

А. В. ЕЛЕЦКИЙ, Б. М. СМЕРНОВ

**ЛАЗЕР НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ
В РЕЖИМЕ ОДНОКРАТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 17 VI 1969)

1. Лазер на CO_2 является наиболее мощным лазером, работающим в непрерывном режиме. В настоящее время существует лазер ⁽¹⁾, мощность которого 9 квт. Столь высокая мощность лазера на углекислом газе связана с тем, что в нем наилучшим образом выполняются условия создания инверсной заселенности на колебательных уровнях молекулы. При такой ситуации можно надеяться получить с помощью этого лазера импульсы большой энергии. Первые экспериментальные попытки в этом отношении сделаны и дают величину энергии импульса излучения, достигающую 5 дж. ^(2, 3). Хотя эти значения значительно меньше величины, которая достигается с помощью неодимового лазера (1000 дж. ⁽⁴⁾) и лазера на фотодиссоциации (65 дж. ⁽⁵⁾), Хилл ⁽²⁾ утверждает, что импульсный лазер на углекислом газе способен дать больший выход. В данной работе мы продолжим начатую Хиллом ⁽²⁾ дискуссию, связанную с выяснением возможностей импульсного лазера на углекислом газе, и определим оптимальные условия работы такого лазера. Эта задача облегчается тем, что происходящие в этом лазере процессы достаточно подробно изучены и константы этих процессов известны.

2. Увеличения энергии импульса лазерного излучения можно достигнуть, увеличивая занимаемый газом объем или съем с единицы объема. Для лазера, работающего в непрерывном режиме, значительное увеличение радиуса разрядной трубки не приводит к увеличению выходной мощности лазера, что обусловлено эффектами нагревания газа разрядным током. Для лазера, работающего в режиме однократных импульсов, такой проблемы не возникает. Однако при возбуждении лазера импульсным разрядом возникает другая проблема, связанная с тем, что разрядный ток занимает часть объема. При этом полезно используется лишь часть объема, занимаемая газом, тем меньшая, чем больше размеры системы или чем выше давление газа. Чтобы преодолеть эту трудность, предлагается создавать свободные электроны независимым образом равномерно по объему. Наилучшим по сравнению с другими способами (облучение газа жестким излучением, добавка радиоактивной присадки) является добавление к газу легко ионизируемой присадки. Фотоионизация атомов присадки приводит к образованию свободных электронов нужной плотности. Наиболее подходящей присадкой является цезий. Приводим плотность насыщенных паров цезия в области практически интересных температур.

Температура, °К	300	320	340	360	380	400
Давление насыщенных паров цезия, тор	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
Плотность атомов цезия, см ⁻³	$5,8 \cdot 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$6,2 \cdot 10^{12}$	$2,3 \cdot 10^{13}$	$6,6 \cdot 10^{13}$

Этой же величиной ограничивается плотность свободных электронов, которую можно достигнуть при рассматриваемых температурах. Поскольку

ку плотность присадки весьма мала, она не влияет на свойства рабочего газа.

3. Таким образом, имеем газ, в котором мы можем равномерно создать нужную плотность электронов. Действуя на электроны электрическим полем, мы возбуждаем колебательные уровни молекулы и создаем инверсную заселенность колебательных уровней молекул. Выясним оптимальные условия (состав и давление газа, плотность электронов, напряженность электрического поля), которые обеспечат максимальный съём энергии с единицы объема. Сначала обсудим состав смеси. Мощный лазер в непрерывном режиме работает на смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$. Гелий выполняет две функции: увеличивает теплопроводность смеси и тем самым позволяет уменьшить влияние тепловых эффектов и, кроме того, способствует разрушению нижнего лазерного уровня. Ту же роль гелий выполняет и в импульсном лазере. Поэтому оптимальное соотношение между плотностью гелия N_{He} и плотностью углекислого газа N_{CO_2} следует выбрать тем же, что и в лазере непрерывного действия ⁽⁸⁾ $N_{\text{He}} : N_{\text{CO}_2} \approx 10$. Добавление азота в лазер, работающий в непрерывном режиме, сильно увеличивает его мощность. Это связано с большой величиной сечения возбуждения колебательных уровней азота электронным ударом, максимальное значение которого при энергии электрона 2,3 эв составляет ⁽⁶⁾ $5 \cdot 10^{-16}$ см². Однако такого же порядка и максимальное сечение прямого возбуждения верхнего лазерного уровня молекулы углекислого газа электронным ударом ⁽⁷⁾, которое достигается при энергии электрона 0,9 эв. Средняя энергия электронов в положительном столбе разряда определяется из условия баланса заряженных частиц (число заряженных частиц, образующихся в результате ионизации, равно числу рекомбинирующих частиц на стенках и объеме) и составляет в разряде углекислого газа при оптимальных условиях работы лазера 2—3 эв. По этой причине добавление к углекислому газу азота сильно увеличивает мощность лазера, работающего в непрерывном режиме ⁽⁸⁾. Поэтому, снизив среднюю энергию электронов в лазере однократного действия, мы эффективно используем углекислый газ, и нет надобности добавлять к нему азот.

4. Выберем оптимальные условия работы лазера. Во-первых, отношение напряженности электрического поля к давлению углекислого газа следует выбрать таким способом, чтобы средняя энергия электронов составляла около 1 эв, что соответствует максимуму сечения возбуждения колебательного уровня CO_2 электронным ударом. Считая, что гелий не изменяет свойства разряда, находим $E/p \approx 7 \text{ в/тор} \cdot \text{см}$. Ту же величину получаем из уравнения баланса энергии, учитывая, что вся передаваемая электрону энергия идет на возбуждение колебательных уровней

$$\hbar\omega K_{\text{возб}} N_e N_m = jE \equiv e w_{\text{др}} N_e E. \quad (1)$$

Здесь $\hbar\omega$ — энергия возбуждения уровня 001; $K_{\text{возб}}$ — константа возбуждения этого колебательного уровня CO_2 электронным ударом, $w_{\text{др}}$ — дрейфовая скорость электрона. Используя экспериментальные значения $w_{\text{др}}$ ⁽¹¹⁾, $K_{\text{возб}}$ ⁽⁷⁾, находим $E/p = 8 \text{ в/см} \cdot \text{тор}$.

Время импульса $\tau_{\text{имп}}$ следует выбрать из условия, чтобы за это время газ нагрелся до температуры $T_{\text{пр}} = 800^\circ \text{K}$, ибо при этой температуре газа генерация прекращается ^(9, 10). Это дает

$$\frac{3}{2} (T_{\text{пр}} - T_0) N_{\text{He}} = N_e N_{\text{CO}_2} K_{\text{возб}} 0,6 \hbar\omega \tau_{\text{имп}}, \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура газа; $0,6 \hbar\omega$ — энергия возбуждения нижнего лазерного уровня, которая отдается поступательным степеням свободы. Отсюда получаем

$$\tau_{\text{имп}} \approx \frac{3}{N_e K_{\text{возб}}} \text{сек}. \quad (3)$$

Заметим, что при этих условиях каждая молекула углекислого газа трижды успевает возбудиться и высветиться. При этом плотность гелия достаточно велика, так что разрушение нижнего лазерного уровня за счет столкновения с атомом гелия и установление равновесия по поступательным степеням свободы происходит намного скорее, чем возбуждение колебательного уровня электронным ударом.

Плотность углекислого газа следует ограничить условием, чтобы за время импульса не успел развиться пробой

$$\tau_{\text{имп}} \leq \frac{4}{N_{\text{CO}_2} K_{\text{ион}} (E/p)}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ион}}$ — константа ионизации углекислого газа электронным ударом. Сравнивая формулы (3), (4), находим оптимальное соотношение между плотностью электронов и углекислого газа:

$$N_e/N_{\text{CO}_2} \approx 3 \frac{K_{\text{ион}}}{K_{\text{возб}}} \sim 2 \cdot 10^{-5}. \quad (5)$$

При этих условиях получаем для энергии лазерного излучения ξ , приходящейся на импульс и на единицу объема активной среды,

$$\xi = 3N_{\text{CO}_2} 0,4\hbar\omega \approx 10^{-14} N_e \text{ дж}. \quad (6)$$

5. При исследовании работы данного лазера следует учесть возможность рекомбинации электронов и ионов. Если ион цезия образует связанное состояние с атомом или молекулой, то рекомбинация происходит интенсивно за времена порядка $\sim 1/N_e\beta$, причем коэффициент рекомбинации $\beta \sim 10^{-6}$ см³/сек. Это время всегда меньше времени импульса $\tau_{\text{имп}} \leq 3/N_e K_{\text{возб}}$, ибо $K_{\text{возб}} \sim 10^{-8}$ см³/сек. Данный эффект нельзя преодолеть за счет ионизации газа, так как это приведет к неравномерному распределению электронов. Поэтому следует продолжить импульс фотоионизации цезия на весь импульс работы лазера.

6. Подведем итоги. Принципиальная схема рассматриваемого лазера имеет следующий вид. В объем, занимаемый рабочим газом, испаряется цезий, причем температура стенок этой системы должна значительно превышать комнатную, чтобы плотность цезия в объеме была достаточно велика. Перед импульсом разряда включается импульс ультрафиолетового излучения, который действует в течение всего импульса работы лазера. Под действием излучения атомы цезия и молекулы, в состав которых он входит, ионизируются. Так как каждый электрон за время действия лазера успевает возбудить $\sim 2 \cdot 10^5$ молекул (см. формулу (2)), то потери энергии на фотоионизацию относительно малы. Так как дрейфовая скорость электронов при оптимальных условиях $w_{\text{др}} \approx 5 \cdot 10^6$ см/сек, то за это время они пройдут расстояние ≈ 50 см. Чтобы данный эффект не повлиял на условия работы лазера, необходимо, чтобы расстояние между электродами L было достаточно велико. В противном случае за времена, меньшие времени импульса, внутреннее поле плазмы заэкранирует внешнее поле, что приводит к неравномерному использованию объема и резко снижает выходной энергии лазера. С другой стороны, увеличение расстояния между электродами приводит к дополнительным трудностям, связанным с большой разностью потенциалов между электродами. К тому же может оказаться удобным включать разряд в поперечном направлении. Преодолеть эти трудности можно при использовании разряда переменного тока (подключив к разрядным пластинам индуктивность).

Осуществление предлагаемого проекта импульсного лазера связано с большими техническими трудностями. Именно, для создания в активной среде плазмы равномерной плотности мы используем источник фотоионизации, причем длина пробега фотонов на несколько порядков выше обычно используемых размеров системы, так что для оптимального использования

источника фотоионизации следует делать стенки разрядной трубки хорошо отражающими. Далее, относительно высокая плотность плазмы возможна при высоких температурах газа и стенок. Возникают проблемы, связанные с испарением цезия внутрь газа. Далее, для осуществления разряда необходимо создать однородное поле высокой напряженности в большом объеме, причем направление напряженности следует изменять в процессе разряда. Хотя каждая из перечисленных трудностей не является принципиальной, их совокупность делает задачу технически весьма сложной. Тем не менее, импульсный лазер на углекислом газе заслуживает внимания уже и потому, что этот лазер обладает высоким к.п.д. ($\sim 10\%$), так что при его использовании для больших объемов рабочего газа проблема создания мощного источника накачки и проблема вывода бесполезно использованной энергии из рабочего объема оказываются более простыми, чем в других случаях.

Авторы выражают благодарность В. А. Фабриканту за ценные советы.

Поступило
7 V 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ *Frontiers in Lasers/Masers*, 5, № 14, 1 (1968). ² А. Е. Hill, *Appl. Phys. Lett.*, 12, 324 (1968). ³ Г. Р. Левинсон и др., *Радиотехн. и электроника*, 10, 425 (1969). ⁴ *Microwaves*, 7, 106 (1967). ⁵ А. J. DeMaria, С. J. Ultee, *Appl. Phys. Lett.*, 9, 67 (1966). Пер. в сборн. Газовые лазеры, М., 1968. ⁶ G. J. Schulz, *Phys. Rev.*, 135A, 988 (1964). ⁷ M. J. W. Boness, G. J. Schulz, *Phys. Rev., Lett.*, 21, 1031 (1968). ⁸ В. П. Тычинский, *УФН*, 91, 389 (1967). ⁹ И. К. Бабаев, А. Т. Глазунов, С. Н. Цысь, *Журн. прикл. спектроскопии*, 9, 610 (1968). ¹⁰ А. В. Елецкий, Л. Г. Мищенко, В. П. Тычинский, Там же, 8, 425 (1968). ¹¹ И. Мак-Даниель, *Процессы столкновений в ионизованных газах*, М., 1967.