвоенное значение $a_4 = 2 \cdot 10^{-3}$ с учетом присутствия дополнительного активного элемента и поворотных зеркал резонатора. Следовательно, суммарные минимальные потери для резонатора с $r_0 = 1.5 \text{ mm}$ равны $a_s = 4.1 \cdot 10^{-2}$, а для $r_0 = 1.6 \text{ mm}$ — $a_s = 2.7 \cdot 10^{-2}$. Результаты расчета P_{las} для минимальных и типичных значений a_s приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что $P_{las} \geq 100 \text{ mW}$ достигается в случае с $r_0 = 1.5 \text{ mm}$ при росте потерь до $a_s = 6.0 \cdot 10^{-2}$, а в случае с $r_0 = 1.6 \text{ mm}$ до $a_s = 5.0 \cdot 10^{-2}$. При этом уровень достигаемой P_{las} при минимальных потерях с $r_0 = 1.6 \text{ mm}$ выше.

Расчет радиуса пучка проводится по формуле (3) и равен $S_0 = 0.9 \text{ mm}$.

Расходимость пучка генерации определяется соотношением [6]:

$$\Theta = 2/(kR)^{1/2} + 3.83/(ak), \quad (5)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, a — радиус диафрагмы резонатора, R — конфокальный параметр, определяемый как $R = 2L(g_1/(1 - g_2))^{1/2} = 9.7$ м.

В формуле (5) первое слагаемое учитывает расходимость, сформированную конфигурацией резонатора, а второе — дифракционную расходимость, возникающую на апертуре активного элемента. В нашем случае $\Theta = 0.46$ mrad.

Отметим совпадения результатов расчета Θ по формуле (5) с формулой, приведенной в [8]: $\Theta = 1.27\lambda/(2S_0) = 0.45$ mrad.

Стабильность характеристик генерации можно оценить, введя понятие критического угла разъюстировки Ψ_c [9], при котором генерация срывается до нуля. В [10] показано, что разъюстировка плоских зеркал резонатора на угол Ψ эквивалентна введению дополнительных потерь мощности:

$$\alpha_{ad.} \approx 3.3ka\Psi/(N_1)^{1/2}. \quad (6)$$

В нашем случае резонатор близок к плоскому ($R_1 = 10$ м; $R_2 = \infty$).

Допустимые потери мощности за счет разъюстировки оцениваются как [6]:

$$a_{ad.} = 2G_m 1 - a_s, \quad (7)$$

где a_s — суммарные потери съюстированного резонатора.

Подставив (7) в (6), определим критический угол разъюстировки Ψ_c для величины суммарных потерь $a_s = 5 \cdot 10^{-2}$: $\Psi_c = 0.015$ mrad. Для минимальных потерь $a_s = 2.7 \cdot 10^{-2}$ получим $\Psi_c = 0.016$ mrad.

Расчетные значения критических углов разъюстировки являются приблизительными и не учитывают разъюстировки поворотных зеркал. Поэтому стабильность интенсивности и пространственных характеристик генерации зависят как от расчетных значений Ψ_c , так и от конструктивных особенностей лазера и определяются экспериментально.

В заключение отметим, что приведенный подход согласуется с достаточно общей моделью газоразрядного лазера, предложенной в [11].

Список литературы

- [1] *Оптическая голография* / Под ред. Г. Колфилда. Т. 2. М.: Мир, 1982. 735 с.
- [2] *Тезисы докладов конференции „Лазеры для медицины, биологии и экологии“* / Под ред. А.В. Иващенко и В.Е. Привалова. С.-Петербург, 21–22 ноября 2001 г. 48 с.
- [3] *Липский В.В., Привалов В.Е.* // *Опт. и спектр.* 1990. Т. 69. В. 2. С. 459–461.
- [4] *Schepnermann W., Retter G.J.* // *Opt. and Laser Technology.* 1971. V. 2. P. 45.
- [5] *Bondarchuk Y.M., Krysjuk D.S., Lipsky V.V.* // *Proc. of SPIE.* 2000. V. 4316. P. 104–106.
- [6] *Ищенко Е.Ф., Климков Ю.М.* *Оптические квантовые генераторы.* М.: Сов. радио, 1968. 469 с.
- [7] *Mallik A.* *Proc. Symp. Quantum and Opto-electronics.* Bombay, 1974.
- [8] *О’Ши Д., Коллен Р., Родс У.* *Лазерная техника.* М.: Атомиздат, 1980. 256 с.
- [9] *Sinclair D.C.* // *Appl. Optics.* 1964. V. 3. N 9. P. 1067.
- [10] *Вайнштейн Л.А.* *Открытые резонаторы и открытые волноводы.* М.: Сов. радио, 1976. 567 с.
- [11] *Мольков С.И.* Автореф. докт. дис. СПб.: СПбГПУ, 2004. 32 с.