

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА РАЗДВОЕНИЯ ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРИ НАКАЧКЕ HCN-ЛАЗЕРА ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

В. К. Киселев, В. П. Радионов

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

При накачке терагерцевых лазеров переменным током частотой 50 Гц лазерное излучение генерируется в виде импульсов с частотой следования 100 Гц. Форма импульса лазерного излучения изменяется в зависимости от изменения длины резонатора в пределах зоны генерации. Каждый импульс лазерного излучения может распадаться на два отдельных импульса, и частота следования импульсов удваивается. Работа посвящена экспериментальному исследованию и физическому объяснению этого явления. Ил. 4. Библиогр.: 3 назв.

Ключевые слова: терагерцевый газоразрядный лазер, накачка переменным током, форма импульса.

В терагерцевых лазерах с импульсной накачкой может происходить раздвоение импульса лазерного излучения [1]. Такое явление наблюдается и при накачке лазеров переменным током промышленной частоты [2], в которых лазерное излучение генерируется в виде импульсов с частотой следования 100 Гц. В лазерах с такой накачкой, при определенных значениях разрядного тока и параметрах рабочей смеси, наблюдается явление раздвоения импульса лазерного излучения. В зависимости от параметров настройки резонатора в пределах генерации на одной из продольных мод происходит изменение формы импульса излучения. При уменьшении длины резонатора в определенный момент начинается раздвоение импульса вплоть до появления в дальнейшем двух отдельных импульсов. При увеличении расстояния между зеркалами этот процесс повторяется в обратной последовательности. На рис. 1 приведены осциллограммы тока накачки (рис. 1, а) и лазерного излучения (рис. 1, б), демонстрирующие изменение формы и амплитуды импульсов при различных положениях подвижного зеркала резонатора.

Измерения проводились на HCN-лазере с длиной резонатора 1,2 м. Каждая осциллограмма интенсивности лазерного излучения (рис. 1, б) соответствует определенному смещению (на несколько микрометров) подвижного зеркала резонатора от положения оптимальной настройки в пределах пика генерации продольной моды резонатора: 2 – оптимальная длина резонатора, 1 – резонатор удлинен на 5 мкм, 3 – резонатор укорочен на 5 мкм, 4 – резонатор укорочен на 8 мкм. Раздвоение импульса излучения наиболее ярко выражено при значениях тока накачки и параметрах состава рабочей смеси, соответствующих максимальной мощности лазерного излучения. При низких уровнях тока накачки или при неоптимальном составе рабочей смеси раздвоение импульса может не происходить.

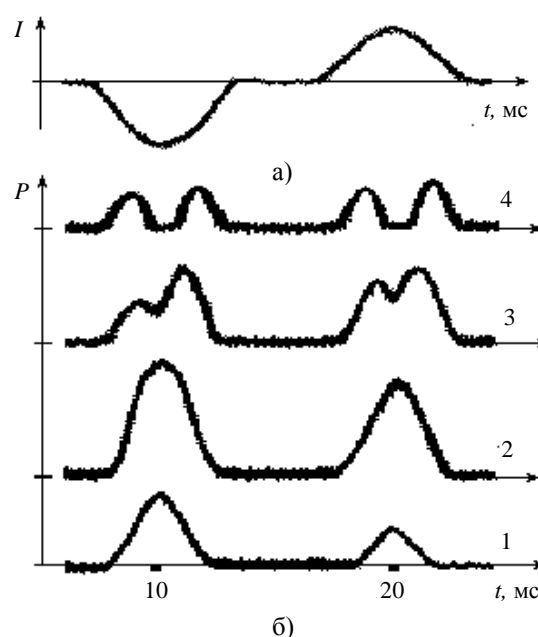


Рис. 1. Осциллограммы: а) – импульсов тока накачки I (в отн. ед.); б) – интенсивности лазерного излучения P (в отн. ед.)

Для изучения этого эффекта были проведены исследования влияния разрядного тока на интенсивность лазерного излучения и оптическую длину резонатора. Исследования проводились на HCN-лазере с длиной резонатора 1,2 м и накачке постоянным током. На рис. 2 приведены зависимости мощности лазерного излучения от тока накачки: 1 – при подстройке резонатора в каждой точке измерения; 2 – при настройке резонатора при токе 0,4 А; 3 – при настройке резонатора при токе 0,15 А.

Из рис. 2 видно, что при изменении разрядного тока требуется корректировать длину резонатора. На рис. 3 приведено изменение резонансной длины резонатора от разрядного тока. С увеличением значения тока резонатор приходилось удлинять для настройки на максимальную мощность излучения.

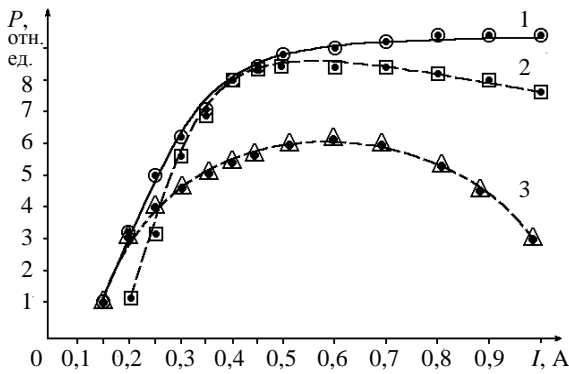


Рис. 2. Зависимость мощности излучения P от разрядного тока I

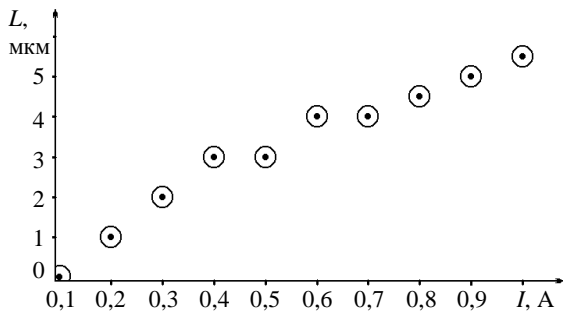


Рис. 3. Зависимость изменения резонансной длины лазерного резонатора от разрядного тока

Попытаемся объяснить это явление. Резонансная длина резонатора задается выражением

$$L = M \frac{\lambda}{2} = M \frac{v}{2f} = M \frac{c}{2nf}, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; M – число полуволн, укладываемое между зеркалами резонатора; v – скорость распространения излучения в резонаторе; f – частота излучения; c – скорость света в вакууме; n – абсолютный показатель преломления активного вещества.

При изменении разрядного тока происходит изменение температуры и плотности активного вещества, а следовательно, изменяется и показатель преломления, что приводит к изменению скорости излучения в резонаторе. В случае подстройки резонатора на центральную частоту, соответствующую максимуму мощности излучения, расчеты производятся без учета дисперсии. В этом случае изменение резонансной длины лазерного резонатора определяется выражением

$$\Delta L = L_1 - L_2 = \frac{(v_1 - v_2)M}{2f_0} = \frac{\left(\frac{c}{n_1} - \frac{c}{n_2}\right)M}{2f_0} = \frac{(n_2 - n_1)cM}{2f_0 n_1 n_2}, \quad (2)$$

где L_1, L_2 – резонансные длины лазерного резонатора, соответствующие определенным токам га-

зового разряда; f_0 – центральная частота лазерного излучения; v_1, v_2 – скорости распространения излучения центральной частоты при соответствующих токах газового разряда; n_1, n_2 – абсолютные показатели преломления активного вещества при соответствующих токах газового разряда для излучения центральной частоты.

Относительное изменение показателя преломления активного вещества можно оценить по относительному изменению резонансной длины резонатора:

$$\frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta L}{L}. \quad (3)$$

Оценка показывает, что при $\Delta n/n$ порядка 10^{-6} изменение резонансной длины метрового резонатора составит ~ 1 мкм.

При накачке лазера с длиной резонатора 1,2 м переменным током промышленной частоты величина разрядного тока в импульсе превышает 1 А, и такие колебания тока приводят к изменению резонансной длины более чем на 10 мкм, что соответствует изменению $\Delta n/n$ на $\sim 10^{-5}$.

Исходя из проведенных исследований изменение формы импульса лазерного излучения можно объяснить тем, что изменение величины тока накачки вызывает изменение коэффициента преломления активной среды, что в свою очередь приводит к изменению оптической длины резонатора. Следовательно, резонатор оказывается настроенным на резонансную длину не все время существования импульса тока накачки, а лишь часть этого времени. Поэтому если резонатор настроен в пределах полосы генерации лазера на резонансную длину, соответствующую току накачки ниже максимального, то будут наблюдаться два резонанса: один – на участке нарастания импульса тока, а второй – на участке его спада, в точке экстремума тока накачки резонатор оказывается расстроенным. Это приводит к снижению и даже исчезновению мощности генерации в центре импульса тока накачки, что наблюдается в форме раздвоения импульса излучения. При настройке резонатора на резонансную длину, соответствующую максимальному току накачки, раздвоение не происходит.

На рис. 4 приведена схема, поясняющая механизм раздвоения импульса лазерной генерации и позволяющая приблизительно оценить одновременное влияние различных факторов на лазерное излучение. На каждом рисунке слева показана зависимость мощности лазерного излучения от разрядного тока при накачке лазера постоянным током (при снятии зависимости производилась корректировка длины резонатора на максимум мощности излучения в каждой точке измерения). Рядом показана зависимость уровня излучения от длины резонатора (контур генерации, или продольная мода резонатора) при посто-

янном токе накачки. Эта зависимость показывает, что генерация возможна только на небольшом интервале (порядка десяти микрометров) изменения длины резонатора.

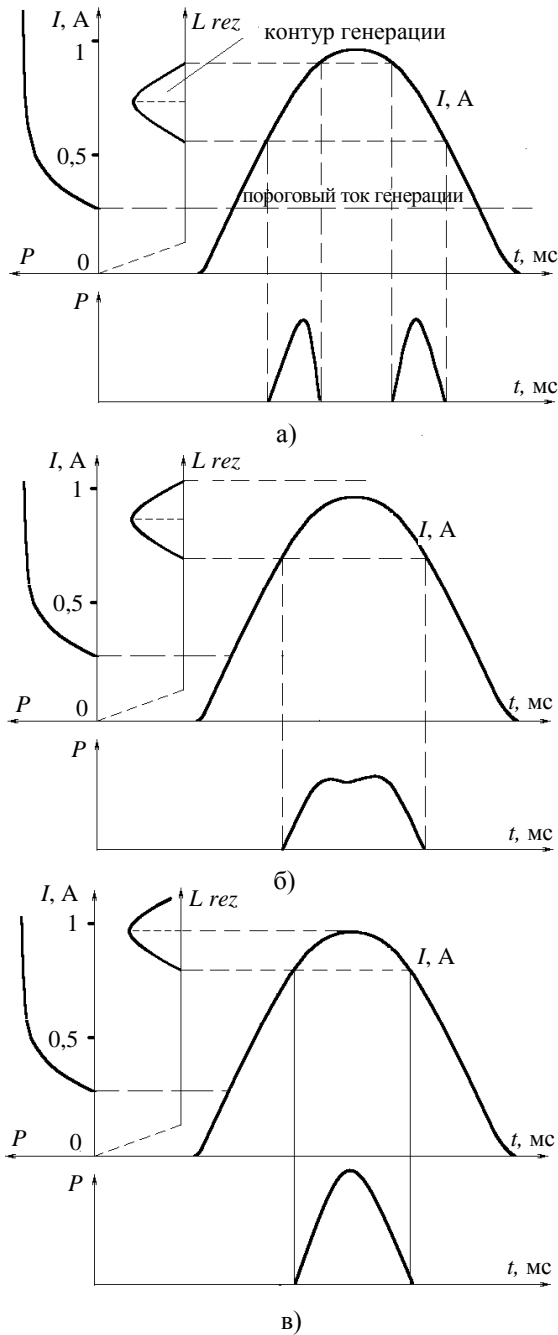


Рис. 4. Схема раздвоения импульса лазерной генерации

Справа на каждом рис. 4 приведена форма импульса разрядного тока при накачке лазера переменным током. С изменением разрядного тока происходит изменение оптической длины резонатора, поскольку изменяется показатель преломления среды. Следовательно, характер изменения во времени оптической длины резонатора подобен форме импульса тока, и условно их

можно изобразить одной кривой. Теперь очевидно, что генерация возможна только в том случае, когда разрядный ток будет выше порогового, а оптическая длина резонатора будет соответствовать резонансу продольной моды, попадающему в контур генерации. Зависимость лазерного излучения от времени приведена в нижней части (рис. 4.).

На рис. 4, а показан случай полного раздвоения импульса лазерной генерации. При максимальном токе резонатор полностью расстроен. С помощью подвижного зеркала резонатора можно перемещать контур генерации по оси L , при этом форма импульса лазерной генерации будет изменяться.

На рис. 4, б показан случай частичного раздвоения лазерной генерации, когда при максимальном токе настройка резонатора не оптимальна. На рис. 4, в показан случай, соответствующий положению зеркала, при котором резонатор настроен под максимальный ток и раздвоение импульса лазерной генерации не происходит.

На основании проведенных наблюдений можно сделать вывод, что для повышения мощности и КПД лазера с накачкой переменным током низкой частоты целесообразно, чтобы импульсы тока накачки были прямоугольной формы, в этом случае легко обеспечить настройку резонатора в течение всего времени импульса тока. Также можно, сохранив прежнюю форму импульса накачки, корректировать длину резонатора синхронно с изменением тока накачки с помощью пьезоэлектрических или электромагнитных механизмов перемещения, что позволит на ~ 50 % повысить КПД и мощность лазера.

Эффект раздвоения импульса лазерной генерации можно использовать для удвоения частоты модуляции лазерного излучения без каких-либо конструктивных или схемных усложнений [3].

Поскольку изменение разрядного тока вызывает изменение оптической длины резонатора, то путем изменения разрядного тока можно осуществлять изменение частоты лазерного излучения в пределах ширины спектральной линии, составляющей приблизительно 10 МГц.

При этом можно свести к минимуму паразитную амплитудную модуляцию, если выбрать рабочий диапазон изменения тока, соответствующий участку крутого возрастания мощности излучения (см. рис. 2), и настроить резонатор при минимальном токе из этого диапазона. Тогда увеличение мощности излучения, вызванное увеличением тока накачки, компенсируется отстройкой от центральной частоты спектральной линии.

Объяснение эффекта раздвоения импульса лазерного излучения помогает глубже понять физические процессы, сопутствующие работе терагерцевых лазеров. Это открывает новые пути повышения их мощности и КПД, а также позво-

ляет расширить диапазон функционального применения таких лазеров. Перестройка частоты путем изменения тока накачки и удвоение частоты модуляции могут использоваться в физических исследованиях и для передачи информации в терагерцевом диапазоне.

1. *Shozo Kon., Masaanobu Yamanaka, Junya Yamamoto, Hiroshi Yoshinaga.* Experiments on a Far Infrared CN Laser // Japanese journal of applied physics. – 1967. – 6, No. 5. – P. 612–619.
2. *Дахов Н. Ф., Каменев Ю. Е., Киселев В. К. и др.* Субмиллиметровый HCN-лазер для биомедицинских исследований // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 1997. – 2, № 2. – С. 150–153.
3. *Киселев В. К., Радионов В. П.* Простые методы модуляции излучения субмиллиметровых газоразрядных биомедицинских лазеров // 22-я Междунар. науч.-практ. конф. «Применение лазеров в медицине и биологии»: Тез. докл. – Ялта, 2004. – С. 137.

RESEARCH OF EFFECT OF LASER GENERATION PULSE BIFURCATION WHEN HCN-LASER IS PUMPED BY ALTERNATING CURRENT

V. K. Kiseliov, V. P. Radionov

In terahertz HCN lasers, with pumping by alternating current with frequency 50 Hz, laser radiation is generated as pulses

with frequency of following 100 Hz. A radiation pulse shape changes depending on variation of the resonator length within the generation zone. Each pulse of laser radiation can be transformed on two separate pulses. Frequency of pulses, thus, is doubled. The explanation of this phenomenon is given at the paper.

Key words: terahertz gas-discharge laser, pumping by alternating current, pulse shape.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ РОЗДВОЄННЯ ІМПУЛЬСУ ЛАЗЕРНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ПРИ НАКАЧУВАННІ HCN-ЛАЗЕРА ЗМІННИМ СТРУМОМ

В. К. Кісельов, В. П. Радіонов

При накачуванні терагерцевих лазерів змінним струмом частотою 50 Гц лазерне випромінювання генерується як імпульси з частотою проходження 100 Гц. Форма імпульсу лазерного випромінювання змінюється в залежності від зміни довжини резонатора в межах зони генерації. Кожен імпульс лазерного випромінювання може розпадатися на два окремих імпульси, і частота проходження імпульсів подвоюється. Робота присвячена експериментальному дослідженню й фізичному поясненню цього явища.

Ключові слова: терагерцевий газорозрядний лазер, накачування змінним струмом, форма імпульсу.

Рукопись поступила 30 апреля 2009 г.