

УДК 621.373.8

Лазеры на парах металлов с индукционным нагревом рабочей зоны

М.В. Тригуб^{1,2}, В.Ф. Федоров¹, Д.В. Шиянов^{1,2}, Г.С. Евтушенко^{1,2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 17.01.2018 г.

Представлены результаты разработки и исследования активных элементов на парах металлов с использованием индукционного нагревателя. Нагреватель предназначен для создания требуемой концентрации паров рабочего вещества. Получена генерация при традиционном (газоразрядная трубка с внутренними электродами) и емкостном возбуждении активной среды; средняя мощность излучения составила 20 мВт. Для активного элемента на парах меди с емкостным типом возбуждения зафиксированы два импульса генерации с временной задержкой 50 нс. Таким образом, в рамках одного импульса накачки получена генерация с частотой 20 МГц.

Ключевые слова: лазер на парах металлов, индукционный нагрев, традиционная накачка, емкостная накачка, газоразрядная трубка; metal vapor laser, induction heater, traditional excitation, capacitive excitation, gas discharge tube.

Введение

Известны разные способы создания паров рабочего вещества в активных средах лазеров на парах металлов (см., например, [1–3]). Для лазеров на парах галогенидов металлов предложен метод с внутренним реактором галогенида [4], который позволяет производить замену рабочего вещества — металла. Кроме создания паров рабочего металла, разрабатываются новые методы возбуждения лазеров на парах металлов, например с помощью емкостного барьерного разряда [5] или индукционной накачки [6]. Это — бесконтактные методы; они позволяют упростить конструкцию лазерной головки и увеличить срок ее службы за счет отсутствия контакта электродов с активной средой. Использование в конструкции лазера на парах галогенида металла внешних нагревателей и термостабилизаторов позволяет изменять параметры генерации и усиления [7]. В литературе представлены результаты исследования характеристик таких лазеров [7, 8], в том числе с внутренним реактором галогенида [9, 10], которые свидетельствуют о перспективности их развития.

В данной работе проанализирована возможность использования индукционного нагрева для создания требуемой концентрации паров рабочего вещества в активной среде. Рассмотрены некоторые новые конструкции активных элементов, в том числе при возбуждении активной среды барьерным емкостным разрядом.

* Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Валерий Федорович Федоров (qel@mail.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asf.iao.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (evt@tpu.ru).

Экспериментальная установка

Для исследования возможности использования индукционного нагрева в лазерах на парах металлов были изготовлены два активных элемента: для изучения традиционной накачки (внутренние электроды) и емкостной накачки (внешние электроды). Их конструкции показаны на рис. 1.

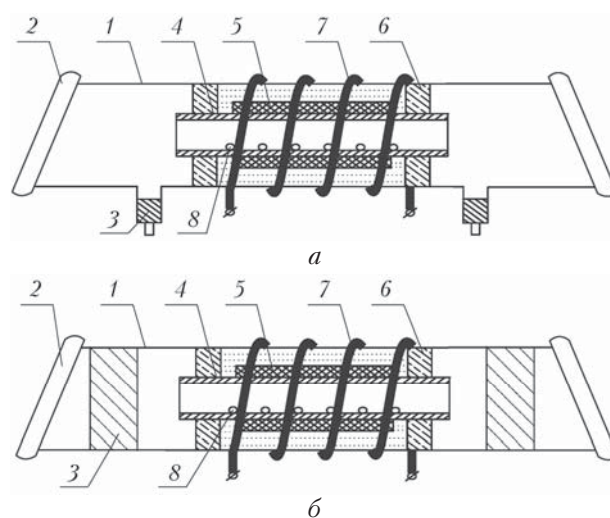


Рис. 1. Конструкция активных элементов лазеров на парах меди при внутреннем расположении нагревателя с различным типом возбуждения: внутреннее (а), внешние электроды (б)

Активные элементы выполнены из кварца 1, их внешний диаметр составляет 20 мм. Излучение выводится через кварцевые окна 2. Электроды 3 служат

для возбуждения активной среды. Для испарения меди 8, расположенной в керамической трубке 4, используется индуктор 7. Нагрев происходит за счет графитовой трубки 5. Для теплоизоляции активной зоны применяется теплоизолятор и пробка 6, препятствующая его высыпанию. Отличительная особенность конструкции — нагреваемый элемент (графитовая трубка) находится в активной среде.

Диаметр активной зоны составляет 4 мм — диаметр кварцевой трубки, а длина 140 мм — длина нагреваемой части. Трубка выходит за пределы нагреваемой части на 1 см с каждой стороны. Частота работы индуктора равна 100 кГц; мощность, потребляемая источником от сети — 500 Вт.

Одна из проблем, которую можно решить с использованием предлагаемой конструкции, разделение функции испарения металла (создание паров рабочего вещества) и возбуждения атомов металла, как было предложено в ряде работ, например [11, 12]. Это позволяет подробно исследовать параметры, ограничивающие частотно-энергетические характеристики лазеров на парах металлов.

Для оценки возможности использования предложенной конструкции активных элементов была проведена серия экспериментов по получению генерации в таких активных элементах. Для их возбуждения применялась схема с прямым разрядом накопительного конденсатора на газоразрядной трубке (ГРТ) через согласующий импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации, равным двум (подробное описание схемы см. в [13]). Импульсы напряжения и тока регистрировались высоковольтным пробником Tektronics P6015A и датчиком тока Pearson Current Monitors 8450. Для регистрации импульсов лазерного излучения использовались коаксиальные фотоэлементы ФЭК-14К и фотодиод Thorlabs DET10A; импульсы фиксировались с помощью цифрового четырехканального осциллографа LeCroy (WJ324 A). Мощность лазерного излучения определялась измерителем мощности Ophir 30C-SH.

На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения, тока и генерации для активного элемента с внутренними электродами (рис. 1, а) при частоте следования импульсов 3 кГц.

Один из недостатков конструкции с внутренними электродами — наличие паразитной емкости, которая образуется между электродами и графитом, что ведет к необходимости повышения напряжения накачки. Очевидно, что в таких условиях исследование процессов, влияющих на частотно-энергетические параметры, не представляется возможным. Средняя мощность генерации с плоскопараллельным резонатором составила 20 мВт.

Осциллограммы импульсов напряжения, тока и генерации для ГРТ с внешними электродами (емкостная накачка) приведены на рис. 3.

Импульс генерации L совпадает по времени с максимумом тока, однако напряжение на потенциальном электроде в этот момент практически спадает до нуля (рис. 3, б). На наш взгляд, это связано с влиянием паразитных емкостей, одна из обкладок

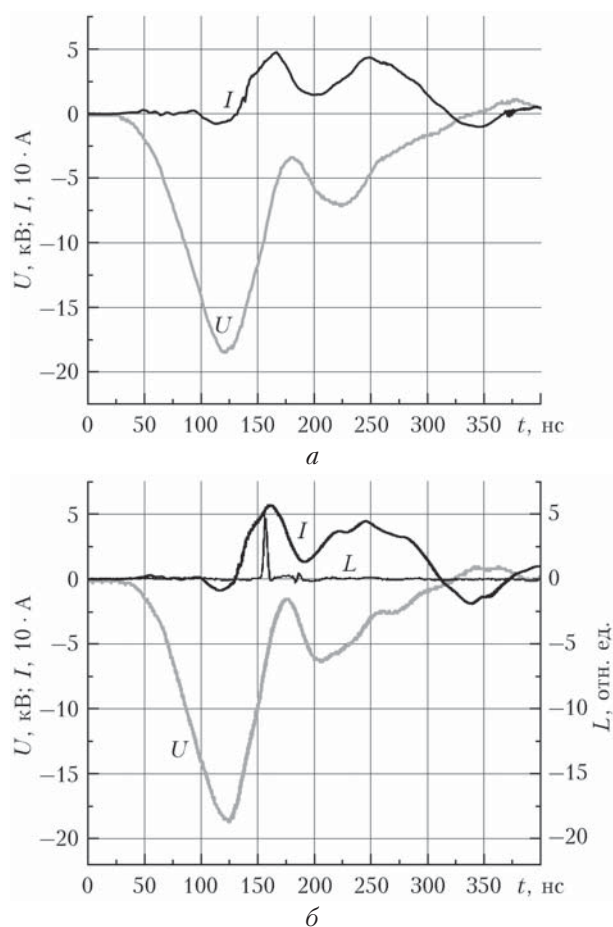


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения U , тока I , генерации L для активного элемента с внутренними электродами при выключенном индукционном нагревателе (а) и в стационарном тепловом режиме (б)

которых — графитовый нагреватель 5. Использование импульсного трансформатора в разрядном контуре вызывает колебания напряжения и тока накачки, что негативно влияет на генерационные характеристики: средняя мощность генерации не превышала 20 мВт, частота следования импульсов возбуждения составляла 10 кГц. При снижении частоты следования импульсов до 3 кГц, были получены осциллограммы, представленные на рис. 4.

Видно, что снижение частоты следования импульсов накачки привело к увеличению фронта напряжения на ГРТ. При этом частота колебаний тока I осталась неизменной (20 МГц). На рис. 4 показано, что импульс генерации в рамках импульса накачки состоит из двух импульсов, частота следования которых также составляет 20 МГц. При этом первый пик (90 нс) имеет меньшую амплитуду, чем второй (140 нс). Аналогичная картина наблюдалась и при большей частоте следования импульсов (рис. 3, б). Средняя мощность генерации при изменении частоты не менялась и была 20 мВт. Эти результаты хорошо согласуются с работами [14, 15], но в отличие от них, генерация получена для ГРТ с емкостной накачкой.

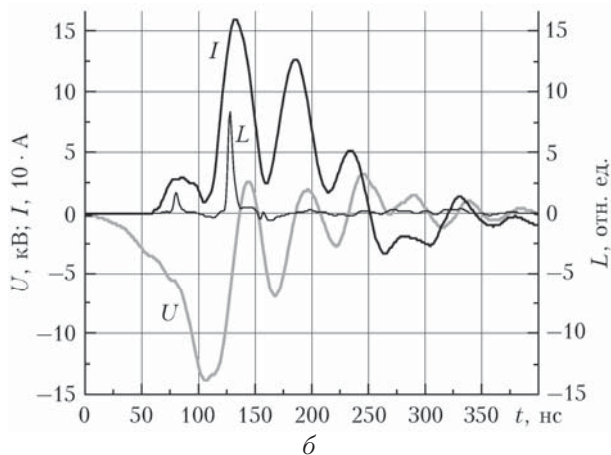
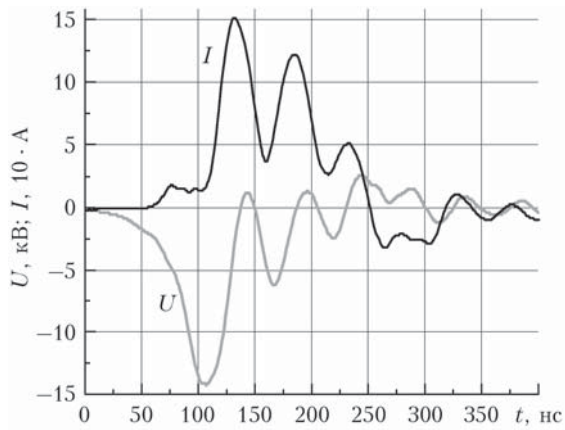


Рис. 3. Осциллограммы напряжения U , тока I , генерации L для ГРТ с емкостными электродами при отсутствии нагрева (а) и в стационарном тепловом режиме (б)

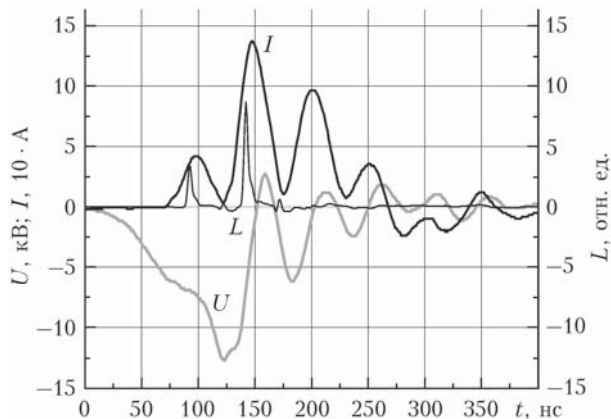


Рис. 4. Импульс напряжения U , тока I , генерации L для активного элемента с внешними электродами

Заключение

В работе описана конструкция и приведены результаты исследования активных элементов на парах меди с индукционным нагревателем. Рассмотрена принципиальная возможность получения генерации в разработанных активных элементах, в том числе при использовании барьерного разряда (емкостная ГРТ). При возбуждении активного элемен-

та с использованием емкостной накачки изменение тока носило гармонический характер, при этом наблюдались два импульса генерации, частота следования которых составляла 20 МГц. Такой режим наблюдался на протяжении всего времени проведения экспериментов.

К недостаткам разработанной конструкции следует отнести то, что расположение графитовой трубки в активной зоне приводит к загрязнению буферного газа и постепенному снижению энергетических характеристик. Кроме того, графит и электроды ГРТ образуют паразитную емкость, которая не позволяет работать при низких уровнях токов и напряжений.

В дальнейшем планируется разработка активного элемента с внешним расположением нагревательного элемента.

Работа по разработке и исследованию новых методов выполнена в рамках базового бюджетного проекта № АААА-А17-117021310150-0.

Работа по повышению частоты следования импульсов активного элемента выполнялась в рамках проекта РФФ № 14-19-00175.

1. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering and Applications. Chichester (UK), John Wiley & Sons, 1998. 620 p.
2. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Молодых Э.И., Климовский И.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
3. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. Саморазогревной CuBr-лазер // Оптика атм. и океана. 2000. Т. 13, № 11. С. 1053–1055.
4. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Ткаченко Н.Ю. Лазер на парах иодида меди с внутренним реактором // Оптика атм. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 721–726.
5. Gubarev F.A., Shiyonov D.V., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S. Capacitive-discharge-pumped CuBr laser with 12 w average output power // IEEE J. Quantum Electron. 2013. V. 49, N 1. P. 89–94.
6. Батенин В.М., Казарян М.А., Карпунин В.Т., Лябин Н.А., Маликов М.М., Сачков В.И. Возбуждение коаксиальных лазеров на парах меди импульсно-периодическим индукционным разрядом // Оптика атм. и океана. 2016. Т. 29, № 2. С. 112–120.
7. 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. Лазеры на парах бромиды меди нового поколения // Оптика атм. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 999–1009.
8. Активный элемент лазера на парах галогенида металла: Пат. 2420844. Россия, МПК, H01S 3/03. Андриенко О.С., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Шиянов Д.В.; Ин-т оптики атм. им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2009101603/28; Заявл. 19.01.2009; Опубл. 10.06.2011. Бюл. № 20.
9. Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С. Активная среда на парах бромиды марганца с внутренним реактором при частоте следования импульсов до 100 кГц // Оптика атм. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 321–325.
10. Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Усиленные характеристики активного элемента лазера на парах хлорида меди с внутренним реактором // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 10. С. 46–50.

11. Бохан П.А., Букова Е.С., Кияшклина Г.С., Клишкин В.М., Соломонов В.И. Техника исследования положительного столба газового разряда при высоких температурах // Приборы и техн. эксперим. 1974. № 1. С. 160–161.
12. Бохан П.А., Герасимов В.А. Оптимизация условий возбуждения в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1979. Т. 6, № 3. С. 451–455.
13. Тригуб М.В., Власов В.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Троицкий В.О. Повышение эффективности возбуждения CuVg-лазера за счет модификации разрядного кон- тура // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1069–1072.
14. Герасимов В.А., Герасимов В.В. Исследование лазера на парах меди при накачке цугами затухающих синусоидальных импульсов возбуждения // ЖТФ. 2011. Т. 81, вып. 1. С. 153–156.
15. Федоров В.Ф., Шиянов Д.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С., Торгаев С.Н., Кулагин А.Е. Комбинированный слаботочный разряд в лазере на парах меди // ЖТФ. 2016. Т. 86, вып. 9. С. 113–116.

M.V. Trigub, V.F. Fedorov, D.V. Shyanov, G.S. Evtushenko. Induction-heated metal vapor lasers.

Results are presented of the development and study of metal vapors active elements using an induction heater, which is designed to create a required metal vapor concentration. The lasing was obtained at traditional (GDT with internal electrodes) and capacitive (capacitive barrier discharge) excitation of the laser medium; the average laser power was 20 mW. For the Cu-vapor active element under capacitive excitation, two generation pulses with a time delay of 50 ns were detected. Thus, within the limits of a single pump pulse, the lasing was obtained with a frequency of 20 MHz.