

07;10

## **Ограничение мощности генерации в лазере на атоме ксенона с накачкой импульсно-периодическим пучком электронов**

© В.Р. Гиматдинов, А.В. Карелин, Д.Л. Кузнецов, Ю.Н. Новоселов,  
О.В. Симакова, Ю.С. Сурков

ГОУ Уральский государственный технический университет(УГТУ–УПИ),  
Екатеринбург  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
РАН, Троицк  
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
E-mail: nov@ier.uran.ru

*Поступило в Редакцию 22 июля 2003 г.*

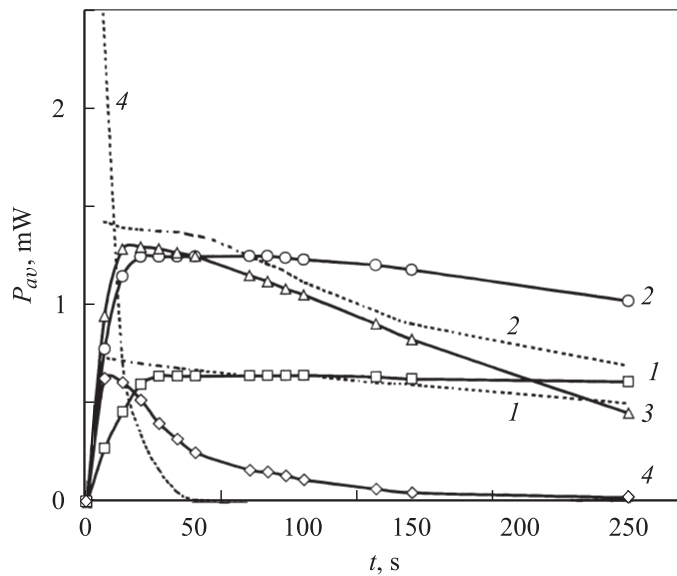
Приведены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований характеристик лазерной генерации с длиной волны  $1.73\ \mu\text{m}$  на атоме ксенона при использовании в качестве источника накачки импульсного ускорителя электронов с частотой следования импульсов до 100 Hz. Показано, что спад средней мощности лазерной генерации во времени связан с нагревом активной среды.

Лазер на атоме Хе является одним из наиболее перспективных для технологических применений источников излучения в ближней ИК-области. К настоящему времени изучению характеристик ксенонового лазера с накачкой электронным пучком или осколками деления ядерных реакций посвящено огромное количество работ. Установлено, что наиболее эффективной является генерация в смеси Ag–Хе на длине волны  $1.73\ \mu\text{m}$ , на которой в оптимальных условиях генерации высвечивается более 90% лазерной энергии. Так, при накачке импульсным электронным пучком в этой смеси атмосферного давления были получены максимальные выходные параметры излучения [1]: достигнут максимальный КПД 4.5% при длительности импульса  $4.5\ \mu\text{s}$  и плотности тока пучка  $\sim 0.4\ \text{A/cm}^2$ .

При увеличении длительности импульса накачки до единиц миллисекунд в ряде работ были обнаружены снижение мощности генерации и даже ее срыв задолго до окончания импульса накачки. Теоретические представления о процессах в активной среде лазера на смеси Ar–Xe с накачкой жестким ионизатором, а также конкретные численные расчеты [2] свидетельствуют о том, что основной причиной этого является нагрев активной среды во время действия импульса накачки. Представляет интерес выяснение влияния этого эффекта на работу лазера, накачиваемого импульсным электронным пучком с высокой частотой повторения импульсов.

Эксперименты выполнялись с использованием частотного ускорителя электронов, электрическая схема и конструкция которого описаны в [3]. Ускоритель создан на базе генератора импульсных напряжений с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. В качестве последних использованы SOS-диоды, аналогичные описанным в [4]. Ускоритель генерировал импульсный электронный пучок с длительностью на полувывоте 35–40 ns, энергией электронов 235–230 keV, током за выводной фольгой 330–300 А и сечением  $8 \times 85$  см. Частота могла изменяться от единиц импульсов в секунду до 100 Hz в длительном режиме работы (несколько часов). В кратковременном режиме при включении ускорителя на несколько секунд частота следования импульсов могла достигать 1000 Hz.

Лазерная кювета, выполненная из нержавеющей стали, имела вид полуцилиндра с диаметром 8 см. Стенки кюветы, которые охлаждались проточной водой, имели постоянную температуру  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . В ходе экспериментов проводились измерения температуры газовой смеси. Температура определялась с помощью терморезистора типа ММТ-1, а также в процессе импульсного облучения смеси электронным пучком по скачку давления, измеряемого дифференциальным манометром. На торцах кюветы смонтированы юстировочные узлы, в которых закреплялись зеркала в виде плоскопараллельных кварцевых пластин с многослойным диэлектрическим покрытием. На длине волны  $1.73 \mu\text{m}$  зеркала имели коэффициенты отражения 99.85 и 94.7%. Объем, с которого снималось лазерное излучение, имел вид цилиндра с диаметром 2 и длиной 85 см. В качестве активной среды использовалась газовая смесь аргона и ксенона в соотношении 200:1 при давлении 1.5 atm. Смесь готовилась в газовом смесителе, в котором она перемешивалась, а затем напускалась в предварительно откачанную до  $10^{-2}$  Торг лазерную кювету.



**Рис. 1.** Зависимости средней мощности лазерной генерации  $P_{av}$  от времени при частоте следования импульсов  $f$ , Hz; 1 — 5, 2 — 10, 3 — 25, 4 — 100. Сплошная линия — эксперимент, пунктир — расчет.

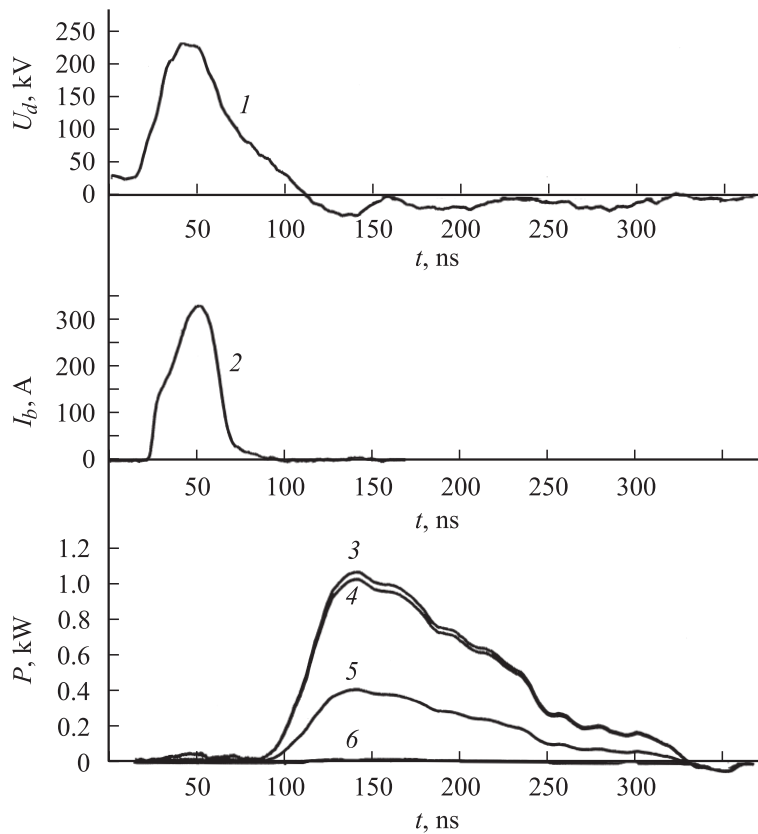
Удельная энергия накачки не превышала  $6 \cdot 10^{-5} \text{ J/cm}^3 \cdot \text{atm}$ , при этом максимальная мощность накачки всего объема лазерной кюветы была реализована при частоте следования импульсов 100 Hz и составляла 1.4 W/atm. Для регистрации мощности лазерного излучения применялся измеритель мощности ИМО-2Н.

На рис. 1 сплошными линиями приведены зависимости средней мощности лазерного излучения на длине волны  $1.73 \mu\text{m}$  от времени работы лазера. Видно, что при невысоких частотах  $f$  повторения импульса накачки лазерная генерация устанавливается на определенном уровне, зависящем от частоты (кривые 1, 2). Время установления средней мощности генерации также зависит от  $f$  и определяется инерционностью нагрева измерительного элемента ИМО-2Н. Повышение частоты приводит к тому, что средняя мощность генерации, достигнув максимального значения, с течением времени снижается

(кривые 3, 4). Так, например, при  $f = 25$  Hz максимальная средняя мощность, регистрируемая измерителем ИМО-2Н, достигается на 30 s, затем она снижается и становится равной нулю на 800 s. Для  $f = 100$  Hz эти времена составляют соответственно 10 и 300 s.

Подобное ограничение мощности генерации связано, на наш взгляд, с нагревом активной среды. Во многих экспериментальных работах было установлено, что вследствие повышения температуры Ar–Xe смеси ее генерационные характеристики ухудшаются задолго до достижения максимального уровня накачки при энерговкладах  $\sim 100$  mJ/cm<sup>3</sup> (перечень таких работ см., например, в [2]). На наш взгляд, нагрев активной среды приводит, во-первых, к росту эффективности заселения нижнего лазерного уровня рабочего перехода  $5d[3/2]_1^0 - 6p[5/2]_2$  атома ксенона снизу из состояния  $6s'$ , а во-вторых, к уменьшению концентрации ArXe<sup>+</sup> и, следовательно, к уменьшению потока диссоциативной рекомбинации иона ArXe<sup>+</sup>, участвующей в накачке верхнего рабочего уровня. Это вызывает нарушение состояния инверсной населенности, что приводит к срыву лазерной генерации. В [2] были выполнены расчеты для случая ядерной накачки Ar–Xe смеси при длительности импульса в единицы миллисекунд. Установлено, что именно рост скорости заселения нижнего уровня снизу из состояний  $6s$  и  $6s'$  и уменьшение потока диссоциативной рекомбинации иона ArXe<sup>+</sup> приводит к прекращению генерации лазерного излучения еще во время импульса накачки.

Подобные расчеты были выполнены и для случая накачки активной среды частотным электронным пучком наносекундной длительности применительно к условиям описываемых экспериментов. Расчеты показали, что созданная в [2] модель активной среды лазера на атоме Xe позволяет адекватно описать результаты опытов, выполненных в данной работе. Полученные в расчетах зависимости средней мощности лазерной генерации от времени работы лазера и частоты следования импульсов накачки  $f$  показаны на рис. 1 пунктирными линиями. В расчетах не учитывались переходная характеристика измерителя мощности ИМО-2Н и охлаждение газовой смеси за счет теплообмена со стенками лазерной кюветы, именно с этим связаны отличия расчетных и экспериментальных зависимостей, наблюдаемые на рис. 1. В опытах было показано, что каждой частоте  $f$  соответствует собственное значение температуры газовой смеси, устанавливающееся в результате нагрева газа под действием электронного пучка и теплообмена с



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения на диоде ускорителя  $U_d$  (1), тока электронного пучка  $I_b$  (2) и импульсной мощности лазерной генерации  $P$  при частоте следования импульсов  $f$ , Hz: 3 — 0, 4 — 10, 5 — 25, 6 — 100.

охлаждаемыми стенками лазерной кюветы. Так, частотам  $f = 10, 25$  и  $100$  Hz соответствует нагрев смеси на  $11.5, 23.4$  и  $81.2^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения на вакуумном диоде, тока электронного пучка, выведенного за фольгу ускорителя, и лазерного излучения при разных частотах  $f$  следования импульса накачки. Из осциллограмм видно, что длительность

задержки между импульсами накачки и лазерной генерации стабильна и не зависит от частоты. Видно также, что увеличение частоты  $f$  и соответственно температуры газовой смеси не приводит к изменению формы импульса лазерной генерации, а вызывает уменьшение его амплитуды. Это свидетельствует о том, что изменений кинетики создания инверсной населенности на рабочем лазерном переходе не происходит: с ростом частоты и температуры уменьшается лишь концентрация инверсно-возбужденных атомов ксенона.

Из полученных данных следует, что при невысоком уровне нагрева газовой смеси в лазере на атоме ксенона обеспечивается стабильная лазерная генерация. Выполненные опыты свидетельствуют о возможности создания высокочастотного лазера непрерывного действия с накачкой импульсным электронным пучком при условии обеспечения охлаждения активной среды.

Работа выполнена в рамках проекта № ЧО015/2301 федеральной целевой программы „Интеграция науки и высшего образования России“.

## Список литературы

- [1] *Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н.* и др. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. С. 493–500.
- [2] *Карелин А.В., Симакова О.В.* // Квантовая электроника. 1999. Т. 28. В. 2. Ч. 1. С. 121–128. Ч. 2. С. 129–135.
- [3] *Загулов Ф.Я., Кладухин В.В., Кузнецов Д.Л.* и др. // ПТЭ. 2000. № 5. С. 71–76.
- [4] *Дарзбек С.А., Любутин С.К., Рукин С.Н.* и др. // Электроника. 1999. № 4. С. 20–28.