

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ СИНТЕЗА АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА И ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОКАЧКИ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО HCN-ЛАЗЕРА

В. К. Киселев, В. П. Радионов, Н. Ф. Дахов

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: kiseliiov@ire.kharkov.ua*

В терагерцевых газоразрядных HCN- и DCN-лазерах синтез активного вещества осуществляется непосредственно в газовом разряде из исходных веществ. Режим заполнения резонатора активным веществом оказывает влияние на мощность и КПД лазера. Проведено косвенное измерение времени синтеза активного вещества и проанализированы причины влияния этого времени на параметры лазера. На основе исследования предложен и испытан способ увеличения мощности и КПД лазера. Ил. 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: терагерцевый газоразрядный лазер, активное вещество, синтез.

Молекулы активного вещества терагерцевых газоразрядных HCN- и DCN-лазеров синтезируются непосредственно в газовом разряде из исходных веществ – азота и углеводородных соединений. Такие лазеры практически всегда работают с принудительной прокачкой активного вещества, которая обычно производится вдоль оси резонатора. Для этого в лазер постоянно подаются в нужных пропорциях исходные вещества и производится откачка из него отработанных молекул активного вещества и различных побочных продуктов. Интенсивность прокачки, как и давление в резонаторе, существенно влияет на мощность излучения лазера. Это было замечено еще в первых работах, посвященных субмиллиметровым лазерам, например [1]. Задача системы прокачки формулировалась как установление равновесия между скоростью поступления рабочих веществ и скоростью образования «отработанных веществ». Зависимость мощности лазерного излучения от давления в резонаторе рассматривалась во многих работах, например [1, 2], по этому поводу существуют четкие рекомендации. Однако рекомендаций по интенсивности прокачки (т. е. по скорости движения вещества через резонатор) не выработано, и интенсивность прокачки подбирается экспериментально для каждого конкретного лазера. Оптимальная величина прокачки зависит от многих факторов, но в первую очередь – от размеров резонатора и разрядной трубки. Начальный рост мощности лазерного излучения с увеличением интенсивности прокачки обусловлен тем, что в резонаторе возрастает количество активных частиц. Происходит интенсивное удаление отработанных веществ из резонатора, а на смену им в достаточном количестве поступает свежая рабочая смесь, из которой в газовом разряде синтезируются молекулы активного вещества. Одновременно, по-видимому, действуют факторы, снижающие мощность лазерного излучения с увеличением интенсивности

прокачки, что и обуславливает наличие оптимума прокачки. Одним из таких факторов может быть конечное время, затрачиваемое на разогрев исходных веществ и синтез активного вещества. В течение этого отрезка времени смесь исходных веществ успевает продвинуться вдоль резонатора на некоторое расстояние. В резонаторе на этом участке фактически отсутствует активное вещество, хотя имеются и газовый разряд, и рабочая смесь. Если указанный участок приобретает существенные размеры, то это может вызывать снижение мощности и КПД лазера. Таким образом, существует оптимальная скорость прокачки рабочего вещества, связанная своим существованием одновременному действию обоих вышеуказанных противоречивых факторов. Для проверки такого предположения следует прежде всего определить время синтеза активного вещества и скорость его движения вдоль резонатора.

Целью настоящей работы является исследование влияния времени синтеза активного вещества и интенсивности прокачки на КПД и мощность терагерцевого газоразрядного HCN-лазера.

Запаздывание лазерного излучения относительно импульса тока накачки наблюдалось в работах по HCN-лазерам с импульсной накачкой [2–4], оно составляло от нескольких микросекунд до нескольких сотен микросекунд. Однако в этих работах временной интервал между импульсами тока накачки либо не указывался, либо отмечалось, что он лежит в широких пределах; не везде указывалась интенсивность прокачки, и главное, не рассматривалась связь между этими параметрами. По-видимому, времени между импульсами тока для обновления смеси в резонаторе было недостаточно, что приводило к значительному разбросу результатов эксперимента.

Для проведения более качественного эксперимента вначале мы оценили среднюю скорость движения частиц вещества вдоль резонато-

ра. Приблизительно рассчитать среднюю продольную скорость частиц вещества в резонаторе можно по расходу рабочих газов. Для расчета можно использовать уравнение для идеального газа при его неизменной массе

$$\frac{PV}{T} = \text{const} \quad \text{при } m - \text{const.}$$

Масса газа, проходящая за единицу времени через натекатели, резонатор и вакуумный насос, остается неизменной. Следовательно, если отнести объем газа, проходящий за единицу времени через резонатор, к сечению разрядной трубки, то получим среднюю скорость частиц в резонаторе

$$v \approx \frac{V_2}{tS} \approx \frac{V_1 P_1 T_2}{tS P_2 T_1},$$

где t – время, за которое прокачивается измеряемый объем; S – внутреннее сечение разрядной трубки; P_1, V_1, T_1 – давление, объем и температура рабочих газов у входа в натекатели лазера (при атмосферных условиях); P_2, V_2, T_2 – давление, объем и температура рабочих газов в разрядной трубке лазера.

Следует заметить, что в резонаторе происходит химическая реакция синтеза, которая сопровождается изменением количества частиц, что требует внесения поправок в расчеты. К тому же существуют градиенты температуры и давления в разрядной трубке, снижающие точность измерений. Следовательно, приведенная выше формула носит оценочный характер. Расчет показывает, что при использовании систем откачки средней производительности, обеспечивающих расход рабочих газов порядка $10 \text{ см}^3/\text{мин}$, скорость частиц в резонаторе может достигать величины порядка 1 м/с .

Произвести оценку времени синтеза активного вещества можно непосредственно на самом лазере, если измерить временную задержку между моментом включения тока накачки и моментом возникновения лазерной генерации. Перед этим лазер нужно вывести на стабильный режим генерации, а интервал отключения выбрать с учетом скорости прокачки. Измерения проводились на лазере с двумя коаксиальными электродами, контактирующими с внутренним пространством разрядной трубки [5], длиной резонатора 120 см и диаметром разрядной трубки 45 мм . Расход газов составил $\sim 5 \text{ см}^3/\text{мин}$. Ориентировочный расчет показал, что при таком расходе рабочих газов скорость движения частиц в резонаторе составляет $\sim 0,2\text{--}0,5 \text{ м/с}$. Накачка лазера осуществлялась постоянным током. Немодулированное лазерное излучение с длиной волны 337 мкм регистрировалось кристаллическим детектором, сигнал от которого поступал непосредственно на двулучевой осциллограф.

Перед снятием показаний лазер включали, настраивали и выводили на стабильный тепловой режим. Затем производилось отключение тока накачки на время $10\text{--}20 \text{ с}$. За это время конструкционные элементы лазера не успевают остыть и повлиять на юстировку резонатора и одновременно из резонатора успевают удалиться синтезированные молекулы активного вещества.

После включения тока накачки на экране осциллографа наблюдалось запаздывание момента возникновения лазерной генерации относительно момента включения тока накачки. На рис. 1 приведена такая осциллограмма, сфотографированная с экрана двулучевого осциллографа.

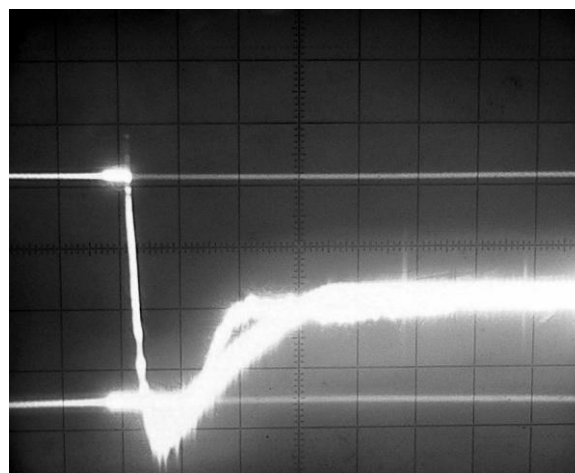


Рис. 1. Осциллограмма тока накачки и интенсивности лазерного излучения при включении лазера

Верхний луч осциллографа отображает форму тока накачки, нижний – форму сигнала принимаемого лазерного излучения. При нарастании тока накачки верхний луч отклонялся вниз. Одному делению на экране соответствует время 200 мс . При включении накачки наблюдается скачок тока в течение $\sim 70 \text{ мс}$, а затем в течение около 600 мс происходит его спад до стабилизированного значения $0,3 \text{ А}$. Возникновение лазерной генерации наблюдается примерно через 200 мс после включения тока. Затем в течение $\sim 150 \text{ мс}$ происходит крутое нарастание интенсивности генерации. Следовательно, от момента превышения током накачки рабочего уровня $0,3 \text{ А}$ до выхода лазерного излучения на стабильный уровень проходит $\sim 300 \text{ мс}$. Очевидно, за это время исходные вещества разогреваются газовым разрядом и происходит синтез молекул активного вещества. Изменение времени отключения лазера в несколько раз относительно значения $10\text{--}20 \text{ с}$ практически не приводит к принципиальному изменению осциллограммы. При более длительном отключении (на несколько минут) становится заметным нарушение установившегося теплового

режима лазера, проявляющегося в снижении уровня лазерного излучения, а запаздывание не изменяется. При значительном уменьшении времени отключения (до 1 с) заметно сокращение запаздывания лазерной генерации. И уже при отключении лазера на время порядка 200 мс запаздывание практически незаметно при данной скорости развертки осциллографа. Это объясняется тем, что за указанное время из резонатора не успевают удалиться уже синтезированные молекулы активного вещества и при последующем включении они принимают участие в генерации.

На рис. 2 приведены осциллограммы последовательного включения и отключения питания лазера на время порядка 200 мс. Первое включение питания произведено после 20-секундного перерыва в работе. За время действия газового разряда еще не успевают синтезироваться достаточное количество молекул активного вещества и лазерная генерация не возникает. Во время второго, такого же по длительности включения, уже наблюдается интенсивная генерация: сказывается наличие в резонаторе молекул активного вещества, синтезированных во время предыдущего включения. При последующих включениях лазерная генерация возникает с еще большей интенсивностью и практически одновременно с включением тока накачки. Эта иллюстрация наглядно подтверждает предыдущие рассуждения и поясняет значительный разброс запаздывания генерации в импульсных лазерах.

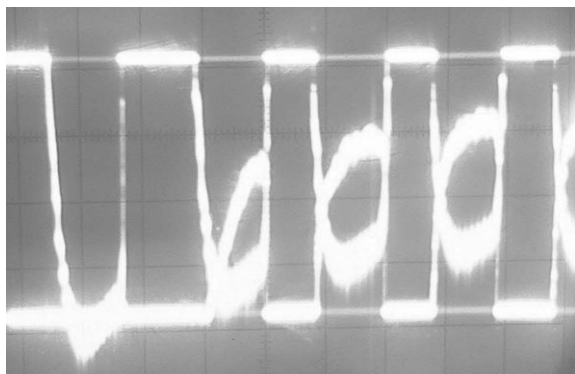


Рис. 2. Осциллограммы последовательного включения и отключения тока накачки и возникающей при этом лазерной генерации

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что в течение времени, затрачиваемого на разогрев рабочей смеси и синтез молекулы, смесь исходных веществ успевает переместиться вдоль резонатора лазера на существенное расстояние, составляющее для рассмотренной скорости прокачки $\sim 5\text{--}10\%$ от его длины. При увеличении скорости прокачки увеличивается и это расстояние. Образовавшийся на этом протяжении пассивный участок резонатора, не

заполненный активным веществом, по-видимому, является основной причиной, приводящей к снижению мощности и КПД лазера при увеличении скорости прокачки. Для решения указанной проблемы целесообразно вывести пассивный участок синтеза активного вещества за пределы резонатора. Применение дополнительной разрядной секции для синтеза активного вещества за пределами резонатора HCN-лазера известно из работ [6, 7], в которых дополнительная разрядная секция применялась с целью уменьшения оседания полимерного налета на стенках разрядной трубки резонатора и для подготовки активного вещества в импульсных лазерах. Нами было проверено влияние дополнительной разрядной секции на мощность излучения HCN-лазера с накачкой постоянным током (рис. 3).

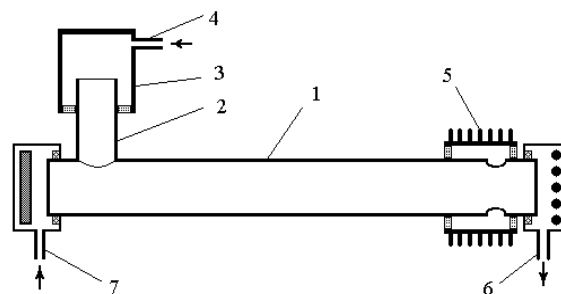


Рис. 3. Схема лазера с дополнительной разрядной секцией

Вблизи торца разрядной трубки 1 установлена дополнительная разрядная секция 2 с электродом 3. Общий внутренний объем отклонения и электрода составляет $\sim 20\%$ от объема разрядной трубки резонатора. При этом газовый разряд занимает $\sim 2/3$ этого объема. Электрод 3 снабжен патрубком 4 для подачи рабочей смеси. Второй электрод 5 установлен возле противоположного торца разрядной трубки. Откачка осуществляется со стороны этого торца через патрубок 6, выполненный в юстировочном узле зеркала резонатора. В юстировочном узле второго зеркала, расположенного со стороны дополнительной разрядной секции 2, имеется патрубок 7 для напуска рабочей смеси. Габариты лазерного резонатора, параметры накачки и прокачки активного вещества были аналогичны параметрам лазера, на котором производились измерения времени синтеза активного вещества.

В эксперименте сравнивалась мощность лазера при двух вариантах подачи рабочих веществ. В первом рабочие вещества подавались через патрубок 4 в электрод 3 и синтез активного вещества осуществлялся преимущественно в дополнительной разрядной секции 2, а в резонатор попадали уже готовые молекулы активного вещества. Во втором варианте подача исходных веществ осуществлялась непосредственно в резо-

натор через патрубок 7. В первом варианте мощность лазерного излучения оказалась на 10 % выше, чем во втором. Так как мощность накачки была одинакова в обоих случаях, то прирост мощности излучения был получен за счет повышения общего КПД лазера, поскольку заполнение резонатора активным веществом увеличилось, а потери в резонаторе не изменились.

Выполнение дополнительной разрядной секции в патрубке, впаянном в разрядную трубку, увеличивает габариты лазера и снижает его надежность, поскольку в местах пайки могут возникать трещины. Поэтому было предложено выполнить разрядную секцию в зазоре между коаксиальным электродом 1 и разрядной трубкой 2 (рис. 4). Для этого в электроде 2 устанавливается патрубок 4 для напуска рабочей смеси и защитное диэлектрическое покрытие 5, повышающее однородность разряда в зазоре. Такая схема лазера запатентована [8].

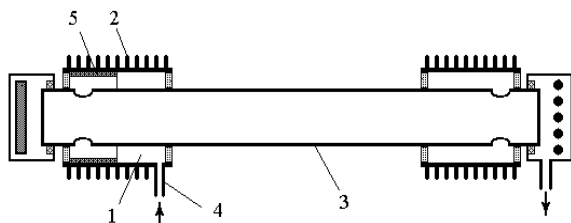


Рис. 4. Лазер с дополнительной разрядной секцией в зазоре между коаксиальным электродом и разрядной трубкой

Таким образом, установлено, что благодаря использованию дополнительной разрядной секции, которая позволяет осуществлять процесс синтеза активного вещества за пределами резонатора, можно увеличить КПД и мощность излучения газоразрядных терагерцевых HCN-лазеров. При этом целесообразно проводить оптимизацию объема дополнительной разрядной секции для различных режимов прокачки. Это, очевидно, позволит повысить КПД и выходную мощность таких лазеров, особенно при высоких интенсивностях прокачки.

1. *Fletcher G. T., Muller W. M.* Submillimeter Gas Laser // Proc. IEEE. – 1966. – 54, no. 4. – P. 543–546.
2. *Kon S., Yamanaka M., Yamamoto J., Yoshinaga H.* Experiments on a Far Infrared CN Laser // Japanese journal of applied physics. – 1967. – 6, no. 5. – P. 612–619.

3. *Mathias L. E., Crocker A., Wills M. S.* Laser oscillations at submillimetre wavelengths from pulsed gas discharges in compounds of hydrogen, carbon, and nitrogen // Electronics Letters. – 1965. – 1–2, April. – P. 45–46.
4. *Sachar V., Braner Eric.* Time dependence of the power output at 337 μ in a CN laser // Applied physics letters. – 1967. – 10, no. 8. – P. 232–234.
5. Пат. 55720А Україна, МПК H01S 3/097. Газорозрядний субміліметровий лазер / М. Ф. Дахов, В. К. Кісельов, Є. М. Кулешов, В. П. Радіонов. – № 2002054235; заявл. 23.05.2002; опубл. 15.04.2003, Бюл. № 4.
6. *Валитов Р. А., Дюбоко С. Ф., Камышан В. В. и др.* Техника субмиллиметровых волн. – М.: Сов. радио, 1969. – 119 с.
7. *Jassby D. L., Marhic M. E., Regan D. R.* High Power Pulsed HCN Laser with Auxiliary dc Discharge // Appltd optics. – 1973. – 12, no. 7. – P. 1403–1405.
8. Пат. 28496 Україна, МПК H01S 3/097. Газорозрядний субміліметровий лазер / В. К. Кісельов, В. П. Радіонов. – № u200709207; заявл. 13.08.2007; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 20.

INFLUENCE OF SYNTHESIS TIME OF THE ACTIVE MATERIAL AND INTENSITY OF PUMPING ON TERAHERTZ GAS-DISCHARGE HCN-LASER PARAMETERS

V. K. Kiseliiov, V. P. Radionov, N. F. Dakhov

The indirect measurement of time of synthesis of an active material of the HCN-laser is executed. The reasons of its influence on the laser parameters are analysed. The method of magnification of power and efficiency of the laser is offered and tested.

Key words: terahertz gas-discharge laser, active material, syntheses.

ВПЛИВ ЧАСУ СИНТЕЗУ АКТИВНОЇ РЕЧОВИНИ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОКАЧКИ НА ПАРАМЕТРИ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ГАЗОРОЗРЯДНОГО HCN-ЛАЗЕРА

В. К. Кісельов, В. П. Радіонов, М. Ф. Дахов

У терагерцевих газорозрядних HCN- і DCN-лазерах синтез активної речовини здійснюється безпосередньо в газовому розряді з первинних речовин. Режим заповнення резонатора активною речовиною має вплив на потужність і ККД лазера. Проведено непрямої вимір часу синтезу активної речовини та проаналізовані причини впливу цього часу на параметри лазера. На основі дослідження запропоновано і випробувано спосіб збільшення потужності та ККД лазера.

Ключові слова: терагерцевий газорозрядний лазер, активна речовина, синтез.

Рукопись поступила 12 декабря 2008 г.