

А. А. ПУСТОВАЛОВ, Б. М. СМЕРНОВ

ЛАЗЕР НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 3 I 1975)

В литературе (¹⁻³) неоднократно рассматривался лазер на углекислом газе, возбуждаемый с помощью ядерного источника. В рассмотренной ситуации лазерное излучение частично или полностью получалось за счет энергии быстрых протонов или нейтронов, образуемых в реакторе. При этом колебательное возбуждение молекул, переводящее их на верхний лазерный уровень, производилось вторичными электронами, которые создавались в результате ионизации молекул газа ядерными частицами.

В данной работе проведен расчет параметров лазера, возбуждаемого радиоактивным веществом, которое наносится на стенки лазерной трубки. Механизм возбуждения лазерных уровней эквивалентен описанному выше механизму и обусловлен соударением вторичных электронов с молекулами газа. Однако, в силу малой мощности ядерного источника, в рассматриваемом случае оптимальные параметры данного лазера и проблемы, возникающие на пути его создания, отличаются от того, что характеризует ранее исследованные лазеры с ядерной накачкой. Возможность создания такого лазера связана с разработкой в последнее время достаточно мощных ядерных источников энергии (⁴⁻⁶).

Конструктивно рассматриваемый лазер представляет собой трубку, заполненную смесью гелия, азота и углекислого газа. Стенки трубки покрыты радиоактивным материалом. Стенки трубки испускают электроны, которые возбуждают газ и вызывают лазерный эффект. Внутри трубки имеются дополнительные сетки. При рассеянии быстрых электронов на этих сетках в результате вторичной эмиссии энергия быстрых электронов перерабатывается в энергию медленных электронов. Рассматриваемый лазер при своей малой мощности компактен и может найти разнообразные применения. Далее мы оценим параметры этого лазера.

Ввиду малой мощности радиоактивного источника основное внимание следует сосредоточить на коэффициенте усиления рабочей смеси. При малой плотности газа, когда уширение спектральной линии излучения обусловлено эффектом Доплера, коэффициент усиления рабочей смеси при комнатной температуре в центре линии наиболее сильного колебательно-вращательного перехода равен (⁷)

$$K_{yc} = 5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2 \cdot [\text{CO}_2]^*, \quad (1)$$

где $[\text{CO}_2]^*$ — разность плотностей молекул, расположенных на верхнем и нижнем лазерном колебательном уровне. Эта формула нарушается при высоких плотностях газа, начиная с плотностей порядка 10^{17} см^{-3} .

Выберем оптимальный состав газовой смеси. Процессы, которые приводят к образованию колебательно-возбужденных молекул на верхнем уровне, происходят следующим образом. Быстрые электроны, попадающие в газ с радиоактивных стенок, тормозятся в нем в результате ионизации

молекул. Образующиеся при этом вторичные электроны обладают энергией порядка десятка электрон-вольт и заметную часть этой энергии тратят на возбуждение колебательных уровней молекулы. Таким путем энергия быстрых электронов частично преобразуется в энергию колебательно-возбужденных молекул.

Обработка экспериментальных данных показывает ⁽⁸⁾, что в азоте энергия электрона тратится на возбуждение колебательных уровней молекулы в более широкой области энергий, чем в углекислом газе. Поскольку энергия возбуждения колебательного уровня молекулы азота близка к энергии возбуждения верхнего лазерного колебательного уровня молекулы углекислого газа, то колебательное возбуждение молекулы азота легко передается молекуле углекислого газа. Учитывая это, выберем рабочий газ лазера из смеси азота и углекислого газа таким образом, чтобы азота в нем было значительно больше, чем углекислого газа:

$$[\text{CO}_2] \ll [\text{N}_2]. \quad (2)$$

Определим теперь плотность возбужденных молекул углекислого газа, которая входит в выражение для коэффициента усиления (1). Пусть мы имеем трубку радиуса r , стенки которой покрыты радиоактивным материалом. Стенки испускают электроны, которые несут поток энергии q (вт/см²). Энергия быстрых электронов полностью перерабатывается внутри трубки, причем с эффективностью $\eta=10\%$ она идет на возбуждение колебательных уровней молекул. Тогда в единице объема внутри трубки в единицу времени выделяется энергия

$$\frac{2\pi r q}{\pi r^2} = \frac{2q}{r}.$$

Отсюда находим, что в единице объема в единицу времени образуется $2q\eta/(r\hbar\omega)$ колебательно-возбужденных молекул, где $\hbar\omega$ — энергия возбуждения колебательного уровня.

Колебательно-возбужденные молекулы углекислого газа распадаются в результате соударения с молекулами азота. Константа этого процесса ⁽⁷⁾

$$K_{\text{разр}} = 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Константа разрушения колебательно-возбужденных молекул азота при соударении с молекулами азота при комнатной температуре меньше указанной величины более чем на два порядка, так что этим процессом будем пренебрегать. Константа разрушения колебательно-возбужденной молекулы углекислого газа в результате соударения с молекулой углекислого газа при комнатной температуре составляет ⁽⁷⁾ $1,6 \cdot 10^{-14}$ см³/сек. Выбрав $[\text{CO}_2]/[\text{N}_2] < 0,1$, мы можем пренебречь и этим процессом.

Таким образом, число колебательных возбуждений, распадающихся в единице объема в единицу времени, составляет $[\text{CO}_2]^*[\text{N}_2] K_{\text{разр}}$. Приравняв эту величину числу образовавшихся колебательных возбуждений, получим для плотности колебательно-возбужденных молекул углекислого газа

$$[\text{CO}_2]^* = \frac{2q\eta}{[\text{N}_2] K_{\text{разр}} r \hbar \omega}. \quad (3)$$

Эта величина должна превышать плотность молекул на нижнем лазерном уровне, которая, согласно формуле Больцмана, составляет $[\text{CO}_2] e^{-\Delta E/T}$, где $\Delta E = 1388 \text{ см}^{-1}$ — энергия возбуждения нижнего лазерного уровня. Ука-

занное условие при комнатной температуре приводит к следующему соотношению между параметрами:

$$[N_2][CO_2]_r < 10^{33} \text{ см}^{-6}. \quad (4)$$

Однако при малых плотностях газа разрушение возбужденных молекул может происходить на стенках. Принимая вероятность тушения колебательно-возбужденной молекулы на стенках порядка 10^{-2} , найдем, что разрушение колебательного возбуждения имеет место в объеме в результате соударения с молекулами азота при выполнении условия

$$[N_2]r > 10^{16} \text{ см}^{-2}. \quad (5)$$

Предыдущие оценки предполагали выполнение этого условия.

Приемлемое значение коэффициента усиления лазера на углекислом газе, при котором лазер может работать, таково, что усиление составляет несколько долей процента за один проход. Это означает, что для работы лазера необходимо, чтобы величина $K_{yc}L$ (K_{yc} — коэффициент усиления, L — длина лазерной трубки) составляла доли процента. Примем для оценки $K_{yc}L = 2 \cdot 10^{-3}$, $L = 1$ м. Используя значение потока энергии $q = 10^{-4}$ вт/см², получим в этом случае на основании формул (1), (3)

$$[N_2]r \leq 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}. \quad (6)$$

Однако при выполнении условия (6) мы не сможем затормозить быстрый электрон внутри трубки. Длина пробега λ быстрого электрона в газе связана с энергией электрона E и плотностью газа N соотношением ⁽⁹⁾

$$\lambda N = \frac{E^2}{4\pi e^4 Z \ln(E/J)},$$

где J — потенциал ионизации молекулы. В частности, если газ состоит в основном из молекулярного азота, то эту формулу представим в виде

$$\lambda[N_2] = 1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} E^2 (\text{кэВ}). \quad (7)$$

Как видно, условие (6) выполняется, если энергия тормозящихся электронов не превышает единиц килоэлектрон-вольт.

Энергия электронов, освобождающихся с покрытой прометнем поверхности, составляет 60 кэВ. Если потребовать, чтобы торможение быстрых электронов было связано с ионизацией газа и чтобы длина свободного пробега электронов совпадала с диаметром трубки, то из формулы (7) получим

$$[N_2]r = 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}, \quad (8)$$

т. е. условие (6) сильно нарушается. Отсюда следует, что необходимо иметь дополнительный способ переработки энергии быстрых электронов в энергию медленных электронов.

Этой дополнительной переработки энергии быстрых в энергию медленных электронов можно достичь, помещая внутри трубки сетки. Быстрые электроны, рассеиваясь на поверхности таких сеток, вызывают появление вторичных электронов. Энергия вторичных электронов уже невелика, так что они потеряют энергию, прежде чем пройдут через слой газа в трубке. Из соотношения (7) следует, что для выполнения условия (6) необходимо, чтобы энергия вторичных электронов не превышала килоэлектрон-вольт, т. е. коэффициент размножения быстрых электронов оказался порядка 100. Современные материалы ⁽¹⁰⁾ обеспечивают на порядок больший коэффициент размножения.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о возможности построения маломощного лазера на углекислом газе, перерабатывающего энергию быстрых электронов радиоактивного источника. Типичные параметры лазера: длина лазерной трубки, стенки которой покрыты прометием, 1 м, диаметр 1 см, плотность азота $\sim 10^{16}$ см $^{-3}$, плотность углекислого газа $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$. Подобным образом можно создать и гелий-неоновый лазер. При существующих мощностях ядерных батарей создание таких лазеров является проблемой. Однако с повышением мощности ядерных батарей, как следует из проведенных в данной работе оценок, эти проблемы исчезнут.

Авторы благодарны А. Т. Рахимову за ценные замечания.

Поступило
20 III 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. М. Андрияхин и др., Письма в ЖЭТФ, т. 8, 346 (1968); т. 12, 83 (1970).
² T. Ganley, J. T. Verdeyen, G. H. Miley, Appl. Phys. Let., v. 88, 568 (1971). ³ В. М. Андрияхин и др., ЖЭТФ, т. 63, 1635 (1972). ⁴ Г. М. Фраджин, В. М. Кодюков, Радиоизотопные источники электрической энергии, Атомиздат, М., 1972. ⁵ У. Корлисс, Д. Харви, Источники энергии на радиоактивных изотопах, «Мир», М., 1967. ⁶ В. М. Кодюков, М. М. Пискуров и др., Сб. Радиационная техника, Атомиздат, в. 10, 1973.
⁷ А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов, Газовые лазеры, Атомиздат, М., 1971. ⁸ W. L. Nighan, Phys. Rev., v. 2A, 1989 (1970). ⁹ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Квантовая механика, Физматгиз, М., 1963. ¹⁰ Н. А. Соболева, УФН, т. 3, в. 2 (1973).