

В.Н. Кухарев, В.В. Ларин, А.Н. Мальцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ С БОЛЬШИМ АКТИВНЫМ ОБЪЕМОМ ПРИ НАКАЧКЕ ОТ ТИРИСТОРНОГО И ТИРАТРОННОГО ИСТОЧНИКОВ

Приводятся результаты экспериментального исследования характеристик работы лазера на парах меди с апертурой 60 мм и объемом 2,5 л при накачке от тиристорного и тиратронного источников питания.

Показано, что при меньшем весе и габаритах тиристорный источник по эффективности накачки активного объема лазера близок к традиционному тиратронному источнику. Установлены оптимальные значения напряжения и мощности источника накачки, при которых достигаются максимальные значения коэффициентов полезного действия как источника, так и лазера в целом относительно энергозатрат в газоразрядную трубку.

Установлено наличие максимума в зависимости, связывающей оптимальные частоты повторения импульсов накачки и температуру стенок активного объема лазерной газоразрядной трубки с независимым подогревом.

В настоящее время лазеры на парах металлов применяются в таких важных областях, как лазерные промышленные технологии, лазерное разделение изотопов, лазерная медицина, а также в распространенном круге научных исследований, в том числе – в изучении оптико-атмосферных явлений.

Возможности применения таких лазеров расширяются при разработке более экономичных, надежных и долговечных источников их накачки. Одно из направлений разработок новых источников питания – это использование мощных твердотельных полупроводниковых управляемых устройств в качестве коммутаторов в цепях формирования импульсов накачки. Такие коммутаторы более долговечны и экономичны по сравнению с традиционными в настоящее время газоразрядными и электровакуумными коммутаторами, требующими дополнительных энергозатрат на нагрев катодов, охлаждение анода, стартовые потери и др.

Необходимость высоковольтного мощного анодного питания таких коммутаторов обуславливает необходимость мощного высоковольтного выпрямителя, что вместе со значительными габаритами коммутатора приводит к повышенным габаритным и весовым характеристикам источника питания.

В [1] описан мощный высокочастотный магнотиристорный генератор импульсов, характеристики работы которого удовлетворяют условиям возбуждения генерации в активном объеме газоразрядной трубки (ГРТ) лазера на парах меди. Этот источник не нуждается в громоздком высоковольтном выпрямителе, т.к. питание тиристорных коммутаторов осуществляется выпрямленным напряжением непосредственно от сети без трансформатора. Необходимая амплитуда и длительность импульсов накачки в таком источнике формируются с помощью импульсного трансформатора ИТ (рис. 1, а) с последующим сжатием длительности импульса при прохождении его через последовательность $L - C$ ячеек формирующей линии (индуктивности $L_3 - L_8$, емкости $C_3 - C_9$). $L_{ш}$ – индуктивность, величина которой много больше индуктивности разрядного контура с ГРТ, что позволяет шунтировать сопротивление ГРТ в паузах между импульсами накачки.

В такой формирующей линии нелинейные индуктивности $L_3 - L_8$ с ферромагнитными сердечниками играют роль ключей, переключающих разряд предыдущих емкостей на последующие в момент насыщения сердечника при достижении амплитудного напряжения на предыдущей емкости. При этом величины емкостей $C_3 - C_9$ во всех ячейках одинаковы и равны 3,3 нФ, в то время как величины индуктивностей $L_3 - L_8$ при насыщенном состоянии сердечников последовательно уменьшаются от L_3 к L_8 , что приводит к эффекту последовательного «сжатия» импульса с выхода импульсного трансформатора к концу формирующей линии. Ячейка $L_8 - C_9$ (см. рис. 1, а) и ячейка $L_2 - C_3$ (рис. 1, б) дополнительно играют роль элемента согласования с нагрузкой (в нашем случае с ГРТ лазера), сопротивление которой изменяется во времени (уменьшается в течение импульса газового разряда от максимального значения до минимального).

В [2] приведены первые результаты экспериментального исследования лазера на парах меди с активным объемом $\approx 2,5$ л и апертурой 60 мм при накачке от магнитотиристорного источника.

В настоящей статье приведены результаты дальнейшего экспериментального исследования лазера на парах меди при накачке от тиристорного (см. рис. 1, а) и тиратронного (см. рис. 1, б) источников. Конструкция ГРТ представляла собой вакуумноплотный кварцевый кожух, охлаждаемый водой с внешней стороны. Внутри кожуха располагалась керамическая трубка из окиси бериллия, окруженная слоем теплоизолятора из порошка двуокиси циркония. На концах керамической трубки располагались мощные медные электроды. Внутренний диаметр трубки 60 мм, длина ≈ 900 мм. Объем $\approx 2,5$ л. Параметры магнитотиристорного источника, приведенные выше, в основном соответствуют элементам и параметрам источника, описанного в работе [1]. Величины емкостей $C_3 - C_9$ соответствуют значению C_3 в ячейке «сжатия» тиратронного источника и равны ≈ 3 нФ. В качестве коммутатора в схеме (см. рис. 1, б) использовался водородный тиратрон типа ГГИ1 - 2500/50. Частота повторения импульсов накачки для обоих источников могла плавно изменяться в диапазоне $0 \div 3$ кГц.

Разогрев активной зоны ГРТ до рабочей температуры производился с помощью спирального нагревателя из молибденовой проволоки, намотанной непосредственно на керамическую трубку из окиси бериллия. Спиральный нагреватель соединялся своими концами с электродами ГРТ и через них подключался к отдельному источнику нагрева. Дроссель насыщения L_2 (см. рис. 1, б), или так называемая «линия сжатия», так же, как и в [3], был собран из ферритовых колец К17 \times 8,2 \times 5 марки 1000 НН. Длина ферритовой сборки составляла 830 мм. Линия «сжатия» располагалась в металлическом цилиндре. Внутренняя часть ферритов через лагунную трубку охлаждалась водой [3].

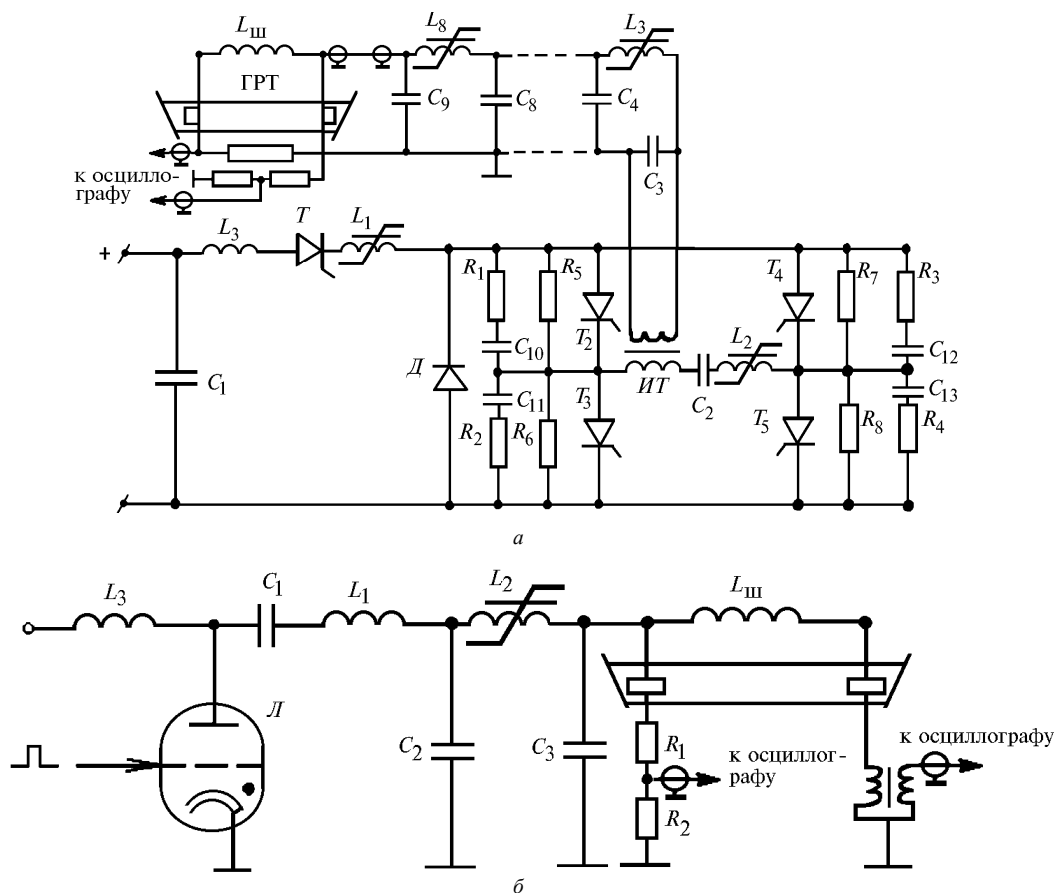


Рис. 1. Принципиальные схемы двух типов источников питания лазера на парах меди: а – упрощенная схема магнитотиристорного источника питания ГРТ лазера. $C_3 - C_9 = 3,3$ нФ; б – схема тиратронного источника питания ГРТ лазера. $C_1 = 6,0$ нФ, $C_2 = 4,0$ нФ, $C_3 = 3,08$ нФ

Схема регистрации электрических параметров изображена на рис. 1. Импульсы накачки регистрировались с помощью коаксиального фотоэлемента ФК-19. Сигналы с делителей, токового шунта (см. рис. 1, *a*), измерительного трансформатора (см. рис. 1, *б*) и фотоэлемента подавались по кабелям РК-50 на вход осциллографа С1-75, размещенного в экранированной от лазера комнате. Средняя мощность лазерного излучения измерялась с помощью измерителя мощности – ИМО-2. Температура стенок в активном объеме лазера измерялась через прозрачные окна на торцах ГРТ с помощью оптического пирометра.

На рис. 2 приведены импульсы возбуждения и генерации для обоих типов источников, откуда видно, что с помощью тиристорного источника можно получить импульсы накачки и лазерной генерации, по своим амплитудно-временным характеристикам близкие параметрам импульсов, получаемых при накачке активного объема ГРТ от тиратронного источника.

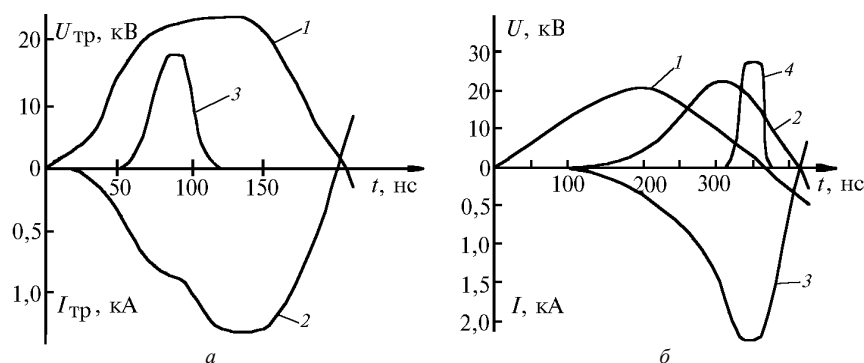


Рис. 2. Осциллограммы импульсов накачки и лазерного излучения для двух типов источников питания: *a* – осциллограммы импульсов напряжения на трубке $U_{тр}$ (1) и тока (2) в ГРТ лазера с магнитотиристорным источником и импульса лазерного излучения (3). $P_{Ne} = 110$ Торр; *б* – осциллограммы импульсов напряжения на C_2 (1), на C_3 и на ГРТ (2), тока в ГРТ (3) и импульса лазерного излучения (4) для лазера с тиратронным источником. $P_{Ne} = 75$ Торр

Более высокая амплитуда и меньшая длительность импульса тока для тиратронного источника по сравнению с амплитудой и длительностью импульса тока для тиристорного источника (давление неона в ГРТ ≈ 110 Торр) объясняются более низким давлением неона в ГРТ (75 Торр) при накачке от тиратронного источника. Такое объяснение подтверждается эмпирическими соотношениями, приведенными в [4], из которых следует, что в области рабочих давлений и напряжений при уменьшении давления газа и при увеличении напряжения в газоразрядном промежутке ГРТ длительность импульса накачки $\tau_{и,н}$ падает, а амплитудное значение импульса тока растет. В этом случае растут мощность импульса накачки $P_{и,н}$ и энергия излучения лазера в импульсе E_r . Вышесказанное подтверждается экспериментальными кривыми 4, 5, 6 на рис. 3, б.

На рис. 3, *a* представлены характеристики работы лазера с тиристорным источником в зависимости от температуры стенок в рабочей зоне ГРТ лазера. Параметры импульсной накачки для всех условий эксперимента с тиристорным источником представлены на рис. 2, *a*. Давление неона P_{Ne} в ГРТ в данном случае составляло ≈ 70 Торр. Эксперимент показал следующие закономерности.

При каждой фиксированной температуре стенок активного объема газоразрядной трубки ($t_{мп}$) отклонение частоты повторения импульсов накачки в сторону уменьшения от оптимальной частоты (кривая 3, рис. 3, *a*) приводит к уменьшению средней мощности генерации по сравнению с максимальным значением (кривая 2). В этом случае значение энергии лазерного излучения в импульсе (E_r) увеличивается по сравнению со значением, определяемым зависимостью (кривая 1), и достигает значения, неизменного для более низких частот повторения. Поясним, что E_r зависимости (кривая 1) найдена из соотношения

$$E_r(t_{мп}) = \frac{P_{г\max}(t_{мп})}{f_{опт}(t_{мп})}.$$

Отклонение частоты повторения импульсов накачки f в сторону увеличения от $f_{опт}$ (кривая 3) приводит к монотонному снижению как средней мощности лазерного излучения (P_r), так и энергии излучения в импульсе (E_r). Если учесть, что при прочих равных условиях значение $f_{опт}$

растет с уменьшением плотности остаточных электронов (ионов) и метастабильных атомов меди [5], энергия генерации в импульсе растет с ростом плотности паров меди при разогреве ГРТ, а эффективность накачки падает при тепловом заселении нижнего метастабильного лазерного уровня атомов меди с ростом температуры ГРТ, то для широкоапертурного лазера, работающего в области низких частот повторения, наличие максимума в экспериментальной зависимости (кривая 3, рис. 3, а) обусловлено конкуренцией в основном трех вышеуказанных процессов.

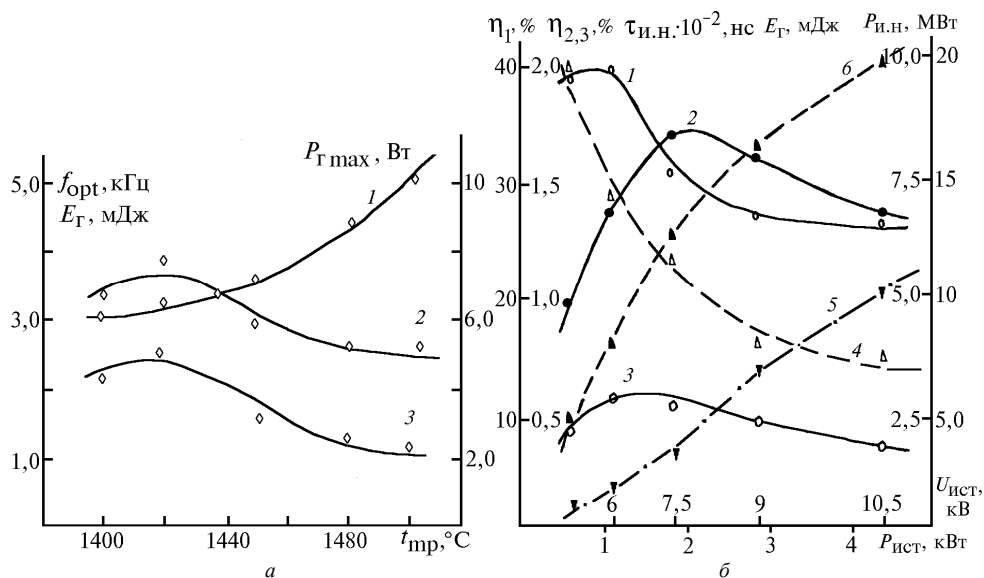


Рис. 3. Экспериментальные характеристики работы двух типов источников питания лазера: а – зависимости энергии генерации в импульсе (1), максимальной средней мощности излучения (2) и оптимальной частоты повторения импульсов накачки (3) от температуры стенок ГРТ лазера с тиристорным источником; б – зависимости коэффициентов полезного действия тиратронного источника питания лазера по энергокладу в ГРТ η_1 (1), по лазерному излучению от энергоклада в ГРТ η_2 (2), по лазерному излучению от мощности источника накачки η_3 (3), длительности импульса накачки по полувысоте $\tau_{и.н.}$ (4), импульсной мощности накачки $P_{и.н.}$ (5), энергии лазерной генерации в импульсе E_{Γ} (6) от напряжения на источнике $U_{ист}$ и от средней мощности источника $P_{ист}$. Частота повторения импульсов накачки 1,5 кГц

На рис. 3, б приведены экспериментальные характеристики работы лазера с тиратронным источником. Следует отметить, что для системы накачки, в которой ГРТ лазера, водородный тиратрон, рабочая емкость и другие элементы соединены последовательно в одном газоразрядном контуре, коэффициент полезного действия источника относительно энергоклада в ГРТ (η_1) монотонно уменьшается с ростом напряжения на источнике питания [4] в области рабочих напряжений.

Но при малых напряжениях на источнике η_1 достигает существенно более высокого значения (~70% [4]), чем в нашем случае – максимум 41% (см. ниже) без учета потерь на накал катода и генератора водорода в тиратроне. Это означает, что «ячейки сжатия» снижают экономичность тиратронных источников по сравнению с источниками, содержащими в единственном газоразрядном контуре в качестве энергопоглотителей только ГРТ и тиратрон. Отсюда ясно, что применение «ячеек сжатия» в тиратронных источниках оправдано в основном необходимостью поддержания стабильного режима работы тиратрона [3] при повышенном анодном напряжении, применяемом для увеличения энергии лазерного излучения в импульсе (рис. 3, б, кривая б).

Для тиристорного источника η_1 достигал ~64% (см. ниже), что указывает на более высокую экономичность тиристорного источника по сравнению с тиратронным ($\eta_1 = 41\%$).

Асимптотическое приближение η_1, η_2, η_3 и $\tau_{и.н.}$ в области больших значений $U_{ист}$ и $P_{ист}$ к некоторым постоянным величинам обуславливает нарастание импульсной мощности накачки и энергии лазерного излучения в импульсе пропорционально напряжению ($U_{ист}$) и средней мощности источника накачки ($P_{ист}$), начиная с некоторого значения $U_{ист}$ и $P_{ист}$ (рис. 3, б, кривые 5, б).

Такая пропорциональность сохраняется, пока поддерживаются достаточно высокой концентрация нормальных атомов меди в ГРТ, незначительное тепловое заселение метастабильных уровней и невысокая концентрация остаточных электронов и ионов в межимпульсной

период. Эксперимент показывает, что превышение определенных значений $U_{ист}$ и $P_{ист}$ – различных для разных t_p – ведет к уменьшению E_r вместе с уменьшением η_2 и η_3 .

Оптимизация параметров накачки тиристорного и тиратронного источников позволила получить:

для тиристорного источника питания

$$\eta_1 = 64\%, \eta_2 = 0,31\%, \eta_3 = 0,2\%, E_r = 10 \text{ мДж};$$

для тиратронного источника питания

$$\eta_1 = 41\%, \eta_2 = 0,9\%, \eta_3 = 0,37\%, E_r = 15 \text{ мДж}.$$

Результаты работы позволяют сделать вывод, что тиристорный источник по эффективности накачки активного объема лазера близок к традиционному тиратронному источнику. Это указывает на перспективность разработок более легких, надежных и малогабаритных лазерных источников на твердотельных полупроводниковых коммутаторах для нужд народного хозяйства, здравоохранения, науки и в том числе для создания мобильных лазерных комплексов для мониторинга среды обитания.

1. Гордеев П. Г. и др. // ПТЭ. 1990. N 5. С. 119–122.
2. Кухарев В. Н., Ларин В. В., Мальцев А. Н. // I межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана». Ч. 2. Томск. ИОА СО РАН, 1994. С. 158–159.
3. Кухарев В. Н., Ларин В. В., Мальцев А. Н. // ПТЭ. 1995. N 5. С. 159–160.
4. Кухарев В. Н., Солдатов А. Н. // Тезисы докладов 2 Всесоюзного симпозиума по физическим процессам в газовых ОКГ. Ужгород: Изд-во Ужгород. ун-та, 1978. С. 159–161.
5. Мальцев А. Н. Кинетика импульсно-периодической генерации лазера на парах меди. Томск, 1982, 40 с. (Препринт/ИОА СО РАН, N 1).

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
2 августа 1996 г.

V. N. Kukharev, V. V. Larin, A. N. Mal'tsev. Investigation of a Copper-Vapor Laser with Large Active Volume Pumped by Thyristor or Thyatron Sources.

Results of experimental investigations into the performance characteristics of a copper-vapor laser with an aperture of 60 mm and a volume of about 2,5 l having an indirectly heated active element and pumped by thyristor or thyatron power supply sources are presented in the paper. It has been shown that the efficiency of the thyristor source having less weight and smaller overall dimensions is close to that of the standard thyatron source. The optimal voltage and power of a pump source have been found at which the efficiency of the power supply source and the laser as a whole is maximum for a given pump power density. The maximum has been established in the dependence of the optimal (with regard to the average output power of the laser) repetition frequency of pumping pulses on the temperature of walls of the indirectly heated active volume of the laser tube.