

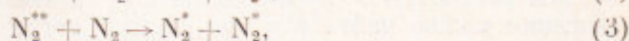
А. В. ЕЛЕЦКИЙ, Л. Я. ЕФРЕМЕНКОВА, Б. М. СМЕРНОВ

### ЛАЗЕР НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 23 II 1970)

1. Лазер, работающий на переходах между колебательными уровнями молекулы углекислого газа, является наиболее мощными из существующих. Мощность, которая снимается с единицы длины трубки для лазера без прокачки, достигает 70 Вт/м<sup>1, 2</sup>). Обычно лазер на углекислом газе возбуждается газовым разрядом. В данной статье исследуются свойства лазера на углекислом газе, который возбуждается резонансным излучением от лампы щелочного металла. Преимущества такого способа возбуждения связаны, во-первых, с низким напряжением (несколько десятков вольт) на электродах лампы щелочного металла по сравнению с напряжением (несколько киловольт), необходимым для горения разряда в обычном лазере на углекислом газе. Во-вторых, в данном типе лазера гораздо ниже уровень шумов, так что он может быть использован для получения монохроматических сигналов лазерного излучения. Мощность на единицу длины и к.п.д. рассматриваемого лазера примерно такие же, что и у обычного лазера на углекислом газе без прокачки.

2. Рассмотрим принцип работы данного лазера. В наиболее простой конструкции его, которой мы и ограничиваемся, лампа накачки, представляющая собой цилиндр радиуса  $r_0$ , помещена в центр цилиндрической лазерной трубки радиуса  $R_0$ . Лампа щелочного металла содержит смесь инертного газа и щелочного металла, а к рабочему газу лазера, который, как обычно, состоит из смеси гелия, азота и углекислого газа, мы добавим примесь паров щелочного металла того же сорта, что и в лампе. Тогда процессы, обеспечивающие инверсную заселенность лазерного уровня, проходят по схеме



Формула (1) отвечает поглощению резонансного фотона атомом щелочного металла  $M$ . Электронное возбуждение атома щелочного металла передается молекуле азота, которая оказывается в колебательно-возбужденном состоянии. Сечение такого процесса оказывается порядка  $10^{-15} - 10^{-14}$  см<sup>2</sup> и его значения, определенные в экспериментах (3-12), приводятся в табл. 1. Процесс (2) приводит к образованию молекулы азота на высоком колебательном уровне.

Это возбуждение размещается на несколько колебательных возбуждений (процесс (3)) и затем передается молекуле углекислого газа (процесс (4)) и поступает на верхний лазерный уровень 001. Последующие процессы излучения лазерного фотона и разрушения верхнего и нижнего лазерного уровня происходят так же, как в обычном лазере на углекислом газе, так что на них мы останавливаться не будем. Заметим только, что представленная схема работы лазера справедлива, если плотность азота значительно превышает плотность углекислого газа, что мы считаем выполненным.

Сечения передачи резонансного возбуждения атомов щелочных металлов на колебательные уровни азота ( $10^{-16}$  см<sup>2</sup>)

Na	K		Rb		Cs	
	<sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>	<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>	<sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>	<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>	<sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>	<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>
40,3 (3)	35 (8)	39 (8)	37 (14)	36 (14)	77 (15)	69 (15)
45,6 (4)	34 (9)	34 (9)				
36,6 (2)	20,2 (10)	20,2 (10)				
43 (6)	29,5 (11)	29,5 (11)				
10 (7)	17,6 (12)	17,6 (12)				
	19 (13)	19 (13)				

3. Определим параметры рассматриваемого лазера. Рабочий газ состоит из смеси гелия, азота, углекислого газа и щелочного металла, причем плотность атомов гелия  $N_{\text{He}}$ , азота  $N_{\text{N}_2}$ , углекислого газа  $N_{\text{CO}_2}$  и щелочного металла  $N_{\text{M}}$  находится в соотношении

$$N_{\text{He}} \gg N_{\text{N}_2} \gg N_{\text{CO}_2} \gg N_{\text{M}}. \quad (5)$$

Первое условие, которому должны удовлетворять параметры газа, связано с тем, чтобы испускаемый лампой фотон был поглощен атомом щелочного металла в лазере. Хотя внешняя стенка лазера отражает резонансные фотоны, эти фотоны не используются, если снова возвращаются в лампу. Отсюда длина пробега резонансных фотонов, испускаемых лампой, меньше поперечных размеров лазера

$$K_{\Delta\omega} N_{\text{M}} \Delta r > 1, \quad \Delta r = R_0 - r_0.$$

Здесь  $K_{\Delta\omega}$  — коэффициент поглощения резонансного фотона, испускаемого лампой. Ширина линии поглощения определяется столкновением поглощающего атома с атомами гелия и поэтому пропорциональна плотности гелия. Поэтому данное условие имеет вид

$$N_{\text{He}} N_{\text{M}} (R_0 - r_0) > A, \quad (6)$$

где величина  $A$  зависит от ширины линии излучения лампы щелочного металла.

Возбужденный атом щелочного металла  $M^*$ , образуемый в лазере в результате поглощения фотона от лампы накачки, высвечивается скорее, чем успевает произойти процесс (2). Однако длина пробега этого фотона значительно меньше, чем фотона из лампы накачки, так что он успеет много раз переизлучиться, прежде чем вернется обратно в лампу. Второе условие, выполнение которого необходимо, чтобы фотон не вернулся в лампу накачки, — чтобы резонансно возбужденное состояние атома щелочного металла разрушалось столкновениями с азотом раньше, чем фотон возвращается в лампу. Время прохождения фотона с лоренцевской формой линии расстояния  $l$  равно (16)  $1,4 \tau \sqrt{K_0 l}$ , где  $K_0$  — коэффициент поглощения в центре линии,  $\tau$  — время высвечивания резонансного фотона, так что это условие имеет вид

$$\tau \sqrt{K_0 (R_0 - r_0)} \gg 1 / N_2 K_{\text{гум}},$$

где  $K_{\text{гум}}$  — константа процесса (2). Так как лоренцовское уширение определяется столкновением с атомами гелия ( $K_0 \sim N_{\text{M}} / N_{\text{He}}$ ), то данное условие может быть представлено в виде

$$\frac{N_{\text{N}_2}^2}{N_{\text{He}}} N_{\text{M}} (R_0 - r_0) \gg B, \quad (7)$$

где величина  $B$  определяется параметрами рабочего газа и оказывается порядка  $10^{28}$  см $^{-5}$ .

Наконец, третье условие связано с тем, чтобы молекулы азота передавали свое возбуждение молекулам углекислого газа, а не уносили его на стенки разрядной трубки. Поскольку молекула азота проходит в результате диффузии расстояние  $R_0 - r_0$  за время порядка  $(R_0 - r_0)^2 / D$ , то это условие имеет вид  $(R_0 - r_0)^2 / D \gg (N_{\text{CO}_2} K_{\text{пер}})^{-1}$ , где  $K_{\text{пер}}$  — константа передачи колебательного возбуждения от азота углекислому газу. Так как коэффициент диффузии определяется столкновением с атомами гелия и обратно пропорционален его плотности, то это условие может быть представлено в виде,

$$N_{\text{CO}_2} N_{\text{He}} (R_0 - r_0)^2 \gg C, \quad (8)$$

где параметр  $C$  порядка  $10^{22}$  см $^{-4}$ .

4. Исследуем вопросы, связанные с мощностью данного лазера. Его мощность, в первую очередь, связана с мощностью лампы щелочного металла, которая превышает 1 квт/м ( $^{17}, ^{18}$ ). Более  $1/2$  мощности этой лампы выделяется в виде резонансного излучения, примерно такая же часть энергии резонансного излучения может быть преобразована в энергию лазерного излучения. Поэтому данный лазер способен давать такую же мощность излучения, что и обычный лазер на углекислом газе с отпаянной трубкой (100 вт/м) при несколько меньшем коэффициенте полезного действия ( $\sim 10\%$ ).

Ограничение мощности обычного лазера связано с тепловыми эффектами. Именно, если температура газа превышает 800° К ( $^{19}$ ), то из-за большой заселенности нижнего лазерного уровня инверсная заселенность уровней не может быть создана. Отсюда и получается предельное значение мощности для лазера в цилиндрической трубке  $\sim 100$  вт/м \* и несколько большее значение для предельной мощности, если разряд и рабочий газ сосредоточены между двумя коаксиальными цилиндрическими поверхностями ( $^{21}$ ). Подобная ситуация имеет место и в нашем случае. Определим размер лазерной области из уравнения теплопроводности, считая, что основное тепло выделяется из лампы. Имеем:

$$-\kappa dT / dr = P / 2\pi r_0,$$

где  $P$  — тепловая энергия, выделяемая на единицу длины лампы;  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности гелия. Решая это уравнение и считая, что  $\kappa \sim T^{1/2}$ , получим:

$$^{2/3} [\kappa(T_1) T_1 - \kappa(T_2) T_2] = P(R_0 - r_0) / 2\pi r_0,$$

где  $T_1$  — температура газа на внутренней цилиндрической поверхности,  $T_2$  — на внешней поверхности лазера. Считая  $T_1 = 800^\circ$  К, находим отсюда

$$\frac{R_0}{r_0} - 1 = \frac{4\pi}{3P} [T_1 \kappa(T_1) - T_2 \kappa(T_2)] \approx \frac{6}{P \text{ (вт/см)}}. \quad (9)$$

Как следует отсюда, при максимально достижимых мощностях лампы щелочного металла величина  $R_0 - r_0$  сравнима с  $r_0$ , так что проблемы, связанной с выбором резонатора для лазера, не возникает. При этом мощность лазера может быть повышена с увеличением мощности лампы щелочного металла.

5. Приведем конкретные параметры лазера, основу которого составляет цезиевая лампа ( $^{17}$ ) мощностью  $P = 12,5$  вт/см, мощностью резонансного излучения 4 вт/см и радиусом трубки  $r_0 = 2,5$  см. В этом случае радиус лазерной трубки согласно формуле (8) равен  $R_0 = 5$  см, а параметр  $A$  в формуле (6)  $A = 3 \cdot 10^{22}$  см $^{-5}$ . Плотность гелия должна быть ограниче-

\* При быстрой поперечной прокачке газа достигаемые мощности (1 квт/м) ( $^{20}$ ) выше, ибо данное обстоятельство не играет роли.

на, чтобы он не разрушал верхнего лазерного уровня, причем константа этого процесса  $(^{22}) K_p \approx 3 \cdot 10^{-12}$  см<sup>3</sup>/сек. Время индуцированного излучения в лазере на углекислом газе составляет  $N_{He} / 2 \cdot 10^{24}$  см<sup>3</sup>·сек, и так как оно должно быть меньше времени разрушения верхнего лазерного уровня при соударении с гелием  $1/N_{He} K_p$ , то отсюда  $N_{He} \ll 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Тогда из формулы (5) следует, что  $N_{Cs} \gg 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, а это возможно, если температура газа не ниже 400° К, иначе цезий будет конденсироваться. Это выполняется при двойной внешней стенке с помещенным в промежуток воздухом. Отросток с цезием выводится наружу, причем количество цезия в газе мало и в приведенном примере составляет доли миллиграмма на метр длины трубки. Условия (6) и (7) при реальных значениях плотности азота и углекислого газа, например, при  $N_{CO_2} \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и  $N_{N_2} \sim 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, выполняются с большим запасом.

Таким образом, предлагаемый лазер непрерывного действия на углекислом газе с оптической накачкой при существующих лампах щелочного металла способен генерировать те же мощности на единицу длины, что и обычный лазер, и в некоторых случаях может оказаться более удобным в употреблении, чем обычный лазер в разрядной трубке. Отметим, что описанный принцип накачки может оказаться весьма удобным для возбуждения лазера на СО, для которого проблема упрощения способа возбуждения является еще более острой, чем в случае лазера на СО<sub>2</sub>. О практической ценности лазера на СО говорит тот факт, что его мощность в непрерывном режиме на длине волны 5 м достигает 90 вт (<sup>23</sup>).

Авторы выражают признательность В. А. Фабриканту за ценные обсуждения и интерес к работе.

Поступило  
18 XII 1969

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> W. J. Witteman, Philips Res. Rep., 21, 73 (1966); J. Quant. Electron., 4, 786 (1968); 11, 337 (1967). <sup>2</sup> P. O. Clark, J. Y. Wada, J. Quant. Electron., 4, 263 (1968). <sup>3</sup> B. P. Kibble, G. Copley, L. Krause, Phys. Rev., 159, 11 (1967). <sup>4</sup> G. W. Negrish, W. M. Smith, Proc. Roy. Soc., A 176, 295 (1940). <sup>5</sup> E. Hulpke, W. Paul, Zs. Phys., 177, 257 (1964). <sup>6</sup> W. Demtröder, Zs. Phys., 166, 42 (1962). <sup>7</sup> S. Tsuchiya, E. K. Kuratani, Combust. and Flame, 8, 299 (1964). <sup>8</sup> D. A. McGillis, L. Krause, Canad. J. Phys., 46, 25 (1968). <sup>9</sup> G. Copley, L. Krause, Canad. J. Phys., 47, 533 (1969). <sup>10</sup> J. Gatzke, Zs. Phys. Chem., 233, 321 (1963). <sup>11</sup> H. P. Hoymayers, C. Alkemade, Quant. Spectr. Rad. Transfer., 6, 847 (1966). <sup>12</sup> D. R. Jenkins, Proc. Roy. Soc., A303, 453 (1969). <sup>13</sup> W. M. Smith, J. A. Stewart, G. W. Taylor, Canad. J. Phys., 32, 961 (1954). <sup>14</sup> J. A. Bellisio, P. Davidovits, P. J. Kindlmann, J. Chem. Phys., 48, 2376 (1968). <sup>15</sup> D. A. McGillis, L. Krause, Canad. J. Phys., 46, 1051 (1968). <sup>16</sup> Б. А. Векленко, ЖЭТФ, 36, 204 (1959). <sup>17</sup> N. C. Veas, JOSA, 36, 555 (1946). <sup>18</sup> Г. Н. Рохлин, Газоразрядные источники света, М., 1966. <sup>19</sup> Г. Р. Левинсон и др. Журн. прикл. спектроскопии, 10, 425 (1969). <sup>20</sup> W. B. Tiffany, R. Targ, J. D. Foster, Laser, Focus, July, 1969, p. 14. <sup>21</sup> A. Crocker, M. S. Wills, Electron. Lett., 5, 63 (1969). <sup>22</sup> C. B. Moore et al., J. Chem. Phys., 46, 4222 (1967). <sup>23</sup> R. M. Osgood jr., W. C. Eppers jr., Appl. Phys. Lett., 13, 409 (1968).