

Н.А. Васнев^{1*} , П.И. Гембух¹ , Н.В. Карасев¹ , М.В. Тригуб^{1,2} 

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, г. Томск

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

*email: vasnev.nickol@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ НАКАЧКИ ДЛЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА САМООГРАНИЧЕННЫХ ПЕРЕХОДАХ В ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

Работа посвящена разработке нетипичных способов возбуждения активных элементов бистатического лазерного монитора для визуализации быстропротекающих процессов в условиях мощной фоновой засветки. Практическая значимость работы заключается в увеличении временного разрешения бистатического лазерного монитора, а также улучшения параметров визуализации за счет минимизации джиттера импульсов излучения. Для достижения поставленной цели были разработаны полупроводниковые источники возбуждения активных сред на парах бромида меди, а также выполнена их синхронизация в импульсно-периодическом режиме. Разработанные источники представляют собой массив идентичных коммутационных ячеек. Каждая ячейка включает в себя накопительный конденсатор, коммутатор и трансформатор. В качестве коммутаторов были выбраны мощные IGBT-транзисторы HG TG27N120BN, при переключении которых накопительные конденсаторы разряжаются через первичную обмотку трансформатора, в результате чего индуцируется импульс напряжения во вторичной обмотке. Нагрузкой трансформатора являлась газоразрядная трубка (ГРТ) малогабаритного усилителя яркости с указанными геометрическими параметрами ($l = 40$ см, $d = 2,5$ см, $V = 196$ см³). Одновременная коммутация 10 идентичных ячеек обеспечивала пробой ГРТ. Мощность излучения активного элемента в режиме генератора составила 665 мВт. Разработанный усилитель яркости с полупроводниковой накачкой использовался в схеме бистатического лазерного монитора для визуализации тестового объекта. Накачка второго активного элемента, источника подсветки ($l = 90$ см, $d = 5$ см, $V = 1767$ см³), осуществлялась с помощью тиратрона ТГИ1-1000-25. Частота следования импульсов излучения источника подсветки и усилителя яркости составила 10,5 и 21 кГц соответственно, в результате чего каждое второе изображение формировалось с увеличенной яркостью и контрастом. Наибольшее значение джиттера импульсов излучения при этом составило 16 нс. Среднее значение джиттера составило 6 нс. Также был проведен эксперимент по синхронной накачке активных элементов двумя идентичными полупроводниковыми источниками возбуждения. Полученный массив осциллограмм тока и напряжения ГРТ показывают, что в большинстве случаев джиттер отсутствовал полностью, а при появлении не превышал 4 нс. Визуализация при такой конфигурации источников не была выполнена, поскольку мощность полупроводникового источника (465 Вт) оказалась недостаточной для возбуждения источника подсветки, в связи с чем предложены варианты ее увеличения.

Ключевые слова: лазерный монитор, активная среда на парах металлов, визуально-оптическая диагностика, визуализация, источник накачки, синхронизация, джиттер.

Н.А. Васнев^{1*}, П.И. Гембух¹, Н.В. Карасев¹ М.В. Тригуб^{1,2}

¹В.Е. Зуев атындағы атмосфералық оптика институты, РҒА СО, Ресей, Томск қ.

²Томск политехникалық ұлттық зерттеу университеті, Ресей, Томск қ.

*email: vasnev.nickol@yandex.ru

Металл буларындағы өзіндік шектеулі ауысуларға негізделген белсенді элементтер үшін жартылай өткізгіш қозу көздерін әзірлеу және синхрондау

Жұмыс қуатты фондық жарық жағдайында жылдам жүретін процестерді визуализациялау үшін бистатикалық лазерлік монитордың белсенді элементтерін қоздырудың типтік емес әдістерін жасауға

арналған. Жұмыстың практикалық маңыздылығы бистатикалық лазерлік монитордың уақытша ажыратымдылығын арттыру, сондай-ақ сәулелену импульстарының джиттерін азайту арқылы бейнелеу параметрлерін жақсарту болып табылады. Осы мақсатқа жету үшін мыс бромидінің буы негізіндегі белсенді орталардың жартылай өткізгішті қоздыру көздері әзірленіп, олардың синхрондауы қайталанатын импульстік режимде орындалды. Әзірленген көздер бірдей коммутациялық ұяшықтардың массиві болып табылады. Әрбір ұяшықта сақтау конденсаторы, қосқыш және трансформатор бар. Ажыратқыштар ретінде жоғары қуатты IGBT транзисторлары HGTG27N120BN таңдалды, оларды ауыстырған кезде сақтау конденсаторлары трансформатордың бастапқы орамасы арқылы разрядталады, нәтижесінде қайталама орамда кернеу импульсі индукцияланады. Трансформатордың жүктемесі геометриялық параметрлері көрсетілген ($l = 40$ см, $d = 2,5$ см, $V = 196$ см³) шағын өлшемді жарықтық күшейткіштің газ разрядтық түтігі (ГДТ) болды. 10 бірдей ұяшықты бір уақытта ауыстыру GDT бұзылуын қамтамасыз етті. Генератор режиміндегі белсенді элементтің сәулелену қуаты 665 мВт болды. Әзірленген жартылай өткізгішпен айдалатын жарықтық күшейткіші сынақ объектісін визуализациялау үшін бистатикалық лазерлік монитордың тізбегінде қолданылды. Екінші белсенді элементті, жарықтандыру көзін ($l = 90$ см, $d = 5$ см, $V = 1767$ см³) айдау TGI1-1000-25 тиратрон көмегімен жүзеге асырылды. Жарықтандыру көзінің және жарықтық күшейткішінің сәулелену импульстерінің қайталану жылдамдығы сәйкесінше 10,5 және 21 кГц болды, нәтижесінде әрбір екінші кескін жоғары жарықтық пен контрастпен қалыптасты. Бұл жағдайда радиациялық импульстік дірілдің ең жоғары мәні 16 нс болды. Орташа діріл 6 нс болды. Сонымен қатар екі бірдей жартылай өткізгіш қоздыру көздерімен белсенді элементтерді синхронды айдау бойынша тәжірибе жүргізілді. Алынған массив осциллограммасы тоқ және GDT кернеу көп жағдайда діріл мүлдем жоқ болды, және ол пайда болған кезде, ол 4 нс аспайды. Жартылай өткізгіш көздің қуаты (465 Вт) жарық көзін қоздыру үшін жеткіліксіз болғандықтан, бұл көз конфигурациясымен визуализация орындалмады, байланысты оны ұлғайту нұсқалары ұсынылған.

Түйін сөздер: лазерлік монитор, металл буының белсенді ортасы, визуалды-оптикалық диагностика, визуализация, қозу көзі, синхронизациялау, джиттер.

N.A. Vasnev^{1*}, P.I. Gembukh¹, N.V. Karasev¹ M.V. Trigub^{1,2}

¹Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

²Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

*e-mail: vasnev.nickol@yandex.ru

Development and synchronization of semiconductors excitation sources for active elements on self-terminating transitions in metal vapors

The paper is devoted to development of atypical excitation approaches of bistatic laser monitor active elements for the imaging of high-speed processes at a powerful background radiation. The practical significance is increasing the temporal resolution of the bistatic laser monitor, as well as improving the imaging parameters by minimizing the jitter of radiation pulses. To achieve this goal, semiconductor excitation sources of active media based on copper bromide vapor were developed, and their synchronization was performed in a pulse-repetition mode. The developed pump sources are set of identical commutation cells. Each cell contains storage capacitor, commutator and transformer. Powerful HGTG27N120BN insulated-gate bipolar transistors (IGBT) were chosen as commutators. Their switching storage capacitors are discharged through the primary winding of the transformer and as result the voltage pulse is induced in the secondary winding. The transformer load was the gas discharge tube (GDT) of the small-size brightness amplifier with the specified geometric parameters ($l = 40$ cm, $d = 2.5$ cm, $V = 196$ cm³). The simultaneous switching of 10 identical cells provided GDT breakdown. The radiation power of the active element in oscillator mode was 665 mW. The developed brightness amplifier with semiconductor pump source was used in the bistatic scheme of the laser monitor for the imaging of the test object. The pumping of the second active element, the illumination source ($l = 90$ cm, $d = 5$ cm, $V = 1767$ cm³), was performed by means of thyatron TGI1-1000-25. The pulse repetition frequency of the illumination source and the brightness amplifier was 10.5 and 21 kHz respectively. As result each second image was formed with increased brightness and contrast. The maximal jitter of radiation pulses in this case was 16 ns. The average jitter was 6 ns. Two identical semiconductor pump sources were tested

simultaneously. The resulting array of waveforms (GDT current and GDT voltage) show that in most cases the jitter was completely absent, and when it appeared, it did not exceed 4 ns. The imaging at this configuration of the pump sources was not performed due to semiconductor source power (465 W) turned out to be insufficient for the excitation of the illumination source, and therefore options for increasing it were proposed.

Key words: laser monitor, active medium on metal vapors, visual-optical diagnostic, imaging, pump source, synchronization, jitter.

Введение

Лазерные мониторы на основе активных сред на парах металлов используются для визуально-оптической диагностики быстропротекающих процессов с мощной фоновой засветкой. Узкая спектральная линия (≤ 10 пм), высокий коэффициент усиления ($10^3 \div 10^4$), а также высокая оптическая однородность среды позволяют сформировать изображение процесса наблюдения с высоким соотношением «сигнал/шум» [1-3]. В связи с этим лазерные мониторы востребованы при изучении таких процессов, как сварка [4, 5], самораспространяющийся высокотемпературный синтез [6, 7], создание наноструктурированных материалов [8, 9] и другие [10, 11]. Применение современных скоростных цифровых камер [12, 13] позволяет осуществлять высокочастотную съемку перечисленных процессов для их детального изучения.

В работах [14, 15] показано, что использование двух активных сред позволяет создать лазерную проекционную систему, которая формирует изображения с более высокой яркостью и контрастом. Такой подход был использован для построения бистатического лазерного монитора на парах бромида меди с покадровой регистрацией изображения [16]. В работах [17-19] показано, что бистатический лазерный монитор обеспечивает не только увеличение яркости и контраста, но также и области зрения и дистанции визуализации.

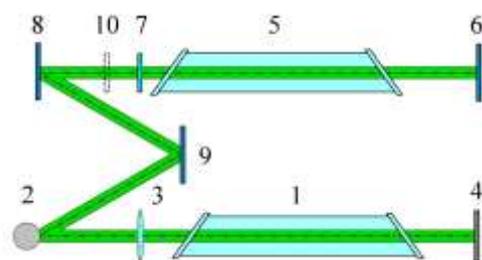


Рисунок 1 – Схема бистатического лазерного монитора: 1 – усилитель яркости; 2 – объект наблюдения; 3 – объектив; 4 – проекционный экран; 5 – источник подсветки; 6, 7 – плоскопараллельный резонатор; 8, 9 – глухие зеркала; 10 – блокировочный экран.

Разработка и принцип действия бистатического лазерного монитора имеет большое сходство с МОРА-системой, которая состоит из двух активных элементов на самоограниченных переходах в парах металлов: задающего генератора и усилителя мощности [20-21]. МОРА-система используется для формирования лазерного излучения с минимальной расходимостью (на уровне дифракционного предела).

Главная особенность МОРА-системы и бистатического лазерного монитора – это синхронная накачка обоих источников излучения. Фактически, один активный элемент формирует полезный сигнал, а другой усиливает его мощность или яркость в случае оптического изображения. Обязательным условием усиления является наличие инверсной населенности в активной среде усилителя. Следовательно, для реализации как МОРА-системы, так и бистатического лазерного монитора, требуется создавать источники накачки с каналом синхронизации, который сможет обеспечить регулировку временного сдвига между возбуждением первой и второй активной среды. Такой подход позволяет согласовывать импульсно-периодические режимы работы активных элементов и, как следствие, увеличить предельно-допустимую дистанции визуализации лазерного монитора.

Способы синхронизации определяются топологией источников возбуждения, а также используемыми в них высоковольтными коммутаторами. Наиболее часто встречающимися коммутаторами являются тиратроны, например, ТГИ1 – 1000/25, которые используются для возбуждения активных элементов на частотах следования импульсов (ЧСИ) от 10 до 16 кГц в системе [22]. Временной сдвиг между коммутацией тиратрона варьировался в диапазоне от 0 до 110 нс с точностью позиционирования не хуже 1 нс. Джиттер импульсов излучения, при этом, не превышал 7 нс. Джиттер (фазовое дрожание сигнала от импульса к импульсу) является важным параметром подобных лазерных систем. Другим важным параметром для бистатического лазерного монитора является и ЧСИ, поскольку

она определяет временное разрешение визуализации. Оба этих параметра могут быть улучшены при использовании вместо тиратронов полупроводниковых коммутаторов, поскольку современные транзисторы имеют хорошие коммутационные характеристики.

Таким образом, разработка различных топологий источников возбуждения, основанных на полупроводниковых коммутаторах, является актуальной задачей [23-25]. В данной работе представлены результаты разработки полупроводниковых источников возбуждения, а также их синхронизации при работе в импульсно-периодическом режиме.

Разработка и испытание

Традиционным способом возбуждения активных сред на самоограниченных переходах в парах металла является заряд накопительного конденсатора до напряжения (10÷15) кВ и его последующий разряд на нагрузку – газоразрядную трубку (ГРТ). Чаще всего для этих целей используют тиратроны или таситроны, которые обеспечивают коммутацию высокого напряжения с высокой скоростью нарастания. Рабочее напряжение современных силовых транзисторов редко превышает 1200 В. Поэтому для возбуждения активной среды необходимо использовать массив идентичных коммутационных ячеек, аналогично работам [25, 26]. В этом случае каждая ячейка содержит накопительный конденсатор и транзисторный ключ. Упрощенная принципиальная схема коммутационной ячейки представлена на рисунке 2. Источник питания V_{dd} заряжает накопительный конденсатор $C1$ через диод $VD1$. Цифровая система управления формирует импульсы V_{in} , поступающие на вход драйвера $DD1$. Далее выходные импульсы драйвера поступают на управляющий электрод транзистора $VT1$, в результате чего происходит его коммутация и, следовательно, разряд конденсатора $C1$ через первичную обмотку $W1$ трансформатора $TV1$. Трансформатор $TV1$ индуцирует импульс напряжения во вторичной обмотке $W2$, которая подключена к нагрузке $R1$.

Амплитуда импульса напряжения на нагрузке при прочих равных условиях будет определяться числом коммутационных ячеек. Вторичные обмотки ячеек включаются последовательно, а первичные обмотки в момент коммутации включаются параллельно. Несинхронная коммутация ячеек, обусловленная нестабильной работой системы управления или разбросом параметров транзисторов, будет

способствовать возникновению динамических потерь и, как следствие, приводить к снижению КПД источника возбуждения.

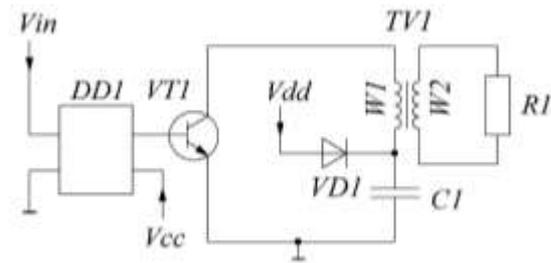


Рисунок 2 – Упрощенная принципиальная схема коммутационной ячейки.

Для тестовых испытаний был изготовлен лабораторный макет из четырех идентичных коммутационных ячеек. Система управления была реализована на основе цифрового генератора Rigol DG1022 с дискретностью не хуже 1 нс. В качестве драйверов были выбраны двухканальные микросхемы MC34151DG, в связи с чем каждый драйвер работал на две ячейки. Амплитуда и длительность импульсов, поступающих на вход драйвера, составили 5 В и 750 нс соответственно. Выходные импульсы амплитудой 12 В и с временем фронта 65 нс поступали на управляющий электрод транзистора $VT1$. Четыре идентичных трансформатора были выполнены на тороидальных ферритовых сердечниках (M2000HM) с габаритными размерами $R45 \times 28 \times 8$. Первичная и вторичная обмотки насчитывали по три витка, следовательно, коэффициент трансформации составил 1. Емкость каждого накопительного конденсатора составила 3,3 нФ. Напряжение питания подавалось на источник через однофазный автотрансформатор АОСН-8С-220-82 (8А, 240 В, 1920 Вт). Схема Латура обеспечивала удвоение напряжения питания, а диодно-резонансный заряд способствовал увеличению напряжения еще в 2,34 раза. В качестве диодов были выбраны FR607 (6 А, 1000 В). В качестве коммутаторов были опробованы четыре вида транзисторов, основные технические характеристики которых представлены в Таблице 1. Наилучший результат с точки зрения коммутационных характеристик и уровня напряжения продемонстрировали силовые IGBT-транзисторы HGTG27N120BN. При напряжении питания 440 В напряжение на каждом накопительном конденсаторе благодаря диодно-резонансному заряду достигало 1030 В. Коммутация каждой ячейки сперва осуществлялась на четыре идентичных нагрузки (ТВО резистор: 100 Ом, 60 Вт), а затем на одну общую с теми же параметрами.

Таблица 1 – Технические характеристики используемых транзисторов

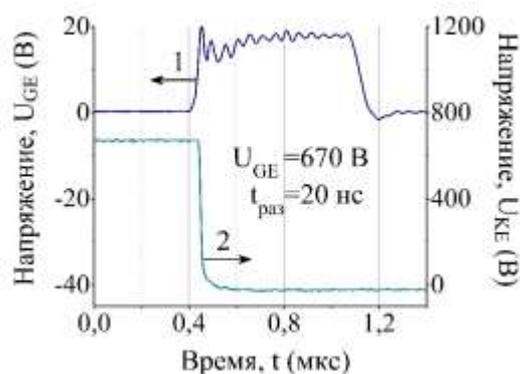
	$U_{KE/DS}$, В	$I_{K/D}$ pulse, А	P, Вт	tф, нс	tс, нс
IRG4PH50UDPBF	1200	180	200	24	180
IPAW60R280P7S	650	36	25	9	9
SPW17N80C3	800	51	227	15	12
HGTG27N120BN	1200	216	500	25	120

Дальнейшие испытания сопровождались постепенным увеличением числа ячеек до 10. Для улучшения магнитных свойств трансформатора тороидальные сердечники M2000HM были заменены на B64290L0082X095 с габаритными размерами R50x30x20. Первичные обмотки на каждом сердечнике содержали по 4 витка. Вторичная обмотка была выполнена общим проводом по 3 витка на каждом тороидальном сердечнике.

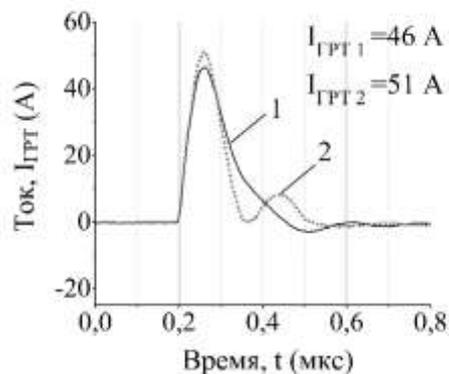
Одновременная коммутация 10 идентичных ячеек обеспечивала пробой ГРТ малогабаритного усилителя яркости с указанными геометрическими параметрами ($l = 40$ см, $d = 2,5$ см, $V = 196$ см³). Для минимизации влияния электромагнитных помех на работу системы управления и коммутацию транзисторов напряжение питания драйверов MC34151DG было обеспечено сетевым трансформатором (ТН-60-127/220-50) с выпрямителем и фильтром. Уровень напряжения питания был увеличен до 18 В, а емкости блокировочных конденсаторов были увеличены в два раза. На рисунке 3, а представлен импульс управления на затворе транзистора (U_{GE}) и напряжение на коллекторе (U_{KE}). При открытии транзистора накопительный конденсатор полностью разряжается за 20 нс.

Активный объем ГРТ разогревался с помощью внешнего нагревательного элемента. Нагрев контейнеров с активным веществом (CuBr) управлялся по отдельному каналу с помощью ПИД-регулятора REX-C100. Частота следования импульсов составила 21 кГц. Амплитуда тока через ГРТ при напряжении питания 420 В составила 46 А, длительность фронта – 42 нс. По мере прогрева ГРТ и повышения концентрации паров рабочего вещества (бромид меди) в активном объеме амплитуда тока ГРТ постепенно уменьшалась. Добавление в зарядно-разрядный контур обострительного конденсатора емкостью 330 пФ увеличило амплитуду тока через ГРТ до 51 А. Скорость нарастания тока увеличилась приблизительно на 16 %. При появлении усиленного спонтанного излучения ток через ГРТ снижался до 44 А. Потребляемый ток от сети составил при этом 0,85 А. Следовательно, вкладываемая мощность была равна 357 Вт. Мощность излучения активной среды в режиме генератора (с плоскопараллельным резонатором)

составила 460 мВт, что относительно неплохо для такой низкой вкладываемой мощности. Напряжение питания постепенно было увеличено до 500 В, что соответствует вкладываемой мощности 465 Вт. Напряжение U_{KE} при этом достигло 1090 В, что составляет приблизительно 90 % от предельно допустимого напряжения U_{KE} выбранного транзистора. Таким образом, дальнейшее увеличение напряжения питания недопустимо. Мощность излучения активного элемента в режиме генератора увеличилась до 665 мВт.



а)



б)

Рисунок 3 – а) Импульсы напряжения на затворе (U_{GE}) и на коллекторе (U_{KE}) IGBT-транзистора HGTG27N120BN; б) Ток через ГРТ без обострительного конденсатора (1) и с обострительным конденсатором емкостью $C = 330$ пФ (2).

Визуализация и синхронизация

Для визуализации в качестве тестового объекта была выбрана печатная плата с защитной маской и металлизированными отверстиями. Изображения формировались как в схеме моностатического, так и в схеме бистатического лазерного монитора. Схема бистатического лазерного монитора представлена на рисунке 1.

Для получения изображения в моностатической схеме лазерного монитора достаточно перекрыть излучение источника подсветки блокировочным экраном 10. На рисунке 4 представлены как сформированные изображения, так и графики распределения яркости пикселей вдоль обозначенных вертикальных прямых.

Для визуализации в схеме бистатического лазерного монитора использовался источник подсветки, накачка которого осуществлялась с помощью тиратрона ТГИ1-1000-25. Длина активной зоны ГРТ источника подсветки составила 50 см, а диаметр – 3,2 см. Для согласования частотно-временных параметров разработанного полупроводникового источника и источника с тиратроном была реализована схема синхронизации на основе цифрового генератора Rigol DG1022. ЧСИ источника подсветки составила 10,5 кГц, ЧСИ усилителя яркости составила 21 кГц. То есть каждый второй импульс усилителя повышал яркость изображения, сформированного излучением источника подсветки. Рисунок 4 демонстрирует, что бистатический лазерный монитор обеспечивает большую яркость изображения, контрастность и поле зрения. Об этом также свидетельствуют графики распределения яркости пикселей.

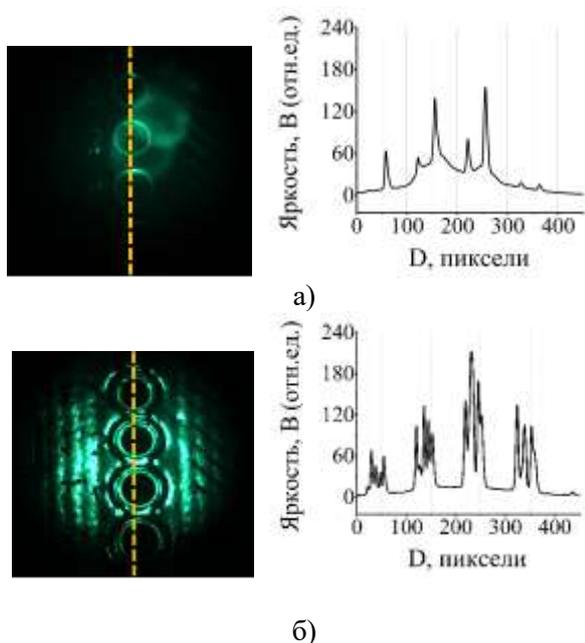


Рисунок 4 – Визуализация тестового объекта (печатной платы) в моностатической (а) и бистатической (б) схемах лазерного монитора

Чтобы оценить джиттер импульсов тока через ГРТ1 и ГРТ2 использовались два идентичных токовых датчика Pearson Current Monitors 8450. На рисунке 5 приводится пример осциллограмм импульсов тока через ГРТ

источника подсветки (ИП) и через ГРТ усилителя яркости (УЯ), полученных в режиме однократной регистрации (Single). Осциллограммы зарегистрированы при фиксированной временной задержке между импульсами управления – видно, что время сдвига (t_c) между импульсами тока меняется от 193 нс до 169 нс, следовательно джиттер в данном случае составляет 24 нс. При выборке из 200 осциллограмм среднее значение джиттер составило 25 нс. Осциллограммы, на которых джиттер существенно превышал указанную цифру, составили не более 24% от общего числа осциллограмм. Джиттер определялся по полувысоте импульсов тока.

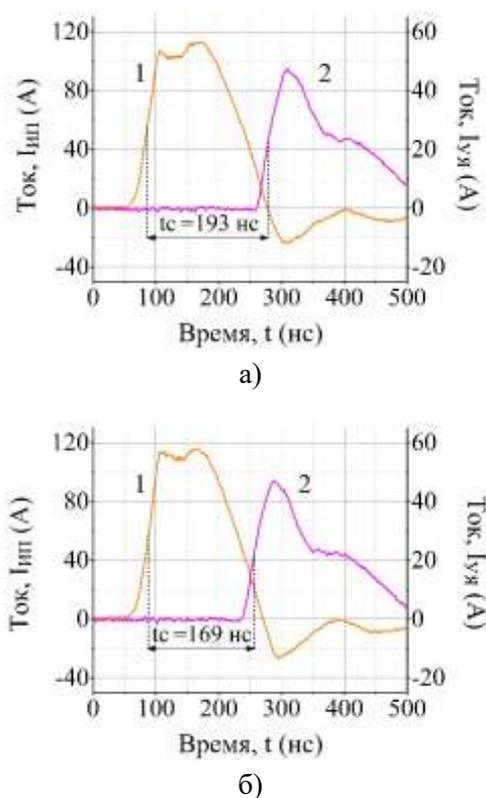
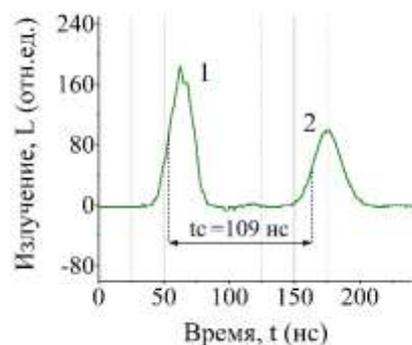


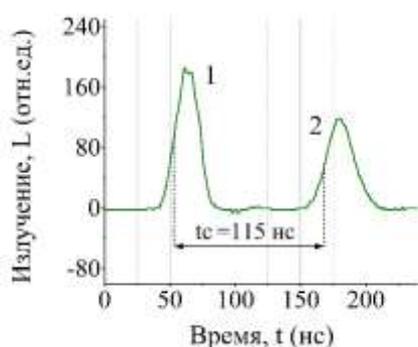
Рисунок 5 – Джиттер между импульсами тока через ГРТ активных элементов при использовании полупроводникового и тиратронного источника накачки: 1 – ток через ГРТ источника подсветки; 2 – ток через ГРТ усилителя яркости.

Принципиальное значение имеет джиттер импульсов излучения. Для его определения был использован коаксиальный фотоэлемент (ФЭК-14К), на вход которого одновременно направлялось как вынужденно излучение задающего генератора, так и усиленное спонтанное излучение усилителя мощности. При выборке из 100 осциллограмм максимальный джиттер импульсов излучения составил 16 нс,

причем такой джиттер был зафиксирован лишь в 9% случаев от общего числа осциллограмм. Среднее же значение джиттера в данном случае составило приблизительно 6 нс. Осциллограммы регистрировались в однократном режиме (Single). Пример осциллограмм излучения источника подсветки и усилителя яркости представлен на рисунке 6.



а)

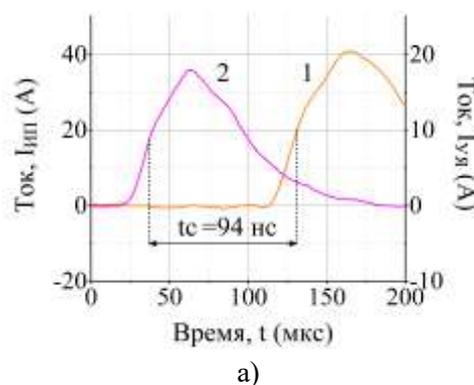


б)

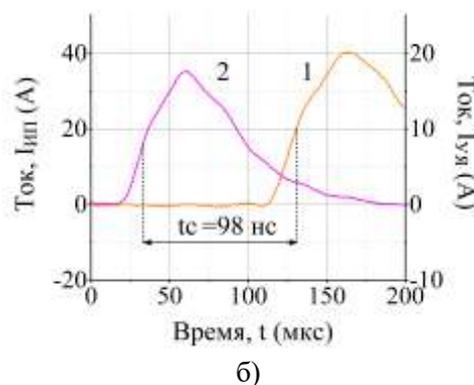
Рисунок 6 – Джиттер между импульсом излучения источника подсветки (1) и импульсом излучения усилителя яркости (2)

Полученные результаты плохо согласуются с приведенными выше (рисунок 5), поскольку джиттер импульсов тока возбуждения существенно выше, однако следует отметить два фактора, которыми, вероятно, обусловлено такое расхождение. Во-первых, при регистрации импульсов тока через ГРТ использовалось два независимых датчика, подключенных к двум разным каналам осциллографа, в связи с чем могло иметь место увеличение джиттера, обусловленное техническими аспектами регистрации сигналов и прорисовки их осциллограмм. Во-вторых, как было отмечено ранее, импульсы излучения регистрировались одним прибором, следовательно, временное рассогласование между импульсами излучения в этом случае отображается более корректно.

Отдельный интерес представлял случай, когда для возбуждения каждого активного элемента использовались полупроводниковые источники накачки. На рисунке 7 представлены осциллограммы тока через ГРТ источника подсветки (ИП) и через ГРТ усилителя яркости (УЯ), зарегистрированные в однократном режиме (Single). При анализе осциллограмм было установлено, что джиттер импульсов тока не превышает 4 нс. Следует подчеркнуть, что 4 нс – максимальное значение, на которое импульс тока ГРТ усилителя отклонился относительно импульса тока ГРТ задающего генератора, который был выбран в качестве опорного сигнала. Однако, это не означает, что джиттер наблюдается между импульсами тока регулярно – в большинстве случаев джиттер отсутствовал полностью.



а)



б)

Рисунок 7 – Джиттер между импульсами тока через ГРТ активных элементов при использовании полупроводниковых источников накачки: 1 – ток через ГРТ источника подсветки; 2 – ток через ГРТ усилителя яркости.

Таким образом, использование полупроводниковых источников накачки для активных элементов бистатического лазерного монитора наиболее предпочтительно с точки зрения синхронизации их режимов работы. Однако, на практике возникает вопрос низкого энергозатрата: наибольшее значение

вкладываемой мощности при полупроводниковой накачке составило около 465 Вт – такой мощности оказалось достаточно, чтобы реализовать малогабаритный усилитель яркости ($l = 40$ см, $d = 2,5$ см, $V = 196$ см³), но недостаточно для накачки источника подсветки ($l = 90$ см, $d = 5$ см, $V = 1767$ см³).

Заключение

Разработаны полупроводниковые источники накачки для активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов на основе 10 типовых ячеек, содержащих транзисторный ключ и накопительный конденсатор. В качестве полупроводниковых ключей были апробированы транзисторы IRG4PH50UD, IPA W60R280, SPW17N80C3 и HGTG27N120BN. Наилучший результат был получен при использовании транзисторов HGTG27N120BN. Накопительные конденсаторы емкостью 3,3 нФ заряжались до напряжения 1090 В, что достигалось за счет схемы удвоения напряжения питания и диодно-резонансного заряда. При использовании обострительного конденсатора 330 пФ амплитуда тока составила 51 А. При появлении излучения амплитуда тока через ГРТ постепенно снижается. Наибольшая мощность излучения в режиме генератора (с плоскопараллельным резонатором) составила 665 мВт, ток через ГРТ снизился при этом до 40 А.

Доказано, что разработанный полупроводниковый источник накачки может быть использован на практике для накачки усилителя яркости с заданными геометрическими параметрами ($l = 40$ см, $d = 2,5$ см, $V = 196$ см³) для формирования усиленных по яркости изображений в моностатической схеме лазерного монитора. Выполнена синхронизация разработанного источника с традиционным источником питания на основе тиратрона.

Использование двух датчиков Pearson Current Monitors 8450 позволило установить, что средний джиттер импульсов тока через ГРТ не превышает 25 нс. Оценка джиттера импульсов излучения осуществлялась с помощью одного коаксиального фотоэлемента (ФЭК-22), на которой поочередно направлялись импульсы источника подсветки и усилителя яркости. Средний джиттер импульсов излучения составил 6 нс – полученный результат кажется более корректным, поскольку оба сигнала регистрировались одним и тем же прибором.

Также была выполнена синхронизация двух идентичных полупроводниковых источников накачки. Джиттер импульсов тока не превышал 4 нс, а в большинстве случаев отсутствовал полностью.

Мощность разработанного источника оказалось недостаточной для накачки источника подсветки ($l = 90$ см, $d = 5$ см, $V = 1767$ см³). Увеличить мощность можно за счет увеличения количества коммутационных ячеек, однако это не самое целесообразное решение с точки зрения масса-габаритных параметров устройства. Другой вариант заключается в увеличении емкости накопительного конденсатора, что позволит увеличить импульсный энерговыход. Третий вариант – это увеличение коэффициента трансформации. Предложенные варианты требуют тщательной проработки, поскольку изменение параметров зарядно-разрядного контура (емкости и индуктивности) могут оказать различное влияние на работу источника в целом.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-79-10096 - П.

Разработка активного элемента выполнена в рамках базового бюджета финансирования, проект FWRU-2021-0006 (121040200025-7).

Литература

- 1 Evtushenko G.S. Methods and Instruments for Visual and Optical Diagnostics of Objects and Fast Processes. – Nova Science Publishers Inc., 2018. – 184 p.
- 2 Vuchkov N., Temelkov K. New High-Power Metal Halide Vapour Lasers: Gas-Discharge Plasma Physics and Lasers' Applications. – Australia, Adelaide, University of Adelaide. – 2015. 194 p.
- 3 Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М.: Научная книга / под ред. Батенина В.М. – 2011. 544 с.
- 4 Yu.N. Saraev, M.V. Trigub, N.A. Vasnev. Copper bromide vapor laser for imaging of drip-transfer processes in electric arc welding // The 14th International Conference on pulsed lasers and laser applications – «AMPL-2019»: Abstracts. Tomsk: STT Publishing House, 2019. – P. 104-105.
- 5 Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Тригуб М.В., Перовская М.В. Методика исследований характеристик тепломассопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом с видео регистрацией изображений в условиях

лазерного когерентного излучения // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2018. – Том 5. – № 1-2. – С. 20-25.

6 Li L., Mostovshchikov A.V.A.V., Ilyin A.P.A.P., Smirnov A., Gubarev F.A.F.A. Optical System with Brightness Amplification for Monitoring the Combustion of Aluminum-Based Nanopowders // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69, № 2. – P. 457–468.

7 Li L., Ilyin A.P.P., Gubarev F.A.A., Mostovshchikov A.V. V., Klenovskii M.S.S. Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor // Ceramics International. – 2018. – Vol. 46, № 16. – P. 19800–19808.

8 Trigub M.V., Platonov V.V., Osipov V.V., Evtushenko T.G., Evtushenko G.S. Laser monitors for high speed imaging of materials modification and production // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 486–490.

9 Osipov V.V., Evtushenko G.S., Platonov V.V., Thikhonov E.V., Kremenetskii M.V., Vasnev N.A., Gembukh P.I., Trigub M.V. High-speed video recording of liquid melt spraying during ablation of the Y2O3 target using a fiber ytterbium laser // 2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022 – Proceedings.

10 Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyonov D.V., Bushuev E.V., Bolshakov A.P., Zemskov K.I., Savransky V.V., Ralchenko V.G., Konov V.I. Laser monitor for imaging single crystal diamond growth in H2-CH4 microwave plasma // Optics and Laser Technology. – 2019. – Vol. 120. – Art.No 105716.

11 Рыбка Д.В., Тригуб М.В., Сорокин Д.А., Евтушенко Г.С., Тарасенко В.Ф. Особенности коронного разряда в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения // Оптика Атмосферы и Оксана. – 2014. – Т. 27, № 04. – P. 306–310.

12 AOS Technologies AG [Электронный ресурс]. <https://www.aostechnologies.com/>, свободный доступ. – Дата обращения: 27.09.2022.

13 Mega Speed [Электронный ресурс]. <https://www.aostechnologies.com/>, свободный доступ. – Дата обращения: 27.09.2022.

14 Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г. Проекционная система с усилителем яркости и автономным источником освещения // Известия академии наук СССР. Сер. Физ. – 1982. – Т. 46, № 10. – С. 1898–1904.

15 Исаков Б.К., Калугин М.М., Парфенов Е.Н., Потапов С.Н. Исследование усиления в активных средах на переходах атомов меди и марганца применительно к созданию проекционных систем с усилителями яркости изображения // МТФ. – 1983. – Т. 33, № 4. – С. 704–714.

16 Тригуб М.В., Васнев Н.А., Евтушенко Г.С., Димаки В.А., Троицкий В.О. Бистатический лазерный монитор // Патент на изобретение № 2755256. Дата государственной регистрации 14.09.2021. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

17 Trigub M. V., Vasnev N.A., Kitler V.D., Evtushenko G.S. The Use of a Bistatic Laser Monitor for High-Speed Imaging of Combustion Processes // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2021. – Vol. 34, № 2. – P. 154–159.

18 Vasnev N.A., Trigub M.V., Evtushenko G.S. Features of Operation of a Brightness Amplifier on Copper Bromide Vapors in the Bistatic Scheme of a Laser Monitor // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2019. – V. 32, № 4. – P. 483–489.

19 Васнев Н.А., Тригуб М.В. Определение области зрения и пространственного разрешения в бистатической схеме лазерного монитора // Современные материалы и технологии новых поколений: Сборник научных трудов II Международного молодежного конгресса. Под ред. А.Н. Яковлева; – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2019. – С. 268–269.

20 Lima S.M., Behrouzinia S., Salem M.K., Elahei M., Khorasani K., Dorrnian D. // Optical and Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 49(11). – Art.No 372.

21 Webb C.E., Jones J.D.C. Handbook of Laser Technology: Applications. – IoP Publishing, 2004. – 1180 p.

22 Васнев Н.А., Тригуб М.В., Димаки В.А., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О., Власов В.В. Патент на полезную модель № 185671. Название: Высоковольтный модулятор. Приоритет 09.10.18. Дата государственной регистрации: 13.12.18. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).

23 Moshkunov S.I., Khomich V.Yu., Yamshchikov V.A. Elongation of the pulse duration of ArF laser with a solid-state pump generator // Quantum Electronics. – 2011. – Vol. 41, No. 4. – P.366-369.

24 Jiang W. Solid-State LTD Module Using Power MOSFETs // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2010. – Vol. 38, No 10. – P.2730-2733.

25 Татур В.В., Выборнов П.В. Патент на изобретение №2269850. Название: Схема возбуждения лазеров на парах металлов. Дата государственной регистрации: 10.08.04. Правообладатель: ИМКЭС СО РАН (RU).

26 Суханов В.Б., Татур В.В. Эксплуатационные характеристики CuBr-лазера с транзисторным коммутатором // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, – № 02. – P. 108–110.

References

1 G.S. Evtushenko, Methods and Instruments for Visual and Optical Diagnostics of Objects and Fast Processes, (Nova Science Publishers Inc., 2018), 184 p.

2 N. Vuchkov, K. Temelkov, New High-Power Metal Halide Vapour Lasers: Gas-Discharge Plasma Physics and Lasers' Applications, (Australia, Adelaide, University of Adelaide, 2015), 194 p.

- 3 V.M. Batenin, V.V. Buchanov, et.al., *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov*, (Moscow, Nauchnaya kniga, pod red. V.M. Batenina, 2011), 544 s. (in Russ.)
- 4 Yu.N. Saraev, M.V. Trigub, N.A. Vasnev. Copper bromide vapor laser for imaging of drip–transfer processes in electric arc welding // *The 14th International Conference on pulsed lasers and laser applications – «AMPL-2019»: Abstracts*. Tomsk: STT Publishing House, 104-105 (2019).
- 5 YU.N. Sarayev, A.G. Lunev, et al., *Aktual'nyye problemy v mashinostroyenii*, 5 (1-2), 20-25 (2018). (in Russ.)
- 6 L. Li, A.V. Mostovshchikov et al., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69 (2), 457–468 (202).
- 7 L. Li, A.P.P. Ilyin, et.al., *Ceramics International*, 46 (16), 19800–19808 (2018).
- 8 M.V. Trigub, V.V. Platonov, et.al., *Vacuum*, 143, 486–490 (2017).
- 9 V.V. Osipov, G.S. Evtushenko, et.al., High-speed video recording of liquid melt spraying during ablation of the Y2O3 target using a fiber ytterbium laser, *2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022, Proceedings*.
- 10 G.S. Evtushenko, S.N. Torgaev, et.al., *Optics and Laser Technology*, 120, 105716 (2019).
- 11 D.V. Rybka, M.V. Trigub, et.al., *Optika Atmosfery i Okeana*, 27 (04), 306–310 (2014). (in Russ.)
- 12 AOS Technologies AG [Electronic resource]. <https://www.aostechnologies.com/>, Free access, Date of the application: 27.09.2022.
- 13 Mega Speed [Electronic resource]. <https://www.aostechnologies.com> Free access. Date of the application: 27.09.2022.
- 14 M.A. Kazaryan, V.M. Matveyev, G.G. Petrash *Izvestiya akademii nauk SSSR. Ser. Fiz.*, 46 (10), 1898–1904 (1982). (in Russ.)
- 15 B.K. Isakov, M.M. Kalugin, *MTF*, 33 (4), 704–714 (1983). (in Russ.)
- 16 M.V. Trigub, N.A. Vasnev, et.al., *Bistaticheskii lazernyy monitor*. Patent na izobreneniye № 2755256. Data gosudarstvennoy registratsii 14.09.2021. Pravoobladatel': IOA SO RAN (RU). (in Russ.)
- 17 M.V. Trigub, N.A. Vasnev, et.al., *Atmospheric and Oceanic Optics*, 34 (2), 154–159 (2021).
- 18 N.A. Vasnev, M.V. Trigub, G.S. Evtushenko, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 32 (4), 483–489 (2019).
- 19 N.A. Vasnev, M.V. Trigub, *Opredeleniye oblasti zreniya i prostranstvennogo razresheniya v bistaticheskoy skheme lazernogo monitora // Sovremennyye materialy i tekhnologii novykh pokoleniy: Sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnogo molodezhnogo kongressa*. Pod red. A.N. Yakovleva; – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 268–269 (2019).
- 20 S.M. Lima, S. Behrouzina, et.al., *Optical and Quantum Electronics*, 49(11), 372 (2017).
- 21 C.E. Webb, J.D.C. Jones, *Handbook of Laser Technology: Applications*, (IoP Publ., 2004), 1180 p.
- 22 M.V. Trigub, N.A. Vasnev, et.al., Patent na poleznuyu model' № 185671. Nazvaniye: Vysokovol'tnyy modulyator. Prioritet 09.10.18. Data gosudarstvennoy registratsii: 13.12.18. Pravoobladatel': IOA SO RAN (RU). (in Russ)
- 23 S.I. Moshkunov, V.Yu. Khomich, V.A. Yamshchikov, *Quantum Electronics*, 41 (4), 366-369 (2011).
- 24 W. Jiang, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38 (10), 2730-2733 (2010).
- 25 V.V. Tatur, P.V. Vybornov, Patent na izobreneniye №2269850. Nazvaniye: Skhema возбуждениya lazerov na parakh metallov. Data gosudarstvennoy registratsii: 10.08.04. Pravoobladatel': IMKES SO RAN (RU). (in Russ.)
- 26 V.B. Sukhanov, V.V. Tatur, *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 312 (02), 108–110 (2008). (in Russ.)