

Промышленные лазеры на парах металлов серии KULON

Н.М. Лепёхин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов

ЗАО «Опытно-экспериментальное производство ВЭИ»,

г. Истра, Московская обл., Россия

Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин

ФГУП «НПП «ИСТОК»»

г. Фрязино, Московская обл., Россия

М.А. Казарян

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

Дан краткий сравнительный анализ промышленных лазеров различных типов и приведены наиболее распространенные области применения лазеров на парах меди и золота. Рассмотрены схемотехнические особенности источника питания промышленных лазеров на парах металлов серии KULON, а также пространственно-временные и энергетические характеристики лазера KULON-15CU, выполненного на базе наиболее мощных отпаянных активных элементов данной серии LT-15CU.

Промышленные лазеры на парах меди (ЛПМ), лазеры на парах золота, а также лазеры на смеси паров меди и золота, выполненные на базе отпаянных саморазогреваемых активных элементов серии KULON [1], относятся к классу лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, работающих в импульсно-периодическом режиме и генерирующих на переходах с резонансного на метастабильный уровни. Такие лазеры обладают сравнительно высокой частотой следования импульсов ($10 \div 18$ кГц), широким диапазоном средней мощности излучения ($1,3 \div 20$ Вт) при практическом КПД до 0,7 % на относительно коротких длинах волн видимого спектра излучения (510,6 нм; 578,2 нм; 627,8 нм), короткой длительностью импульсов излучения ($10 \div 25$ нс) и низкой импульсной энергией ($0,1 \div 1$ мДж). При этом, при расходимости пучка лазерного излучения близкой к дифракционному пределу в пятне фокусировки достигаются предельно высокие плотности пиковой мощности ($10^9 \div 10^{12}$ Вт/см²). Кроме того, использование ЛПМ для накачки нелинейных кристаллов, а также кристаллов сапфира титана и лазеров на растворах органических красителей позволяет генерировать лазерное излучение в

диапазоне видимого, инфракрасного и ультрафиолетового спектров излучений. Экимерные лазеры, по сравнению с ЛПМ, имеют более короткие длины волн излучения, (193÷350)нм, что позволяет эффективно использовать их в различных технологиях, но частота следования импульсов генерации не превосходит 5 кГц. Диодные (полупроводниковые) лазеры имеют небольшие размеры и обладают высокой надежностью и ресурсом работы, но генерируют на более длинных волнах видимого спектра излучения, а выходная мощность ограничена предельными возможностями охлаждения полупроводниковой структуры лазера, что обычно требует применения холодильных установок и значительно ухудшает удельную материалоемкость и энергоемкость устройства в целом. Широко распространенные твердотельные лазеры на основе иттрий-алюминиевого граната с неодимом и удвоением частоты, генерирующие на длине волны 530 нм, обладают высокой надежностью и ресурсом работы, а также близкой к ЛПМ мощностью излучения и КПД, но расходимость твердотельных лазеров в несколько раз больше дифракционного предела.

Следует отметить, что КПД промышленных ЛПМ на порядок больше чем КПД непрерывных аргоновых лазеров с близкой по уровню мощностью излучения, и на порядок меньше чем КПД мощных инфракрасных CO_2 – лазеров, но энергия промышленных ЛПМ может быть сфокусирована на площади на два порядка меньшей, чем у мощных CO_2 – лазеров, что в ряде технологических процессов является определяющим фактором.

В настоящее время ЛПМ нашли применение в технологии по получению особо чистых веществ, в спектроскопии, в технологии по производству изделий электронной техники, подводной обработке материалов и высокоскоростной фотографии, в голографии и криминалистике, в мощных цветных телевизионных системах, при атмосферных исследованиях, в технологии прецизионной микрообработки различных материалов: тонколистовых металлов (0,1÷1,0 мм) как тугоплавких (молибден, ванадий, тантал), так и с высокой теплопроводностью (медь, алюминий, серебро, золото) и их сплавов, полупроводников, графита, естественных и искусственных алмазов, кварца, сапфира и др. При этом эффективно проводятся следующие виды технологических операций: сверление микроотверстий диаметром от 5 мкм, прецизионная контурная резка с шероховатостью поверхности реза менее 2 мкм, фрезерование, поверхностная обработка и т.д. Следует отметить, что прецизионная обработка в этом случае имеет следующие преимущества: на порядок и выше производительность изготовления деталей по сравнению с известными методами обработки, малая зона термического влияния, отсутствие расслоений, возможность обработки сложных поверхностей и т.д. Кроме того, ЛПМ нашли

применение в медицине: гинекологии, проктологии, урологии. Медицинские установки на основе ЛПМ успешно используются в дерматологии и косметологии для лечения сосудистых и пигментных дефектов кожи. Разработаны медицинские установки с использованием лазеров на парах золота для лечения онкологических заболеваний методом фотодинамической терапии.

Несмотря на уникальность свойств и параметров, а также широкие возможности применения в различных областях науки, техники и медицины промышленные лазеры на парах меди и золота по объему продаж занимали и занимают одно из последних мест, что, до недавнего времени, было обусловлено отсутствием выпускаемых промышленностью активных элементов с большим сроком службы (более 1000 часов) и надежных источников питания (генераторов наносекундных импульсов).

Результаты испытаний [2], а также их дальнейшее продолжение (в настоящее время ресурсные испытания не окончены) показали, что ресурс промышленных лазеров, выполненных на базе отпаянных активных элементов серии KULON с тетродным тиратронным генератором наносекундных импульсов, превосходит 3500 часов.

Конструктивно такие лазеры разработаны в виде моноблока, в котором могут быть применены модели активных элементов всех типов данной серии. Лазер имеет горизонтальную компоновку с габаритными размерами 1250мм x 330мм x 190мм и принудительной воздушной системой охлаждения. Вес лазера не более 45 кг (различные модели активных элементов имеют вес от 1,0 кг до 4,0 кг). Устройство источника питания, принципиальная электрическая схема генератора наносекундных импульсов и его работа описаны в [2], а конструктивное исполнение в [3]. Ниже рассмотрены схемотехнические особенности и работа импульсного подмодулятора тетродного тиратронного генератора наносекундных импульсов, устройство и работа системы регулирования напряжения на емкостном накопителе генератора наносекундных импульсов, а также пространственно-временные, энергетические и удельные характеристики промышленного лазера на парах меди KULON-15CU, выполненного на базе наиболее мощных активных элементов LT-15CU.

Устройство и работа импульсного подмодулятора тиратронного коммутатора тетродной конструкции

Устойчивая работа тиратронного коммутатора в импульсном режиме существенно зависит от давления водорода. Диапазон рабочих давлений водорода, в котором импульсный тиратрон работает устойчиво с частотой, задаваемой генератором синхронизирующих импульсов, без перехода из режима импульсной работы в режим

дугового разряда, без искажения импульса тока анода и пропусков отпирания, при отсутствии искрения катода, обрывов тока сетки и перегрева анода, имеет верхний и нижний пределы. Известно, что с понижением давления (плотности) водорода в тиратронном коммутаторе доля коммутационных потерь резко увеличивается, а с повышением давления водорода возрастают, например, послеимпульсные потери.

Таким образом, для тиратронного коммутатора существует оптимальная величина давления водорода. Уход от оптимального давления с целью, например, повысить электрическую прочность тиратронного коммутатора или уменьшить потери в нем, может привести к тому, что давление в тиратроне приблизится к верхнему или нижнему пределу, когда не может быть гарантирована надежная и долговечная работа тиратронного коммутатора [4]. Давление водорода тиратронного коммутатора, а также концентрация зарядов в его катодно-сеточной области в значительной степени определяются источником стабилизированного напряжения генератора водорода. Поэтому косвенный контроль давления водорода и концентрации зарядов в катодно-сеточной области тиратронного коммутатора могут быть выполнены по уровню выходного напряжения источника накала генератора водорода.

Блок-схема источника питания лазеров серии KULON, удовлетворяющая вышеназванным требованиям, приведена на рис. 1 и содержит зарядное устройство (ЗУ), генератор наносекундных импульсов (ГИ), импульсный подмодулятор (ИП), а также газоразрядную лазерную трубку (ГРТ).

При работе ИП, отпирающий импульс управления с генератора синхронизирующих импульсов подается на первый генератор импульсов только при наличии сигнала положительной обратной связи с выхода источника стабилизированного напряжения генератора водорода, а также при наличии сигнала отрицательной обратной связи с вывода зарядного устройства. Первый генератор импульсов формирует сильноточный импульс на сетку подготовительного разряда, в результате в промежутке сетка-катод тиратронного коммутатора формируется начальная концентрация зарядов. На управляющую сетку в этот момент времени подан отрицательный потенциал с источника напряжения и, таким образом, тиратронный коммутатор остается в закрытом состоянии. Отпирающий импульс положительной полярности на управляющую сетку формируется вторым генератором импульсов, который сдвинут во времени относительно импульса на сетку подготовительного разряда. За время действия устройства задержки, ток подготовительного разряда достигает максимального значения, происходит рост начальной концентрации зарядов в промежутке сетка-катод, которая достигает максимального значения в момент окончания действия задержки, и плотность плазмы в

области управляющая сетка-катод тиратронного коммутатора, в которую проникает поле анода, становится достаточной для распространения проводимости на весь тиратронный коммутатор. Тиратронный коммутатор срабатывает и накопитель энергии разряжается на газоразрядную лазерную трубку.

Если величина давления водорода тиратронного коммутатора, определяемая устройством стабилизации напряжения подогревателя генератора водорода, в процессе работы изменится относительно оптимальной величины, то сигнал обратной связи с выхода устройства стабилизации напряжения генератора водорода будет отсутствовать, и отпирающий импульс управления генератором синхронизирующих импульсов на первый генератор импульсов не будет подаваться. Кроме того, при срабатывании зарядного устройства и, например, пропуске срабатывания тиратронного коммутатора, сигнал обратной связи с выхода зарядного устройства, сравниваемый с величиной опорного напряжения на входе зарядного устройства, также будет отсутствовать. В результате этого будет отсутствовать сигнал управления на входе зарядного устройства и увеличения рабочего напряжения на элементах генератора наносекундных импульсов выше номинального не произойдет.

Осциллограммы подготовительного тока первой сетки и отпирающего тока второй сетки, а также отпирающего напряжения и тока на второй сетке тетродного тиратрона при практической реализации работы ИП приведены на рис. 2 и рис. 3.

Устройство регулирования напряжения на емкостном накопителе генератора наносекундных импульсов

Блок – схема источника питания лазеров серии KULON с устройством регулирования напряжения на емкостном накопителе генератора наносекундных импульсов приведена на рис. 4.

Работа устройства происходит следующим образом. На вход управляющих импульсов квазирезонансного транзисторного преобразователя поступают управляющие импульсы с формирователя импульсов управления. Через зарядный дроссель и первичную обмотку высоковольтного трансформатора при этом начинает протекать прямая полуволна синусоидального зарядного тока. Время открытого квазирезонансного колебательного процесса заканчивается при срабатывании компаратора, т.е. когда напряжение на выходе задающего генератора пилообразного напряжения сравнивается с напряжением на выходе разностного усилителя, которое, в свою очередь пропорционально разности напряжений источника опорного напряжения и напряжения, снимаемого с обмотки обратной связи, с помощью амплитудного детектора. Напряжение

на емкостном накопителе, изменяющееся по косинусоидальному закону, в этот момент времени достигает значения, определяемого технологическим процессом лазерного комплекса. Срабатывание компаратора вызывает срез импульса управления на выходе формирователя импульсов управления преобразователя. Транзисторные ключи преобразователя закрываются, напряжение, прикладываемое к первичной обмотке импульсного трансформатора, изменяется на противоположное, также на противоположное изменится напряжение на вторичной обмотке импульсного трансформатора. Поэтому прекратится протекание зарядного тока в цепи емкостного накопителя из-за наличия отсекающего зарядного диода, а напряжение на емкостном накопителе останется постоянным до момента срабатывания тиратронного коммутатора. При этом зарядный ток в первичной обмотке высоковольтного трансформатора, примерно по линейному закону, снизится до нулевого уровня за счёт рекуперации части магнитной энергии дросселя и высоковольтного трансформатора в источник питания.

В момент окончания импульса с выхода задающего генератора пилообразного напряжения срабатывает компаратор. Отпирающий импульс управления импульсного подмодулятора на сетке тиратронного коммутатора формируется только после срабатывания компаратора импульсом с выхода формирователя импульсов управления, задержанным линией задержки на время протекания всей полуволны зарядного тока. При формировании импульса на сетке тиратронного коммутатора емкостной накопитель разряжается на газоразрядную лазерную трубку и формируется импульс тока накачки с требуемой амплитудой, фронтом и длительностью. При работе устройства сердечник высоковольтного трансформатора не насыщается, поэтому максимальная частота генерации импульсов возбуждения газоразрядной лазерной трубки не ограничивается режимом работы элементов устройства. Меняя уровень уставки источника опорного напряжения, можно менять уровень зарядного напряжения емкостного накопителя от максимального значения до, практически, нулевого.

Осциллограммы зарядного тока в первичной обмотке высоковольтного трансформатора, для двух режимов работы лазера KULON-15CU, приведены на рис. 5.

Пространственно-временные и энергетические характеристики выходного излучения.

С точки зрения применения лазеров, особенно в технологии прецизионной микрообработки материалов, важной их характеристикой является расходимость выходного пучка излучения. Чем меньше расходимость пучка, т.е. чем ближе его значение к дифракционному пределу ($\theta_{diff}=2,44\lambda/D$, где λ - длина волны излучения, D – диаметр

пучка излучения), тем выше его качество. Такой пучок с помощью объектива можно сфокусировать в пятно с высокой плотностью излучения малого диаметра.

В ЛПМ для формирования качественных пучков обычно применяют неустойчивый резонатор телескопического типа с увеличением M в десятки и сотни крат ($M=R_1/R_2$, где R_1 и R_2 – радиус «глухого» и выходного зеркал резонатора). При этом структура выходного излучения многопучковая с коаксиальной симметрией: два, всегда присутствующих, пучка сверхсветимости и несколько резонаторных пучков. Количество пучков ограничено временем существованием инверсии. Первый пучок сверхсветимости формируется только геометрической апертурой разрядного канала активного элемента из усиливающихся спонтанных «затравок», второй – при участии «глухого» зеркала резонатора. Каждый пучок излучения обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками. Пучки частично перекрываются в пространстве и во времени, конкурируя между собой по мощности в процессе прохождения через активную среду (разрядный канал). Начало импульса второго пучка сверхсветимости отстает от начала первого примерно на время $\Delta t=2l_0/c$, где l_0 – расстояние от активной среды (разрядного канала) до «глухого» зеркала резонатора, c – скорость света. Начало импульса первого резонаторного пучка отстает от начала импульса второго пучка сверхсветимости на время одного двойного прохода излучением длины резонатора, начало импульса второго резонаторного пучка отстает на два двойных прохода и т.д., т.е. на время $\Delta t=(2L/c)*n$, где L -длина резонатора, n – число двойных проходов(номер резонаторного пучка). Начало импульса каждого резонаторного пучка отстает от начала предыдущего на время $\Delta t=2L/c$.

Практически, расходимость первого пучка сверхсветимости определяется отношением $\alpha_1=D_k/l_k$, где D_k и l_k – диаметр и длина разрядного канала, расходимость второго пучка сверхсветимости определяется отношением $\alpha_2=D_k/l$, где l – расстояние от выходного окна (апертуры) разрядного канала, до «глухого» зеркала. Расходимость этих пучков большая, поэтому практическую ценность они не представляют. Расходимость резонаторных пучков можно с высокой точностью рассчитать по формуле [1]:

$$\Theta = \frac{D_k}{(ML+l)M^{n-1}} + \frac{2,44\lambda}{D_k}$$

где D_k – диаметр разрядного канала, M – увеличение резонатора, L – длина резонатора, l – расстояние от «глухого» зеркала до выходной апертуры канала, n – число двойных проходов излучением длины резонатора.

Для промышленного лазера на парах меди KULON-15CU с активным элементом LT-15CU вышеназванные параметры имеют следующие величины: $D_k=14\text{мм}$, $l_k\sim 640\text{мм}$, $L=1000\text{мм}$, $\lambda_1=0,51\text{мкм}$ и $\lambda_2=0,58\text{мкм}$. Таким образом, предельная (дифракционная) расходимость равна величине $\theta_{\text{диф}}=2,44\lambda_2/D_k \sim 10^{-4}\text{рад}=0,1\text{мрад}$. На рис. 6 представлена расчетная зависимость расходимости резонаторных пучков от кратности увеличения M при постоянной длине резонатора ($L=1000\text{мм}$). При экспериментальной оценке расходимости и мощности резонаторных пучков выходное излучение фокусировалось зеркалом с фокусным расстоянием $F=10\text{м}$ ($\rho=99\%$). При этом в фокальной плоскости зеркала устанавливались калиброванные диафрагмы, а за ними датчик мощности лазерного излучения. Суммарная мощность излучения лазера в установившемся режиме с плоскоферическим резонатором при этом составила 20,6 Вт, с неустойчивым телескопическим резонатором при кратности увеличения $M=40$ и $M=200$, соответственно, 16 Вт и 14 Вт.

Экспериментально измеренные энергетические характеристики излучения лазера в зависимости от кратности увеличения резонатора и номера резонаторных пучков приведены в таблице.

Удельная материалоемкость лазера KULON-15CU, определяемая как отношение общего веса установки к средней суммарной мощности излучения в установившемся режиме, с плоскоферическим резонатором, составляет 2,18 кг/Вт. Удельная энергоемкость лазера, при расходимости излучения близкой к дифракционному пределу, определяемая как отношение мощности потребляемой от сети к средней суммарной мощности излучения в установившемся режиме при кратности увеличения резонатора $M=40$ и $M=200$ составляет, соответственно, 0,116 кВт/Вт и 0,133 кВт/Вт.

Заключение

1. Принятая при разработке промышленного лазера принципиальная электрическая схема генератора наносекундных импульсов [2], используемая при накачке всех типов моделей активных элементов серии KULON, а также принятые схемотехнические особенности импульсного подмодулятора тиратронного коммутатора тетродной конструкции и устройства регулирования напряжения на емкостном накопителе генератора наносекундных импульсов, обеспечивают, во-первых, снижение коммутационных потерь в тиратроне, во-вторых, косвенный контроль концентрации зарядов в катодно-сеточной области тиратронного коммутатора и контроль уровня напряжения на элементах источника питания, и, в-третьих, повышение быстродействия

регулирования уровня напряжения накачки лазерной трубки, что и позволяет существенно повысить надежность и ресурс работы элементов всего лазерного комплекса в целом.

2. С ростом кратности увеличения резонатора и числа двойных проходов резонаторных пучков расходимость выходного пучка излучения лазера KULON-15CU стремится к дифракционному пределу. При двухсоткратном увеличении расходимость резонаторных пучков имеет дифракционное качество, что хорошо согласуется с расчетом.

3. Достаточно высокие удельные и массогабаритные параметры позволяют широко использовать разработанный промышленный лазер в науке, современных технологических процессах и медицине.

Литература

1. Лябин Н.А. Разработка и исследование промышленных отпаянных лазеров на парах меди мощностью 10÷50 Вт для технологического и медицинского применений: Дисс. ... канд. техн. наук.- Фрязино, 2002.-244с.
2. Колоколов И.С. и др. //Прикладная физика, 2003, №3, с.84-89
3. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. и др. //Прикладная физика. 2001, №5, с.46-49.
4. Фогельсон Т.Б. и др. Импульсные водородные тиратроны.-М.:Сов. Радио, 1974.- 212с.

The metal vapour industrial lasers of KULON series

N.M. Lepehin, Y.S. Priseko, V.G. Filippov
ZAO «OEP VEI»,
Istra, Moscow region, Russia

N.A. Lyabin, A.D. Chursin
FGUP «NPP "Istok"»
Fryasino, Moscow region, Russia

M.A. Kasaryan
Physical institute by P.N. Lebedev of RAS, Moscow, Russia

The brief comparative analysis of industrial lasers of various types is given and the most widely used application fields for copper vapour lasers are presented. Circuitry features of industrial copper vapour lasers of KULON series power source and timespace and power characteristics of KULON series laser made using more powerful active elements of LT-15CU series are viewed.

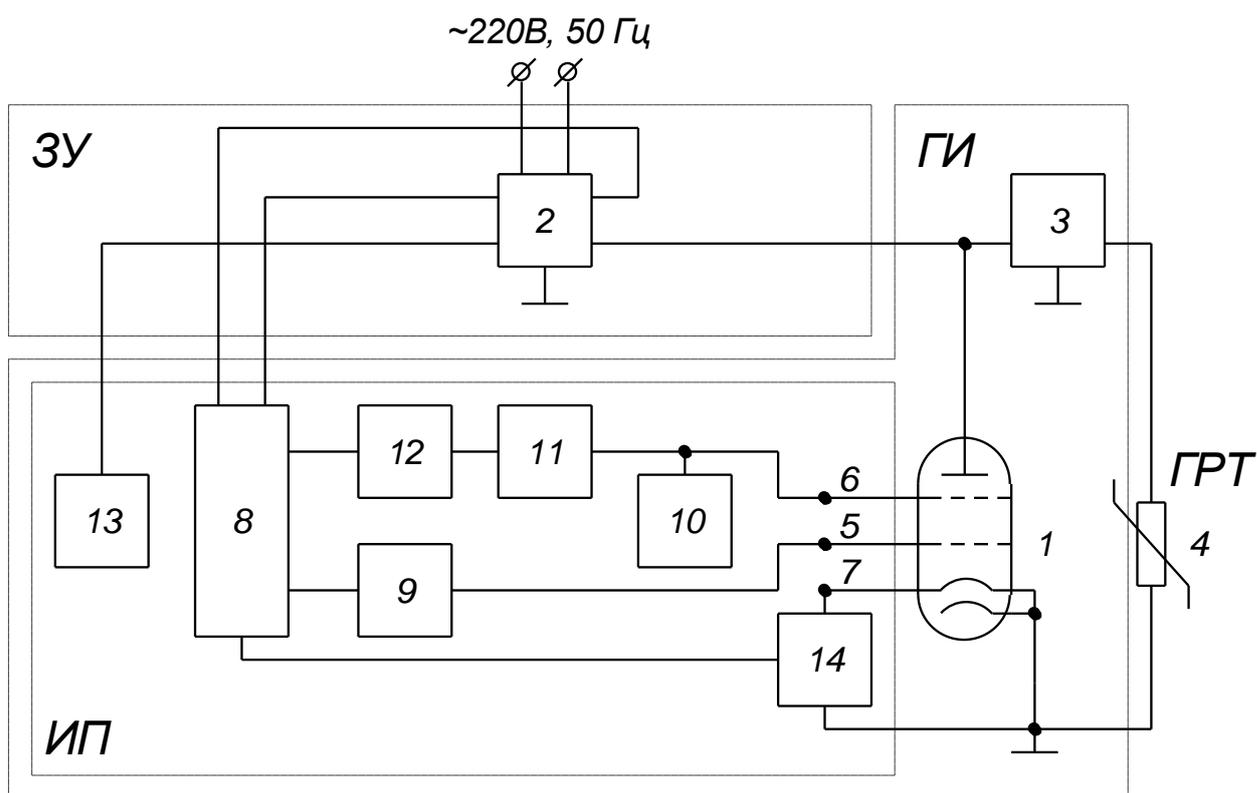


Рис. 1 Блок-схема источника питания лазеров серии KULON с тетродным тиратронным коммутатором:

- 1 – тиратронный коммутатор;
- 2 – зарядное устройство;
- 3 – емкостной накопитель энергии;
- 4 – газоразрядная лазерная трубка;
- 5 – сетка подготовительного разряда;
- 6 – управляющая сетка;
- 7 – накал генератора водорода;
- 8 – генератор синхронизирующих импульсов;
- 9 – первый генератор импульсов;
- 10 – источник отрицательного напряжения;
- 11 – второй генератор импульсов;
- 12 – схема задержки;
- 13 – источник опорного напряжения;
- 14 – устройство стабилизации подогревателя генератора водорода.

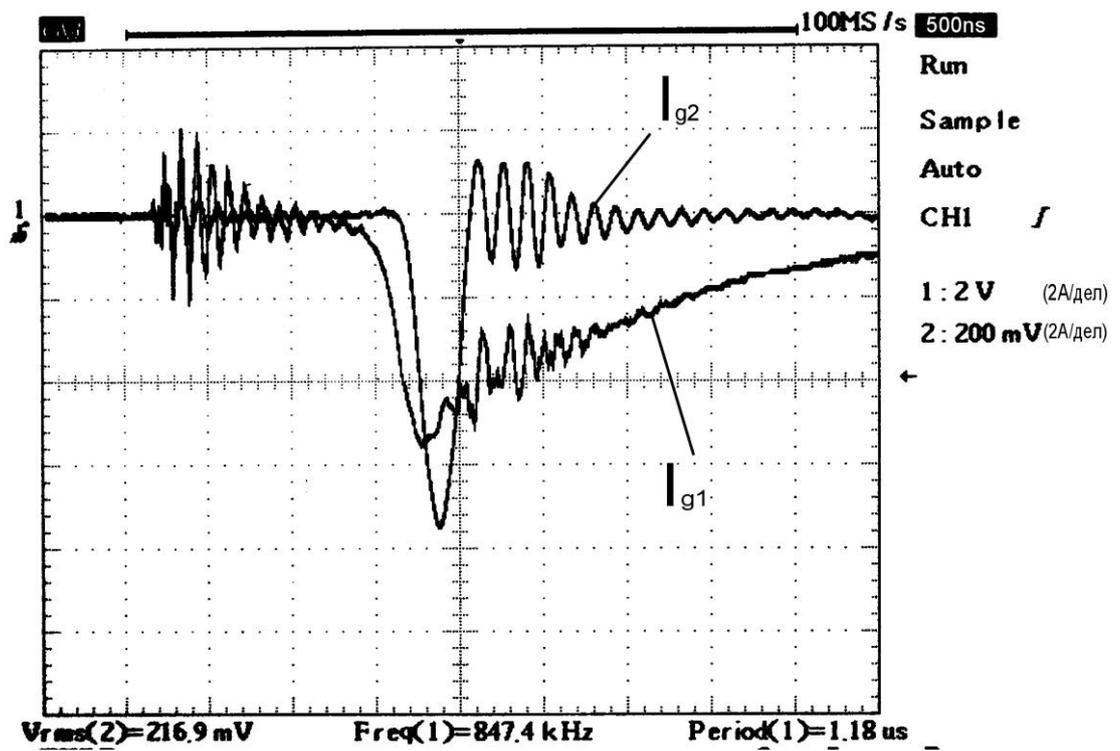


Рис. 2 Осциллограммы подготовительного тока первой сетки i_{g1} и отпирающего импульса тока второй сетки i_{g2} тетродного тиратрона

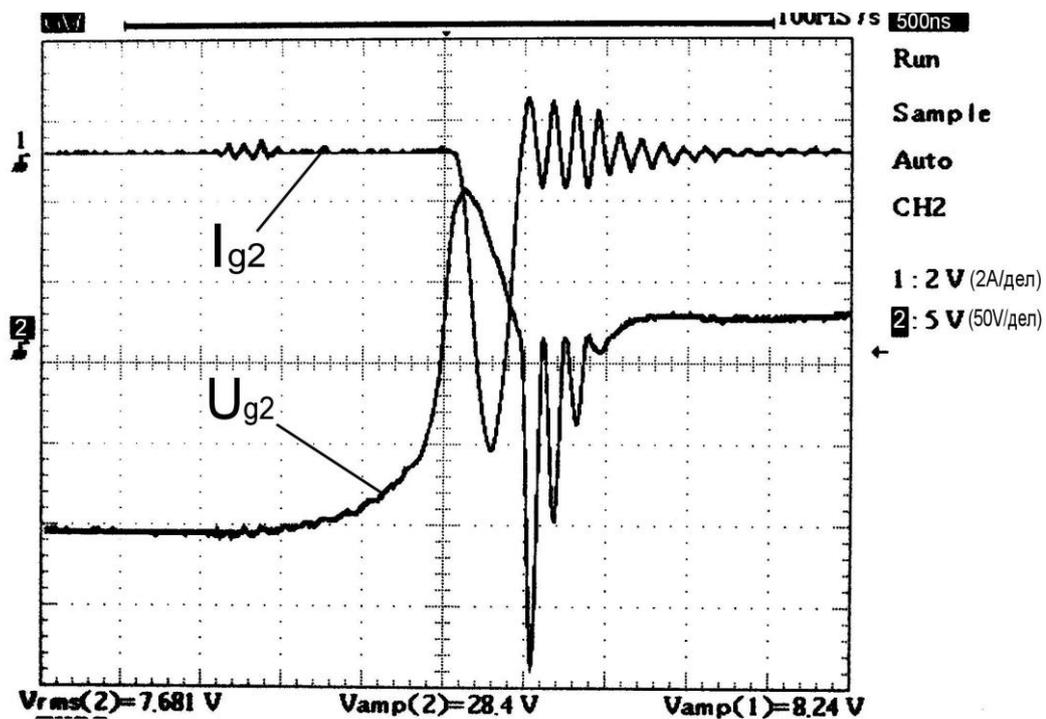


Рис. 3 Осциллограммы отпирающего импульса напряжения U_{g2} и тока i_{g2} на второй сетке тетродного тириатрона

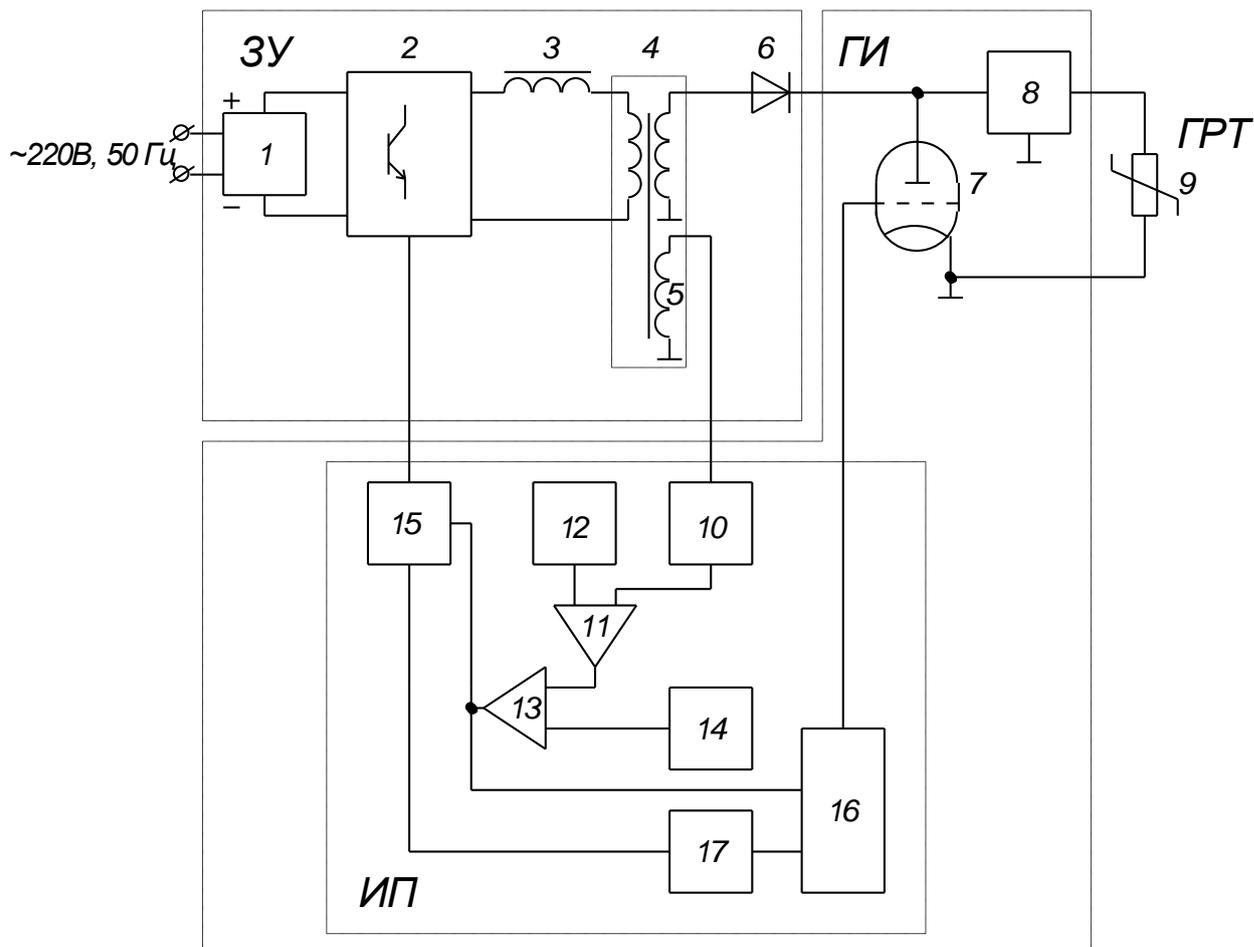


Рис.4 Блок-схема источника питания лазеров серии KULON с устройством регулирования напряжения на емкостном накопителе генератора наносекундных импульсов:

- 1 – источник постоянного напряжения;
- 2 – квазирезонансный транзисторный преобразователь;
- 3 – зарядный дроссель;
- 4 – высоковольтный трансформатор;
- 5 – обмотка обратной связи;
- 6 – зарядный диод;
- 7 – тиратронный коммутатор;
- 8 – емкостной накопитель;
- 9 – газоразрядная лазерная трубка;
- 10 – амплитудный детектор;
- 11 – разностный усилитель;
- 12 – источник опорного напряжения;
- 13 – компаратор;
- 14 – задающий генератор пилообразного напряжения;
- 15 – формироваватель импульсов управления;
- 16 – импульсный подмодулятор;
- 17 – линия задержки.

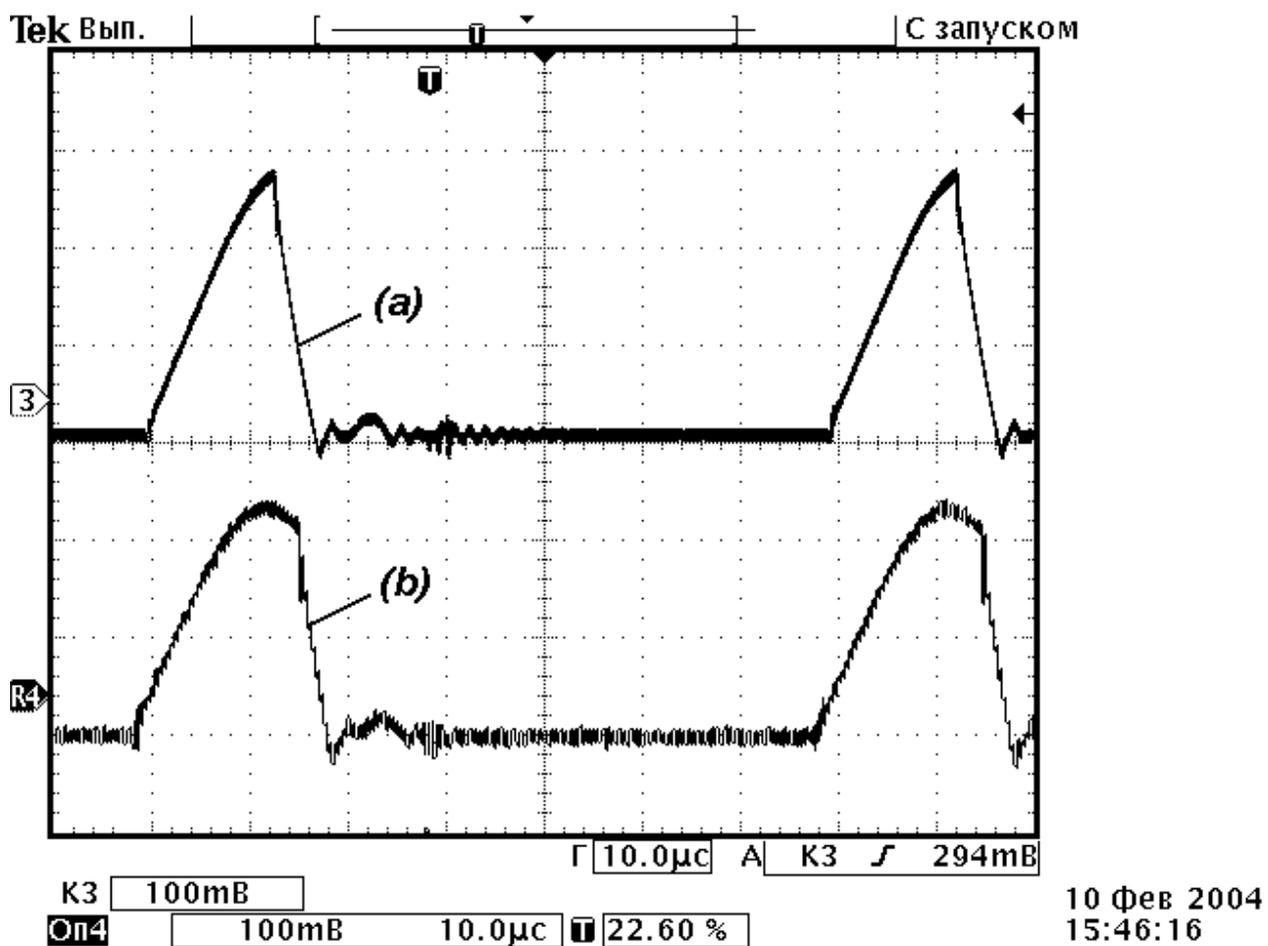


Рис. 5. Осциллограммы зарядного тока в первичной обмотке высоковольтного трансформатора:

- a – подготовительный режим;
- b – рабочий режим;

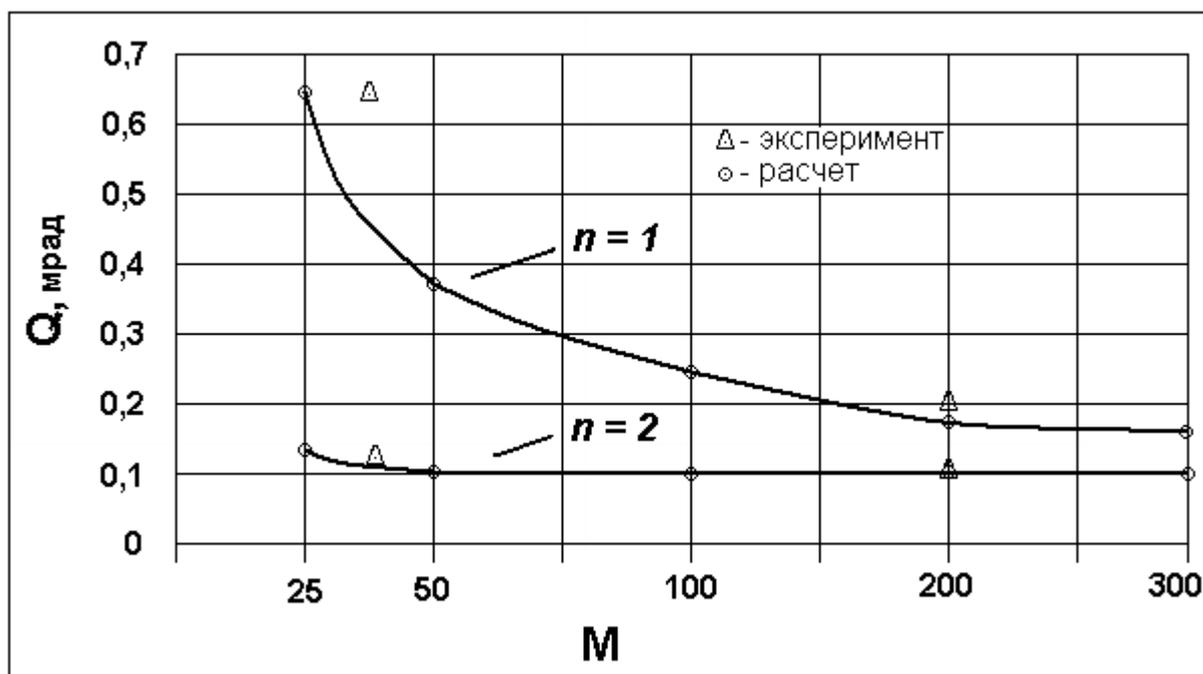


Рис. 6. Расчетная зависимость расходимости резонаторных пучков от кратности увеличения оптического телескопического неустойчивого резонатора.

Кратность увеличения резонатора	Средняя суммарная мощность излучения	Мощность излучения в резонаторных пучках		Расходимость резонаторных пучков		Средняя суммарная мощность излучения в пучках сверхсветимости
		n = 1	n = 2	n = 1	n = 2	
	Вт (%)	Вт (%)	Вт (%)	мрад	мрад	Вт (%)
M = 40	16(100%)	7,3(46%)	2,7(17%)	0,65	0,12	6(37%)
M = 200	14(100%)	3,5(25%)	3,5(25%)	0,17	0,1	7(50%)

где n – число двойных проходов излучением длины резонатора (номер резонаторного пучка).

Рис. 1 Блок-схема источника питания лазеров серии KULON с тетродным тиратронным коммутатором:

- 1 – тиратронный коммутатор;
- 2 – зарядное устройство;
- 3 – емкостной накопитель энергии;
- 4 – газоразрядная лазерная трубка;
- 5 – сетка подготовительного разряда;
- 6 – управляющая сетка;
- 7 – накал генератора водорода;
- 8 – генератор синхронизирующих импульсов;
- 9 – первый генератор импульсов;
- 10 – источник отрицательного напряжения;
- 11 – второй генератор импульсов;
- 12 – схема задержки;
- 13 – источник опорного напряжения;
- 14 – устройство стабилизации подогревателя генератора водорода.

Рис. 2 Осциллограммы подготовительного тока первой сетки i_{g1} и отпирающего импульса тока второй сетки i_{g2} тетродного тиратрона

Рис. 3 Осциллограммы отпирающего импульса напряжения u_{g2} и тока i_{g2} на второй сетке тетродного тиратрона

Рис. 4 Блок-схема источника питания лазеров серии KULON с устройством регулирования напряжения на емкостном накопителе генератора наносекундных импульсов:

- 1 – источник постоянного напряжения;
- 2 – квазирезонансный транзисторный преобразователь;
- 3 – зарядный дроссель;
- 4 – высоковольтный трансформатор;
- 5 – обмотка обратной связи;
- 6 – зарядный диод;
- 7 – тиратронный коммутатор;
- 8 – емкостной накопитель;
- 9 – газоразрядная лазерная трубка;
- 10 – амплитудный детектор;
- 11 – разностный усилитель;
- 12 – источник опорного напряжения;
- 13 – компаратор;
- 14 – задающий генератор пилообразного напряжения;
- 15 – формироавтель импульсов управления;
- 16 – импульсный подмодулятор;
- 17 – линия задержки.

Рис. 5. Осциллограммы зарядного тока в первичной обмотке высоковольтного трансформатора:

- a – подготовительный режим;
- b – рабочий режим;

Рис. 6. Расчетная зависимость расходимости резонаторных пучков от кратности увеличения оптического телескопического неустойчивого резонатора.