

Влияние параметров коммутатора на эксплуатационные характеристики лазера на парах меди

Н.А.Юдин

На основе анализа схем возбуждения активной среды лазера на парах меди (ЛПМ) показано, что к числу основных факторов, ограничивающих среднюю мощность генерации ЛПМ, относятся эмиссионная способность катода электронной лампы и допустимая скорость нарастания тока в тиратроне. Надежность работы лазера и срок службы тиратрона определяются обратным напряжением на аноде тиратрона. Срок службы тиратрона ТГИ1-1000/25 в ЛПМ соответствует паспортным значениям при обратном напряжении на его аноде не более 3 кВ.

Ключевые слова: лазер на парах меди, коммутатор.

1. Введение

Импульсно-периодический лазер на парах меди (ЛПМ) относится к классу лазеров на самоограниченных переходах и является одним из наиболее эффективных источников стимулированного излучения среди газовых лазеров, работающих в видимой области спектра. Для эффективной накачки активной среды лазеров этого класса необходимо формировать импульс возбуждения с крутым фронтом и длительностью, соизмеримой с временем существования инверсии [1]. Как правило, формирование такого импульса возбуждения осуществляется за счет частичного или полного разряда накопительного конденсатора через активную среду лазера с помощью электронной лампы или тиратрона [2]. Время нарастания напряжения на активной составляющей импеданса R газоразрядной трубки (ГРТ) для схем с частичным разрядом накопительного конденсатора

$$\tau_{\text{con}} \sim \frac{3L}{R}, \quad (1)$$

а для схем с полным разрядом [3] оно определяется частотой свободных колебаний

$$\omega_{\text{fr}} = \left(\frac{1}{LC} - \alpha^2 \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где L – индуктивность ГРТ; C – емкость накопительного конденсатора; $\alpha = R/2L$ – коэффициент затухания колебаний в разрядном контуре. Время нарастания напряжения на сопротивлении R с учетом времени открывания реального коммутатора τ_{com} определяется соотношением

$$\tau = (\tau_{\text{com}}^2 + \tau_{\text{con}}^2)^{1/2}. \quad (3)$$

Согласно (1)–(3) энергетические характеристики (сред-

няя мощность генерации и КПД) ЛПМ должны возрастать с увеличением напряжения на накопительном конденсаторе и частоты свободных колебаний в разрядном контуре. Одним из основных факторов их ограничения может быть использование коммутатора. К важным эксплуатационным характеристикам ЛПМ относятся не только его энергетические характеристики, но и срок службы и надежность работы, которые во многом зависят от свойств коммутатора [2, 4, 5]. Для тиратронов основными параметрами, определяющими их коммутационные характеристики, являются: допустимое напряжение на аноде U_a , допустимая скорость нарастания тока dI/dt , время открывания тиратрона τ_{com} и допустимое обратное напряжение на его аноде U_{rev} . Для электронной лампы эти параметры таковы: допустимое напряжение U_a и рассеиваемая мощность P_a на аноде, амплитуда импульсного тока I_0 , определяемая эмиссионной способностью катода лампы. Все перечисленные параметры коммутаторов являются факторами, ограничивающими эксплуатационные характеристики ЛПМ [2, 4, 5]. Однако вопрос о том, какой из этих параметров (или какая их совокупность) является определяющим, остается открытым, что не позволяет, с одной стороны, найти оптимальные для накачки ЛПМ параметры коммутатора, а с другой – осуществлять инженерный расчет эксплуатационных характеристик лазера. Целью настоящей работы являлся поиск параметров коммутаторов, оказывающих основное влияние на эксплуатационные характеристики ЛПМ, который осуществлялся на основе анализа работы различных схем возбуждения активной среды.

2. Анализ работы схем возбуждения ЛПМ

Сравнительный анализ работы различных схем возбуждения проводился с ГРТ ГЛ-201 (внутренний диаметр разрядного канала 2 см, длина 80 см), помещенной в неустойчивый резонатор, что позволяло, исходя из условий возбуждения и достигнутых параметров лазерного излучения, судить о факторах, их ограничивающих, а также о преимуществах и недостатках схем возбуждения.

2.1. Наиболее широко используется прямая схема возбуждения. В этой схеме разрядный контур является

Институт физики полупроводников СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13; e-mail: yudin@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 24 сентября 2001 г., после доработки – 4 июля 2002 г.

простым колебательным контуром, содержащим тиратрон, ГРТ и накопительный конденсатор. Последний заряжается от высоковольтного выпрямителя через зарядный дроссель, диод и шунтирующую индуктивность, подключенную параллельно ГРТ. В такой схеме возбуждения с тиратроном ТГИ1-1000/25 была получена средняя мощность генерации 7 Вт при частоте следования импульсов (ЧСИ) генерации 11 кГц. Длительность импульса генерации по полувысоте составляла 20 нс, потребляемая мощность от выпрямителя – 2.6 кВт при напряжении на выпрямителе 5.4 кВ и емкости накопительного конденсатора 2400 пФ. Обратное напряжение на тиратроне U_{rev} достигало ~ 3 кВ в стационарном режиме работы лазера.

В процессе разогрева активного объема ГРТ наблюдается уменьшение U_{rev} и потребляемой от выпрямителя мощности до момента появления генерации. Затем по мере разогрева лазера начинается рост U_{rev} и потребляемой мощности. Подобная зависимость U_{rev} от температуры ГРТ объясняется следующим. В начальный период разогрева ГРТ разряд осуществляется в буферном газе неоне с высокой степенью контракции. Шнурование разряда повышает индуктивность ГРТ и характеризуется высокой плотностью электронов в разряде. Это определяет низкий коэффициент затухания колебаний α в разрядном контуре и высокое обратное напряжение на тиратроне. По мере разогрева ГРТ наблюдается расконтракция разряда [6, 7], что приводит к увеличению коэффициента α и снижению U_{rev} . При дальнейшем увеличении температуры ГРТ (после расконтракции разряда) начинает уменьшаться коэффициент α и расти U_{rev} . Увеличение энергоклада в ГРТ приводит к дальнейшему росту U_{rev} , и при достижении последним максимального допустимого для тиратрона значения возникает неустойчивый режим работы лазера. При работе с высоким обратным напряжением U_{rev} существенно снижается срок службы тиратрона [4, 5]. Ресурсные испытания тиратрона ТГИ1-1000/25 с приведенными выше параметрами накачки активной среды ЛПМ, когда $U_{rev} \sim 3$ кВ существенно меньше максимального допустимого значения 5 кВ, показали, что наработка тиратрона соответствует гарантируемому заводом-изготовителем сроку службы и превысила к настоящему времени 800 ч.

2.2. Другой схемой возбуждения активной среды ЛПМ является прямая схема возбуждения с частичным разрядом накопительного конденсатора. В качестве коммутатора в этой схеме используются электронные лампы, например импульсный модуляторный тетрод ГМИ-29. В такой схеме возбуждения с лампой ГМИ-29А была получена средняя мощность генерации 15 Вт при ЧСИ генерации 11 кГц. Длительности импульсов возбуждения и генерации на полувысоте составляли 60 и 12 нс соответственно, потребляемая от выпрямителя мощность была равна 3.1 кВт при напряжении на выпрямителе 25.8 кВ и накопительной емкости 20 нФ. Генерация наблюдается на спаде импульса возбуждения с задержкой 40 нс от его начала. С увеличением напряжения на накопительном конденсаторе должна возрастать энергия импульса генерации. Однако этого не наблюдалось, поскольку с ростом напряжения должен возрастать ток в контуре, амплитуда которого ограничена эмиссионной способностью лампы ГМИ-29. Амплитуда импульса тока в контуре лазера достигала 300 А при приведенных выше параметрах накачки.

Увеличить энергетические характеристики ЛПМ при ограниченной эмиссионной способности лампы ГМИ-29 можно за счет увеличения длины разрядного промежутка ГРТ, поскольку должно оставаться постоянным отношение L/R (L и R возрастают пропорционально длине разрядного промежутка ГРТ). Замена ГРТ ГЛ-201 на ГРТ «Кристалл ЛТ-40Сш» (внутренний диаметр разрядного канала 2 см, длина 1.2 м) позволила увеличить среднюю мощность генерации почти в 2 раза при ЧСИ возбуждения 11 кГц для напряжения на выпрямителе 28 кВ, потребляемой от выпрямителя мощности 4.2 кВт и амплитуде тока ~ 300 А.

2.3. В прямой схеме возбуждения (см. п. 2.1) не выполняется условие $R > 2(L/C)^{1/2}$ и разрядный процесс в контуре имеет колебательный характер [3]. В этом случае, согласно (2), (3), для увеличения энергетических характеристик лазера необходимо уменьшать емкость накопительного конденсатора и соответственно увеличивать напряжение. Компьютерное моделирование этого процесса показало, что для достижения в данной схеме параметров возбуждения, сравнимых с параметрами схемы, рассмотренной в п. 2.2, нужно увеличить напряжение на выпрямителе до 7.5–8.5 кВ и уменьшить емкость накопительного конденсатора до ~ 1 нФ. При этих параметрах напряжение на накопительном конденсаторе будет достигать 24–26 кВ, обратное напряжение – 6–8 кВ, а скорость нарастания тока в контуре – 6–8 кА/мкс. Основными факторами, ограничивающими при этом энергию импульса генерации ЛПМ, являются допустимые скорость нарастания тока в тиратроне и обратное напряжение на нем. Наибольшие трудности при достижении требуемых параметров разряда связаны с обратным напряжением на тиратроне.

Для достижения требуемых параметров возбуждения и снижения обратного напряжения на тиратроне до паспортных значений была использована схема умножения напряжения (схема Аркадьева – Маркса), выполненная на двух последовательно включенных тиратронах ТГИ1-1000/25 (см. рис.1), которая работает следующим образом. От высоковольтного выпрямителя через зарядный дроссель L_1 , диоды 1, 2 и индуктивности L_3 , L_2 параллельно заряжаются накопительные конденсаторы C_1

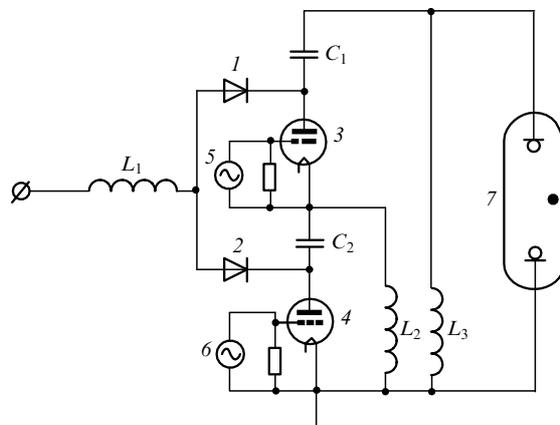


Рис.1. Схема возбуждения активной среды ЛПМ с двумя последовательно включенными тиратронами: 1, 2 – диоды; 3, 4 – тиратроны ТГИ1-1000/25; 5, 6 – генераторы импульсов запуска тиратронов; 7 – ГРТ; C_1 , C_2 – накопительные конденсаторы; L_1 – зарядный дроссель; L_2 – индуктивность; L_3 – шунтирующая индуктивность.

и C_2 . Затем осуществляется одновременный запуск тиратронов 3 и 4, и накопительные конденсаторы оказываются последовательно включенными в разрядный контур лазера. После разряда обратное напряжение для каждого тиратрона будет определяться не суммарным напряжением на последовательно включенных конденсаторах, а напряжением на каждом конденсаторе соответствующего тиратрона.

В этой схеме возбуждения была получена средняя мощность генерации 14 Вт при ЧСИ генерации 11 кГц. Длительности импульсов возбуждения и генерации на полувывоте составляли 90 и 20 нс соответственно, потребляемая от выпрямителя мощность была равна 3.5 кВт при напряжении на выпрямителе 4.8 кВ, обратном напряжении на аноде тиратронов ~ 2.5 кВ и емкостях накопительных конденсаторов $C_1 = C_2 = 2.2$ нФ. Генерация наблюдалась с задержкой 40 нс от начала импульса возбуждения. При напряжении на выпрямителе 5.4 кВ и ЧСИ генерации 8 кГц средняя мощность генерации составляла 18 Вт.

С увеличением ЧСИ возбуждения, согласно (1)–(3), будет уменьшаться скорость нарастания напряжения на активной составляющей импеданса ГРТ из-за увеличения предимпульсной концентрации электронов. Противодействовать этому можно за счет увеличения напряжения на накопительном конденсаторе и уменьшения его емкости, однако возможности такого противодействия ограничены, с одной стороны, коммутатором и тепловым режимом лазера, а с другой стороны, емкостью накопительного конденсатора. С уменьшением последней уменьшается длительность импульса возбуждения, которая должна быть не меньше времени существования инверсии [1]. В противном случае наблюдается уменьшение длительности импульса генерации [3]. В связи с этим можно ожидать увеличения энергетических характеристик ЛПМ за счет роста рабочего объема ГРТ, причем наибольшее их увеличение должно наблюдаться за счет роста длины активной зоны ГРТ. Наглядным примером этому могут служить энергетические характеристики активных элементов ГЛ-201, «Кристалл ЛТ-30Cu», «Кристалл ЛТ-40Cu» и «Кристалл ЛТ-50Cu» [8]. Оценки показали, что при использовании ГРТ с диаметром разрядного канала 3.2–4 см и длиной 200 см можно достичь средней мощности генерации ~ 200 Вт с практическим КПД, равным $\sim 2\% - 3\%$, при напряжении на накопительном конденсаторе более 40 кВ, обратном напряжении на тиратроне 10–12 кВ и скорости нарастания тока в контуре более 10 кА/мкс. Поскольку ограничений на число последовательно включаемых в схеме умножения (рис. 1) тиратронов нет, основным ограничивающим фактором при достижении указанных параметров будет являться допустимая скорость нарастания тока в тиратроне.

2.4. Снизить скорость нарастания тока в коммутаторе до паспортных значений позволяет использование схем с импульсным трансформатором с последующим сжатием импульса за счет нелинейных дросселей [9, 10]. В качестве коммутаторов в таких схемах в настоящее время применяются как тиратроны, так и IGBT-транзисторы и до трех звеньев сжатия при длительности импульса на вторичной обмотке трансформатора $\sim 10 - 30$ мкс. Нелинейный дроссель первого звена изготавливают, как правило, с сердечником из аморфного железа (коэффициент сжатия $\sim 20 - 30$). Дроссели последующих звеньев выполнены на ферритовых кольцах (коэффициент сжатия $\sim 2 - 3$),

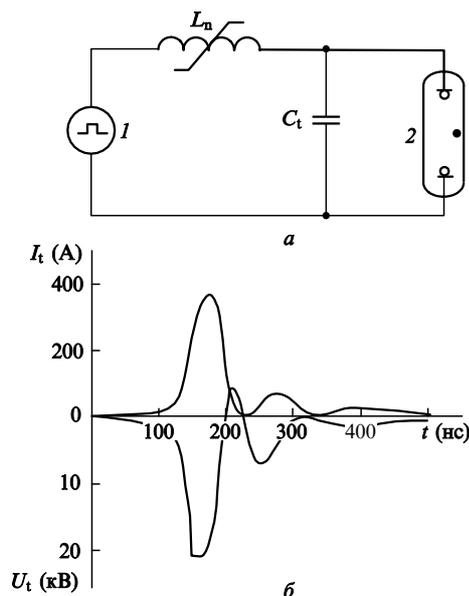


Рис.2. Схема звена сжатия импульса возбуждения (а) и осциллограммы импульсов тока I_t и напряжения U_t на ГРТ (б): I – генератор прямоугольных импульсов возбуждения на входе звена сжатия; 2 – ГРТ; L_n – нелинейный дроссель; $C_t = 165$ пФ – обостряющая емкость.

что позволяет формировать в ГРТ импульс возбуждения длительностью 50–60 нс.

Компьютерное моделирование данного процесса показало, что наиболее важным при формировании в ГРТ импульса возбуждения требуемой длительности является последнее звено сжатия. Подобное заключение следует из анализа процесса сжатия импульса возбуждения. Допустим, что в ГРТ с индуктивностью ~ 1 мкГн необходимо сформировать с помощью нелинейного дросселя (коэффициент сжатия ~ 3) импульс возбуждения длительностью ~ 60 нс. Следовательно, на вход звена сжатия (см. рис.2,а) должен поступать импульс длительностью ~ 180 нс. На рис.2,б приведен результат компьютерного моделирования импульсов тока и напряжения на ГРТ при прямоугольном импульсе с амплитудой 20 кВ и длительностью 180 нс на входе. Видно, что в ГРТ формируется импульс возбуждения длительностью 60 нс с крутым фронтом нарастания и предшествующим участком длительностью 120 нс с медленным нарастанием тока и напряжения. Параметры этого участка определяются начальной и конечной индуктивностью нелинейного дросселя и током, при котором дроссель начинает насыщаться. Медленное нарастание тока и напряжения перед импульсом возбуждения в данном случае может приводить к дополнительному заселению нижних лазерных уровней и снижать энергетические характеристики лазера.

Для экспериментальной проверки данного предположения было проведено моделирование подобных условий возбуждения в схеме, представленной на рис.3. Исследования проводились с ГРТ УЛ-102 (внутренний диаметр разрядного канала 2 см, длина 40 см). Импульс возбуждения формировался тиратроном ТГИ2-500/20 4, а дополнительный импульс – тиратроном ТГИ1-270/12 5 за 120 нс перед импульсом возбуждения. Исследования проводились при следующих параметрах: накопительные емкости $C_1 = C_2 = 2200$ пФ, ЧСИ возбуждения 10

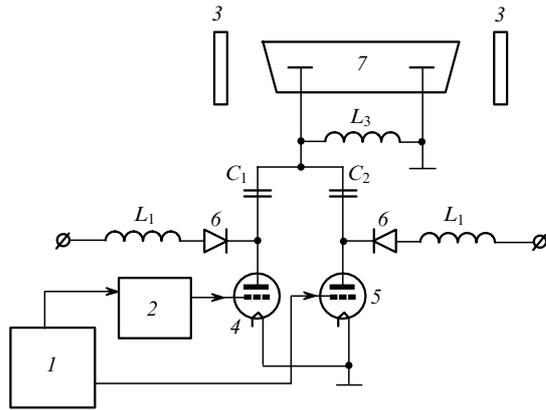


Рис.3. Схема экспериментальной установки: 1 – задающий генератор; 2 – линия задержки; 3 – зеркала резонатора; 4, 5 – тиратроны ТГИ2-500/20 и ТГИ1-270 соответственно; 6 – диоды; 7 – ГРТ; C_1, C_2 – накопительные конденсаторы; L_1 – зарядный дроссель; L_3 – шунтирующая индуктивность.

кГц, напряжение на выпрямителе и средний потребляемый ток источника возбуждения 4.9 кВ и 340 мА соответственно, напряжение на выпрямителе дополнительного источника изменялось от нуля до 1 кВ. При этих параметрах обратное напряжение на тиратронах не выходило за рамки паспортных значений. Максимальная средняя мощность генерации лазера в плоскопараллельном резонаторе при установившемся тепловом режиме составила ~ 5 Вт. Изменение средней мощности генерации в зависимости от напряжения на выпрямителе дополнительного источника питания показано на рис.4. Одновременно с изменением средней мощности наблюдается изменение времени задержки начала импульса генерации относительно импульса возбуждения.

Более резкий спад средней мощности имеет место на длине волны генерации $\lambda = 510.5$ нм. Происходит изменение радиального распределения плотности мощности излучения лазера. С увеличением напряжения на выпрямителе дополнительного источника вначале наблюдается переход к кольцевой структуре генерации на $\lambda = 510.5$ нм, затем генерация исчезает и далее подобная картина имеет место на $\lambda = 578.2$ нм. Дальнейшее увеличение напряжения до 2–2.5 кВ приводит к появлению генерации под воздействием дополнительного импульса.

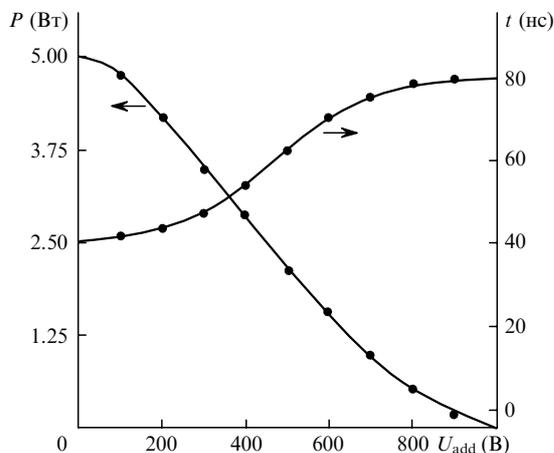


Рис.4. Изменение средней мощности генерации P и времени задержки начала импульса генерации t в зависимости от напряжения на выпрямителе дополнительного источника питания U_{add} .

Выполненные исследования наглядно демонстрируют возможные последствия влияния звена сжатия на энергетические характеристики лазера.

3. Заключение

Проведенный анализ работы различных схем возбуждения показал, что к числу основных факторов, ограничивающих среднюю мощность генерации ЛПМ, относятся эмиссионная способность катода электронных ламп и допустимая скорость нарастания тока в тиратроне. Предельное обратное напряжение на аноде тиратрона определяет надежность работы лазера и срок службы коммутатора. Выбор условий возбуждения и их техническая реализация позволяют установить минимальное обратное напряжение, при котором долговечность и надежность работы будут соответствовать паспортным значениям тиратрона.

С учетом вышесказанного для формирования импульса возбуждения с крутым фронтом [1] необходимо знать скорость нарастания тока в контуре лазера и обратное напряжение на аноде тиратрона, а оптимизацию условий возбуждения можно проводить только в рамках допустимых значений скорости нарастания тока и его амплитуды для коммутатора. Это позволяет для инженерных расчетов параметров накачки и выбора оптимальной схемы возбуждения использовать уже разработанные компьютерные программы для расчета и анализа электрических цепей либо делать соответствующие оценки по скорости нарастания тока, его амплитуде и обратному напряжению на аноде тиратрона в работающем лазере. В этом случае реальный коммутатор можно заменить идеальным с внутренним сопротивлением R_{in} , определяющим потери энергии в коммутаторе, а активную составляющую импеданса ГРТ согласно [4, 5] – средним сопротивлением за импульс возбуждения R_{av} .

В качестве примера в табл.1 и 2 представлены результаты такого расчета, проведенного на основе экспериментальных данных п. 2.1 и 2.3, для условий возбуждения ЛПМ. Данные расчетов, соответствующие экспериментальным условиям, выделены жирным шрифтом. Расчет, результаты которого приведены в табл.1, проводился при следующих параметрах схемы возбуждения: индуктивность зарядного дросселя $L_1 = 0.3$ Гн, шунтирующая индуктивность $L_3 = 100$ мкГн, напряжение на выпрямителе $U_{add} = 5.4$ кВ, индуктивность разрядного контура $L_c = 1$ мкГн, емкость накопительного конденсатора $C = 2400$ пФ, время открывания тиратрона $\tau_{com} = 50$ нс. При этих параметрах контура обратное напряжение на тиратроне U_{rev} , амплитуда тока I_0 в разрядном контуре и напряжение на накопительном конденсаторе U_C хорошо

Табл.1.

R_{av} (Ом)	τ_{con} (нс)	τ (нс)	I_0 (А)	U_{R0} (кВ)	dI/dt (кА/мкс)	dU_R/dt (В/нс)	U_{rev} (кВ)	U_C (кВ)
6	67	84	574	3.5	6.8	42.0	6.7	17.4
8	65	82	495	3.96	6.0	48.3	5.1	15.9
10	60	78	435	4.35	5.6	55.8	3.9	14.7
12	60	78	390	4.68	5.0	60.0	3.0	13.8
14	60	78	352	4.94	4.5	63.3	2.4	13.1
16	60	78	323	5.1	4.1	65.4	1.8	12.6
18	56	75	299	5.4	4.0	72.0	1.4	12.2
20	56	75	278	5.6	3.7	74.6	1.0	11.8

Табл.2.

R_{av} (Ом)	τ_{con} (нс)	τ (нс)	I_0 (А)	U_{R0} (кВ)	dI/dt (кА/мкс)	dU_R/dt (В/нс)	U_{rev} (кВ)	U_C (кВт)
11	54	61.7	432	4.75	7.0	77.0	3.8	13.4
13	53	60.9	404	5.25	6.6	86.2	3.3	12.9
15	52	60.0	381	5.7	6.35	95.0	2.9	12.4
17	51	59.2	359	6.1	6.1	103.0	2.5	12.1
19	51	59.2	341	6.5	5.7	109.0	2.2	11.7
21	50	58.3	324	6.8	5.55	116.0	1.8	11.4
23	49	57.4	309	7.1	5.38	123.0	1.6	11.2

согласуются с экспериментально измеренными значениями при $R_{av} = 12$ Ом и $R_{in} = 6$ Ом (в табл.1, 2 параметр U_{R0} – амплитуда напряжения, а dU_R/dt – скорость нарастания напряжения на сопротивлении R_{av}). Результаты расчета соответствуют измерениям R_{av} в ЛПМ [11] и рассеиваемой мощности в тиратроне [4].

Данные табл.2 получены при $L_1 = 0.3$ Гн, $L_3 = 100$ мкГн, $U_{add} = 4.8$ кВ, $L_c = 1.6$ мкГн, $C_1 = C_2 = 2200$ пФ, $\tau_{con} = 30$ нс. Уменьшение времени открывания коммутаторов в данном случае обусловлено режимом включения тиратронов в схеме, представленной на рис.1. Реально осуществлялся запуск тиратрона 4 (рис.1), а тиратрон 3, определяющий время нарастания напряжения на ГРТ, работал как трехэлектродный разрядник. В этой схеме экспериментально полученные параметры накачки реализуются при $R_{av} = 17$ Ом и $R_{in} = 8.5$ Ом для каждого тиратрона. Увеличение R_{av} обусловлено уменьшением длительности импульса возбуждения и, следовательно, уменьшением роли ступенчатых процессов ионизации после импульса генерации [11].

Увеличение R_{in} связано с ростом стартовых потерь в тиратроне из-за более высокой скорости нарастания тока

в разрядном контуре [4]. На основании расчетов, результаты которых приведены в табл.1, 2, можно сделать заключение, что энергия импульсов генерации будет возрастать с уменьшением ЧСИ возбуждения. Это обусловлено допустимой скоростью нарастания тока в тиратроне ТГИ1-1000/25 и подтверждается экспериментально (см. п. 2.3). Скорость нарастания напряжения и его амплитуду на активной составляющей импеданса ГРТ и соответственно среднюю мощность генерации можно увеличить за счет уменьшения постоянной времени разрядного контура (емкости накопительного конденсатора) и увеличения напряжения на выпрямителе. Однако реализация такой возможности ограничена предельной скоростью нарастания тока в тиратроне, которая для тиратрона ТГИ1-1000/25 составляет ~ 4 кА/мкс. Для достижения средней мощности генерации в ЛПМ свыше 100 Вт необходимы тиратроны типа ТГИ1-1000/25, но с предельной скоростью нарастания тока более 10 кА/мкс.

1. Петраш Г.Г. *УФН*, **105**, 645 (1971).
2. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М.: Научная книга, 1998).
3. Юдин Н.А. *Квантовая электроника*, **30**, 583 (2000).
4. Кельман В.А., Климовский И.И., Фучко В.Ю., Запесочный И.П. *Препринт КИЯИ № 16* (Киев, 1985).
5. Юдин Н.А. *Квантовая электроника*, **25**, 795 (1998).
6. Бохан П.А., Закревский Д.Э. *Письма в ЖЭТФ*, **62**, 36 (1995).
7. Клишкин В.М. *Препринт ИОА СО РАН № 1* (Томск, 1999).
8. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Доманов М.С. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 8, 68 (1999).
9. Зубов В.В., Лябин Н.А., Мишин В.И. и др. *Квантовая электроника*, **10**, 1908 (1983).
10. Chatroux D., Maury J. *Proc. SPIE. Int. Soc. Opt. Eng.*, **1859**, 145 (1993).
11. Юдин Н.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е. *Квантовая электроника*, **28**, 273 (1999).