

09

## Лазер на парах бромида железа

© В.Б. Суханов<sup>1</sup>, Д.В. Шиянов<sup>1,2</sup>, М.В. Тригуб<sup>1,2</sup>, В.А. Димаки<sup>1</sup>,  
Г.С. Евтушенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

<sup>2</sup> Томский политехнический университет,

E-mail: qel@iao.ru; evt@tpu.ru

Поступило в Редакцию 2 ноября 2015 г.

Исследованы характеристики лазера на парах бромида железа с длиной волны излучения 452.9 nm, работающего в частотном диапазоне 5–30 kHz. Показано, что максимальная мощность генерации составила 10 mW на частотах следования 5–15 kHz при напряжении на электродах газоразрядной трубки 20–25 kV. Установлено, что добавка НВг выравнивает радиальный профиль излучения лазера. Впервые зафиксирована генерация на линии 868.9 nm, исчезающая с появлением линии 452.9 nm.

На сегодняшний день задача создания источников излучения с узкими линиями генерации (и усиления) является весьма актуальной [1–3], в частности, применительно к задачам визуализации различных объектов и процессов, протекающих в условиях фоновой засветки [4–6]. Интерес представляет расширение спектрального диапазона, в котором лазеры на парах металлов могут оказать конкуренцию твердотельным лазерам. Одним из таких источников может стать лазер на парах железа, излучающий в голубой области спектра, с длиной волны 452.9 nm.

Впервые генерация в парах железа реализована в [7], где в разрядной трубке среднего объема (140 см<sup>3</sup>) на частоте следования импульсов 1 kHz получена средняя мощность 6 mW (пиковая мощность 1 kW, удельная средняя мощность 0.04 W/cm<sup>3</sup>). Длительность импульса генерации по полувысоте 6 ns. В качестве буферного газа использован неон при давлении 1.5–3.5 Torr. Рабочая температура активного объема 1680°C. Максимальные на сегодня значения выходной мощности излучения лазера на парах железа на линии 452.9 nm (37 mW — средняя и 0.86 mW/cm<sup>3</sup> — удельная) достигнуты в работе [8]. Указанные величины реализованы в саморазогревной газоразрядной трубке диаметром 1 cm и длиной 55 cm (рабочий объем 43 см<sup>3</sup>), при давлении буферного газа

неона 4 Torr. Отмечено, что генерация реализуется только при высоких значениях напряженности электрического поля, что объясняется высоким расположением верхнего лазерного уровня.

В работе [9], с тем чтобы снизить рабочую температуру активного объема, впервые предпринята попытка получить генерацию в галогениде (хлориде) железа. Сообщалось о получении эффекта генерации на линии 452.9 nm, в режиме сдвоенных импульсов накачки. Выходная мощность излучения в статье не указана, но отмечено, что она малая. Величина задержки между импульсами диссоциации и накачки составила 65  $\mu$ s, что в переводе на частоту регулярных импульсов означает 15.5 kHz. Также известен гибридный лазер на парах железа с диаметром разрядной трубки 1.3 cm и длиной 30 cm, рабочий объем 40 cm<sup>3</sup> [10], в котором средняя мощность излучения достигала 10 mW (удельная 0.03 mW/cm<sup>3</sup>), при частоте следования импульсов 15 kHz. Оптимальное давление неона составило 30 Torr.

В данной работе представлены результаты по исследованию характеристик лазера на парах бромида железа в частотном диапазоне от 5 до 30 kHz.

Для получения генерации на переходе атома железа была использована газоразрядная трубка (ГРТ) с длиной активной зоны 40 cm и диаметром 1.8 cm, конструкция которой представлена в работе [11]. Буферным газом являлся неон при давлении 30 Torr. Рабочее вещество в виде порошка FeBr<sub>2</sub> располагалось в отростках с независимым подогревом. Температура внешней стенки ГРТ с помощью специального нагревателя поддерживалась постоянной при изменении энергозатрат за счет использования регулятора температуры. Для работы с добавкой активной примеси HBr применялся генератор галогеноводорода на цеолитовой основе. Для накачки ГРТ использована схема накачки с импульсным зарядом рабочей емкости [11]. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ1-1000/25. Для повышения напряжения на ГРТ в схему накачки включался импульсный кабельный трансформатор с коэффициентом трансформации 2.

Роль резонатора выполняли зеркало с коэффициентом отражения 96% в диапазоне длин волн 410–460 nm и кварцевая плоскопараллельная пластинка. Измерение электрических характеристик разряда осуществлялось с помощью датчика тока PersonTM 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy WaveJet 324. Импульсы излучения фиксировались с помощью фотоприемника ФК-19.

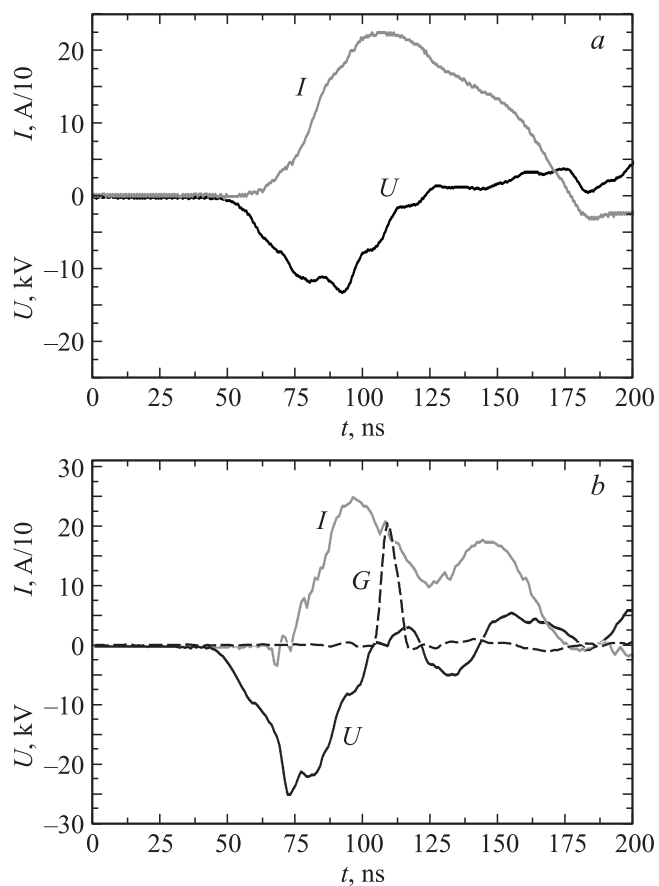
Мощность излучения измерялась измерителем Ophir 20C-SH. Для построения профиля излучения применялся профилометр Spiricon SP503U со специализированным программным обеспечением VeamGage v.5.4. Для обеспечения высокого динамического диапазона применялись нейтральные светофильтры, исключающие насыщение сенсора. Для регистрации спектра излучения применялся спектрометр Ocean Optics USB4000-VIS-NIR-ES.

Исследование зависимости мощности излучения лазера от частоты следования показало, что максимальное значение  $10 \text{ mW}$  достигается в частотном диапазоне  $5\text{--}15 \text{ kHz}$  при температуре стенки ГРТ  $700^\circ\text{C}$ . При дальнейшем увеличении частоты мощность излучения падает. Возможно, это связано с уменьшением напряжения на разрядном промежутке. Максимум импульсной мощности, рассчитанной по высоте импульса генерации, составил  $250 \text{ W}$ .

Использование импульсного кабельного трансформатора позволило вдвое увеличивать напряжение на электродах ГРТ при наличии в ГРТ оптимального давления бромида железа. Так на частоте  $10 \text{ kHz}$  при поступлении паров рабочего вещества в активную зону наблюдалось резкое увеличение напряжения с  $12.5$  до  $25 \text{ kV}$ , что объясняется уменьшением проводимости плазмы активной среды. Для этого случая на рис. 1 представлены осциллограммы импульсов тока через ГРТ, напряжения на ГРТ и генерации при отсутствии паров (*a*) и при их оптимальной концентрации, определяемой по максимуму мощности излучения (*b*). Появление генерации соответствовало напряжению  $15 \text{ kV}$ . Дальнейшее увеличение напряжения сопровождалось ростом выходной мощности.

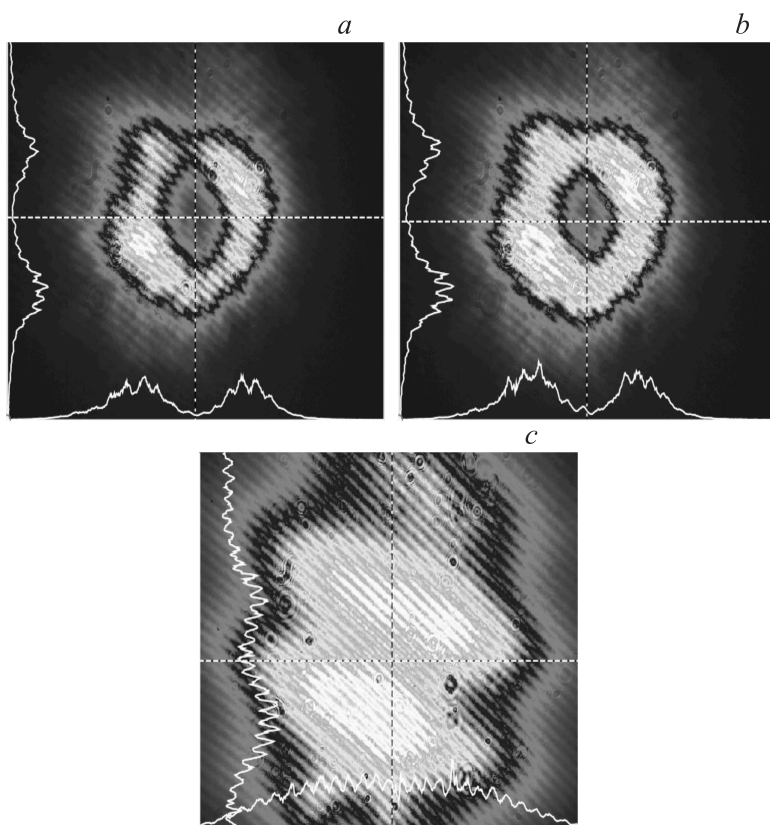
Как видно из осциллограмм, пары бромида железа вносят задержку тока относительно напряжения, составляющую  $\sim 15 \text{ ns}$ , что создает благоприятные условия для накачки верхних лазерных уровней в начальные моменты времени. Аналогичная картина наблюдалась во всем исследуемом частотном диапазоне ( $5\text{--}30 \text{ kHz}$ ). Наличие задержки, по аналогии с работой [12], можно связать с эффектом диссоциативного прилипания электронов к молекулам  $\text{HBr}$ , которые всегда присутствуют в разряде, за счет остаточного неконтролируемого количества водорода в ГРТ.

Интересно отметить тот факт, что при поступлении паров  $\text{FeBr}_2$  наблюдается изменение спектра излучения. Первой по мере разогрева появляется генерация на переходе  $z^5P_3^0 \rightarrow a^5P_3$  с длиной вол-



**Рис. 1.** Осциллограммы импульсов напряжения ( $U$ ) на ГРТ, тока через ГРТ ( $I$ ) и импульса генерации ( $G$ ) при отсутствии ( $a$ ) и наличии ( $b$ ) паров рабочего вещества в среде. Частота следования импульсов 10 кГц, рабочая емкость 1566 пФ.

ны 868.9 nm, которая в перечисленных выше работах не наблюдалась. Однако мощность излучения на этой линии мала и не фиксировалась используемыми нами приемниками излучения. Спектр излучения наблюдался в режиме реального времени. По мере того как давление паров достигало своего оптимального значения, наблюдалось уменьше-



**Рис. 2.** Профиль излучения на линии 452.9 nm при различной концентрации паров рабочего вещества в отсутствие НВг (*a, b*) и с добавкой НВг (*c*).

ние энергии излучения на линии 868.9 nm, имеющей общий нижний уровень с основным переходом  $x^5D_4^0 \rightarrow a^5P_3$  с длиной волны 452.9 nm, и появлялось излучение на этом переходе. Такое поведение излучения мы связываем с конкуренцией между двумя указанными переходами. Осциллограммы свидетельствуют, что этот момент времени сопровождается увеличением напряжения на ГРТ, что и позволяет эффективно возбуждать верхний рабочий уровень  $x^5D_4^0$ . Отметим, что достигнутые

выходные параметры, по-видимому, далеки от предельных и могут быть увеличены. В отличие от работы [8], рабочие давления у нас в 4.5 раза выше, а в качестве выходного зеркала мы используем плоскопараллельную пластинку, а не зеркало с оптимальным коэффициентом отражения (32%, согласно [8]).

Важным параметром лазерного излучения является его профиль. Нами было проведено исследование профиля излучения лазера на парах бромида железа при различных концентрациях  $\text{FeBr}_2$ . На рис. 2, *a, b* показан типичный профиль излучения для двух разных значений концентрации паров  $\text{FeBr}_2$ . Как видно, картина типична для лазеров на парах галогенидов металлов, в центре пучка излучения которых в отсутствие активной добавки  $\text{HBr}$  имеется „провал“ [13,14].

На примере  $\text{CuBr}$ -лазера можно было предположить, что добавка  $\text{HBr}$  позволит в значительной мере избавиться от „провала“ в центре излучения, что и было экспериментально подтверждено (рис. 2, *c*).

Однако в отличие от  $\text{CuBr}$ -лазера [15] добавка  $\text{HBr}$  не привела к увеличению мощности излучения. Как мы полагаем, это связано с тем, что положительный эффект добавки  $\text{HBr}$  начинает проявляться только после превышения порогового значения мощности накачки, как это имеет место быть для  $\text{CuBr}$ -лазера [16]. А в нашем эксперименте мы его просто не смогли достигнуть из-за ограничения по источнику накачки (не более 2 kW).

Таким образом, впервые исследованы характеристики лазера на парах бромида железа, работающего в импульсно-периодическом режиме в диапазоне 5–30 kHz. На линии 452.9 nm получена мощность излучения 10 mW, длительность импульса генерации по полувысоте  $\sim 8$  ns. Удельная мощность излучения при этом составила 0.14 W/cm<sup>3</sup>. Установлено, что радиальный профиль излучения имеет провал в центре пучка излучения, но с введением добавки  $\text{HBr}$  профиль выравнивается. Впервые удалось зафиксировать слабую генерацию на линии 868.9 nm, которая исчезает с появлением генерации на основном переходе. Указанные характеристики лазера достигнуты при использовании импульсного кабельного трансформатора в схеме накачки, что позволяет повысить напряжение на ГРТ при наличии паров  $\text{FeBr}_2$  в два раза, и, по-видимому, не являются предельными.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-19-00175.

## Список литературы

- [1] Шиянов Д.В., Тригуб М.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Власов В.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 4. С. 93–96.
- [2] Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. // Изв. вузов. Сер. Физика. 2012. Т.55. № 10. С.46–50.
- [3] Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 4. С. 321–325.
- [4] Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyarov D.V. // Rev. Scientific Instruments. 2014. V. 85. P. 033 111 (1–5).
- [5] Trigub M.V., Shiyarov D.V., Vlasov V.V. // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014): IEEE Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2014. P. 301–304.
- [6] Тригуб М.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 850–853.
- [7] Linevsky M.J., Karras T.V. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 8. P. 720.
- [8] Дивин В.Д., Исаков В.К. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 5. С. 1038–1041.
- [9] Nerheim N.M., Bartman N.K. // Proceedings of the International Conference on lasers, 1979. STS Press. McLean. Virginia. 1980. P. 323.
- [10] Jones D.R., Little C.E. // Opt. Quantum Electrons. 1992. V. 24. N 1. P. 67–72.
- [11] Андриенко О.С., Губарев Ф.А., Димаки В.А., Иванов А.И., Левицкий М.Е., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Федоров В.Ф., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 10. С. 999–1009.
- [12] Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 7. С. 596–600.
- [13] Gubarev F.A., Troitskiy V.O., Trigub M.V., Sukhanov V.B. // Opt. Commun. 2011. V. 284. N 10–11. P. 2565–2568.
- [14] Шиянов Д.В. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов: Дис. к.ф.-м.н. Томск, 2007. 125 с.
- [15] Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 7. С. 625–629.
- [16] Gubarev F.A., Shiyarov D.V., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S. // IEEE J. Quantum Electrons. 2013. V. 49. N 1. P. 89–94.