

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи



Маслова Юлия Ярославовна

**Оптическая система импульсно-периодического
лазерно-электронного источника
рентгеновского излучения для медицинских
применений**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Горбунков Михаил Валериевич (ФИАН)

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор
Виноградов Александр Владимирович (ФИАН)

Официальные

оппоненты: доктор физико-математических наук
Романовский Михаил Юрьевич (ФАНО России),
доктор физико-математических наук
Скобелев Игорь Юрьевич (ОИВТ РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (г. Белгород)

Защита состоится «29» февраля 2016 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН, расположенном по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 53. С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru.

Автореферат разослан « » января 2016 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по вышеуказанному адресу.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук



М.А. Казарян

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Работа посвящена оптической части томсоновского лазерно-электронного источника рентгеновского излучения (ЛЭИРИ), который призван заполнить разрыв, существующий между рентгеновскими трубками и синхротронными источниками по ряду параметров. В частности, предложенное решение позволяет упростить проведение ангиографии — распространенного метода диагностики, основанного на получении рентгеновского изображения сосудов, питающих сердце. По данным Всемирной организации здравоохранения, сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смерти среди неинфекционных заболеваний [1], и диагностика их крайне важна для своевременного лечения. В настоящее время проведение ангиографического обследования фактически является операцией и существуют риски, связанные с катетеризацией артерии и высокими концентрациями контрастных веществ.

Метод разностных изображений, который позволяет избавиться от указанных недостатков, был предложен еще в 1953 году. Он использует особенность поглощения йода: в области 33 кэВ имеется скачок, в то время как поглощение тканей организма меняется незначительно (рис. 1).

Получая два изображения на двух длинах волн по обе стороны от скачка, с последующим вычитанием, можно заметно увеличить контраст. В конце прошлого века несколькими группами были выполнены исследования по реализации разностной ангиографии с использованием синхротронного излучения. Было показано, что концентрацию контрастного вещества можно снизить в 40 раз и перейти от катетеризации артерии к внутривенному введению. Времена экспозиции, необходимые для исключения смазывания изображений в процессе физиологического движения, в экспериментах с синхротронным излучением не превышали 5 мс, количество рентгеновских фотонов

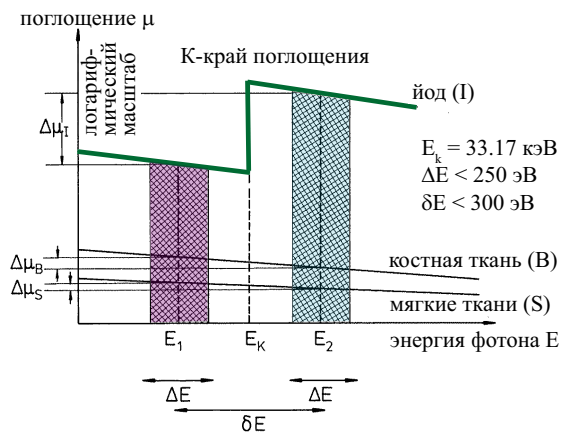


Рис. 1. Спектры поглощения йода и тканей организма в рентгеновском диапазоне вблизи 33 кэВ. [2].

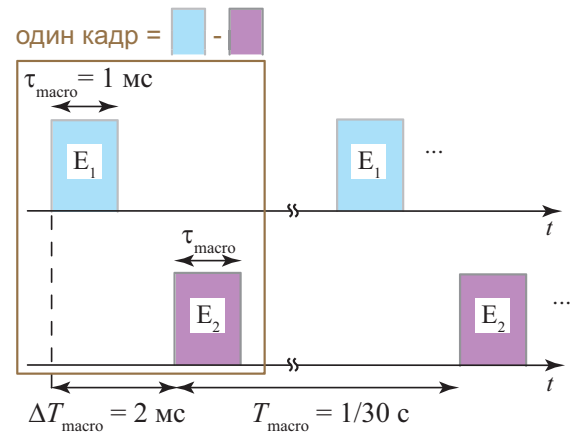


Рис. 2. Временная структура излучения импульсно-периодического источника для разностной ангиографии.

для формирования одного кадра — $5 \cdot 10^{11}$.

Возможность распространения метода разностной ангиографии в клинической практике возникнет только с созданием новых источников рентгеновского излучения, которые унаследуют от рентгеновских трубок компактность, а от синхротронных источников — яркость (высокий уровень потока рентгеновских фотонов, в узком пространственном угле и спектральном интервале). В последние годы в мировом научном сообществе наблюдается устойчивый интерес к ЛЭИРИ [3]. Процесс, положенный в основу этих источников, заключается в рассеянии мощных лазерных импульсов на сгустках релятивистских электронов. Количество рентгеновских фотонов на выходе пропорционально количеству электронов в сгустке и фотонов в импульсе и обратно пропорционально площади взаимодействия. Поскольку сечение рассеяния для данного процесса мало, с целью повышения эффективности большое внимание уделяется формированию пучков в области взаимодействия. Лазерный и электронный пучок должны быть сфокусированы в пятна, не превышающие десятков микрон. Чтобы взаимодействие проходило в области фокусировки, длительность лазерного импульса и электронного сгустка не должна превышать десятков

пикосекунд.

Для обеспечения многократного использования электронных сгустков в ускорительной части источника применяют накопительные кольца. Оптическая схема в большинстве случаев основана на пикосекундном квазинепрерывном лазере и высокодобротном оптическом резонаторе, накапливающем лазерное излучение. Однако требуемая для разностной ангиографии величина потока рентгеновских фотонов оказывается малореалистичной даже для самых современных квазинепрерывных ЛЭИРИ. В работе предложено рассмотреть предпочтительный для покадровой съемки импульсно-периодический режим работы рентгеновского источника. Особое внимание уделено оптическому циркулятору (оптический резонатор с устройством для быстрого ввода и вывода излучения — оптическим ключом) и необходимой для его использования временной структуре излучения задающего генератора.

Для съемки каждого кадра в режиме реального времени излучение задающего генератора оптической части должно быть сформировано в виде воспроизводимой последовательности пикосекундных импульсов равной мощности на двух длинах волн (рис. 2). Общая длительность последовательности равна времени экспозиции. Осуществление такого режима генерации возможно в импульсно-периодических твердотельных лазерах с обратной связью, традиционно используемой для устранения пикового режима [4]. Однако требуется проверка возможности управления генерацией лазера за счет обратной связи на миллисекундных масштабах.

Следующий шаг на пути повышения эффективности работы оптической системы связан с организацией временной структуры излучения в виде периодических пульсаций (микроцугов коротких импульсов), период следования которых определяется исходя из времени жизни лазерного импульса в циркуляторе. Для получения режимов пульсаций с периодами, намного превышающими время обхода светом резонатора, необходимо разработать новые

методы управления временной структурой лазерного излучения. Развитие этой области открывает новые возможности для решения других прикладных задач.

Цели и задачи диссертационной работы

1. Создание оптической схемы импульсно-периодического лазерно-электронного генератора рентгеновского излучения для покадровой съемки с выходом $5 \cdot 10^{11}$ фотонов в одной вспышке.
2. Разработка схемы оптического циркулятора для многократного (10^2 и более) использования лазерных импульсов.
3. Определение условий формирования временной структуры излучения задающего генератора оптической части в виде последовательности цугов коротких импульсов, где импульсы следуют с периодом, существенно превышающим время обхода светом резонатора.
4. Практическая реализация Nd:YAG лазера с оптоэлектронным управлением и временной структурой выходного излучения в виде миллисекундных последовательностей коротких импульсов, следующих с большим (микросекундным) периодом.

Научная новизна определяется следующими полученными впервые результатами:

1. Предложен способ реализации разностной ангиографии с использованием импульсно-периодического ЛЭИРИ.
2. Разработаны схемы и выбраны перспективные нелинейные кристаллы для двух типов оптических циркуляторов: ВВО для циркулятора с электрооптическим ключом и ЛВО для пассивного циркулятора, основанного на внутррезонаторной генерации второй гармоники.

3. Исследована нелинейная динамика лазера, охваченного комбинацией положительной и отрицательной обратных связей. Определены условия генерации излучения в виде регулярной структуры с характерным периодом от единиц до сотен времен обхода светом резонатора.
4. Реализована лазерная система, позволяющая генерировать последовательность цугов пикосекундных импульсов с заданным периодом субмикро- и микросекундного диапазона.
5. Предложена система управления лазерным излучением, способная реализовать нелинейную динамику, соответствующую динамике логистического отображения, с характерным временем, равным времени обхода светом резонатора.

Практическая значимость

1. Оптическая система, разработанная для импульсно-периодического режима работы и созданный прототип задающего генератора открывают путь к использованию ЛЭИРИ для медицинских применений.
2. Предложенные оптические циркуляторы могут быть использованы в рентгеновских источниках, предназначенных для исследования быстропротекающих процессов, в том числе в ЛЭИРИ, основанных на линейных ускорителях в мультибанчевом режиме.
3. Способ формирования лазерного излучения в виде последовательностей коротких импульсов с периодом от единиц до сотен времен обхода светом лазерного резонатора может быть применен для разработки новых лазерных систем специального назначения.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Схемное решение оптической системы, включающее:
 - а) импульсно-периодический режим работы;
 - б) две лазерные системы, работающие на близких длинах волн;
 - в) временную структуру излучения в виде миллисекундных цугов пикосекундных импульсов, следующих с микросекундным интервалом;
 - г) кольцевой четырехзеркальный циркулятор с активным (на основе кристалла ВВО) или пассивным оптическим ключом (на основе генерации второй гармоники в кристалле LBO),позволяет создать импульсно-периодический ЛЭИРИ для разностной ангиографии вблизи К-края поглощения йода.
2. Использование в системе оптоэлектронной обратной связи лазера излучения, отраженного от внутрирезонаторного поляризатора электрооптического модулятора (управление от поляризатора), приводит к управлению, соответствующему комбинации положительной и задержанной на время обхода светом резонатора отрицательной обратной связи; выбор относительной чувствительности осуществляется изменением напряжения смещения модулятора.
3. Управление от поляризатора и использование модулятора на основе кристалла танталата лития приводит к развитию динамики в виде регулярных пульсаций с плавно регулируемым периодом, который растет с уменьшением напряжения смещения электрооптического модулятора, периоды следования цугов коротких импульсов, пригодные для практического применения, лежат в диапазоне 30–75 обходов резонатора.
4. Резонансное самовозбуждение высших мод сдвиговых акустических колебаний в кристалле DKDP электрооптического модулятора при управлении от поляризатора приводит к развитию динамики в виде регуляр-

ных пульсаций с дискретно варьируемым (за счет выбора номера моды колебаний) периодом следования в субмикро- и микросекундном диапазонах.

5. В режиме синхронизации мод дополнение инерционной отрицательной обратной связи задержанной положительной и подбор чувствительности, необходимой для компенсации действия отрицательной обратной связи по истечении времени относительной задержки, позволяет реализовать:

а) динамику генерации, соответствующую логистическому отображению при относительной задержке, равной одному времени обхода светом резонатора;

б) режим высокочастотных пульсаций с периодами 3 и 4 времени обхода светом резонатора с использованием задержки на два прохода.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в публикациях в специализированных рецензируемых научных журналах, докладывались автором на семинарах ФИАН, а также на российских и международных конференциях, среди которых:

1. Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine-2007, July 8-19, 2007, Prague, Czech Republic.
2. 16th Annual Conference of Doctoral Students — WDS 2007, June 5–8, 2007, Prague, Czech Republic.
3. Национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования наноматериалов и наносистем (РЧНЭ-2007), 12–17 ноября 2007 г., Москва, Россия.
4. Compton Sources for X/gamma Rays: Physics and Applications, September 7–12, 2008, Alghero, Sardinia, Italy.
5. XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, September 20–23, 2008, Vilnius, Lithuania.

6. 9th Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interaction with Electromagnetic Radiation, April 13–14, 2011, Moscow, Russia.
7. 5-я Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, 26–29 апреля, 2011 г., Саров, Россия.
8. Оптика-2013, г. Санкт-Петербург, Россия.
9. NOMA'13 Workshop (International Workshop on Nonlinear Maps and their Applications). 3–4 September, 2013, Zaragoza, Spain.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 7 статей в рецензируемых журналах [A1–A7], 15 статей в сборниках трудов конференций, 8 тезисов докладов, один препринт и один пресс-релиз.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Объем диссертации составляет 192 страницы машинописного текста, включая 104 рисунка. Список цитированной литературы состоит из 147 наименований.

Содержание работы

Во Введении обоснована необходимость разработки оптической системы ЛЭИРИ для медицинских применений, что определяет актуальность работы, является ее целью и несет в себе научную новизну. Показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В п. 1.1 первой главы обсуждается современный метод диагностики состояния сосудов сердца — коронарной ангиографии. Он основан на использовании в качестве источника излучения рентгеновской трубки и связан с определенными рисками для пациента из-за необходимости артериального ввода контрастного вещества. Упростить проведение ангиографического обследования позволяет принцип разностной ангиографии. Он был реализован в экспериментах на основе синхротронного излучения, которые позволили определить требования к рентгеновскому излучению. Использование нового источника рентгеновского излучения — ЛЭИРИ — позволит распространить метод разностной ангиографии в широкую медицинскую практику на уровне клиник (**п. 1.2**). В **п. 1.3** приведен обзор литературы по существующим проектам ЛЭИРИ. В **п. 1.4** приведены выводы по главе 1, последний параграф каждой главы содержит выводы по главам.

В п. 2.1 второй главы показано, что для задач разностной ангиографии в случае использования квазинепрерывного рентгеновского источника потребовался бы поток не менее 5×10^{14} фотонов в секунду. Такая величина недостижима для самых современных проектов ЛЭИРИ, претендующих на рекордный выход фотонов. Оптическая схема этих источников основана на квазинепрерывном пикосекундном лазере и высокодобротном оптическом резонаторе. В случае применения рентгеновского излучения в медицине и биологии необходима покадровая съёмка с частотой повторения 25–30 Гц и характерным временем экспозиции, не превышающим временной масштаб внутренних движений исследуемых объектов (~ 1 мс). Эти требования к временной структуре излучения позволили по-новому взглянуть на архитектуру ЛЭИРИ, а именно перейти к импульсно-периодическому режиму работы и не менее чем на порядок повысить мощность рассеиваемого на релятивистских электронах излучения во время формирования кадра. В **п. 2.2** показано, что для создания импульсно-периодического источника целесообразно перейти от

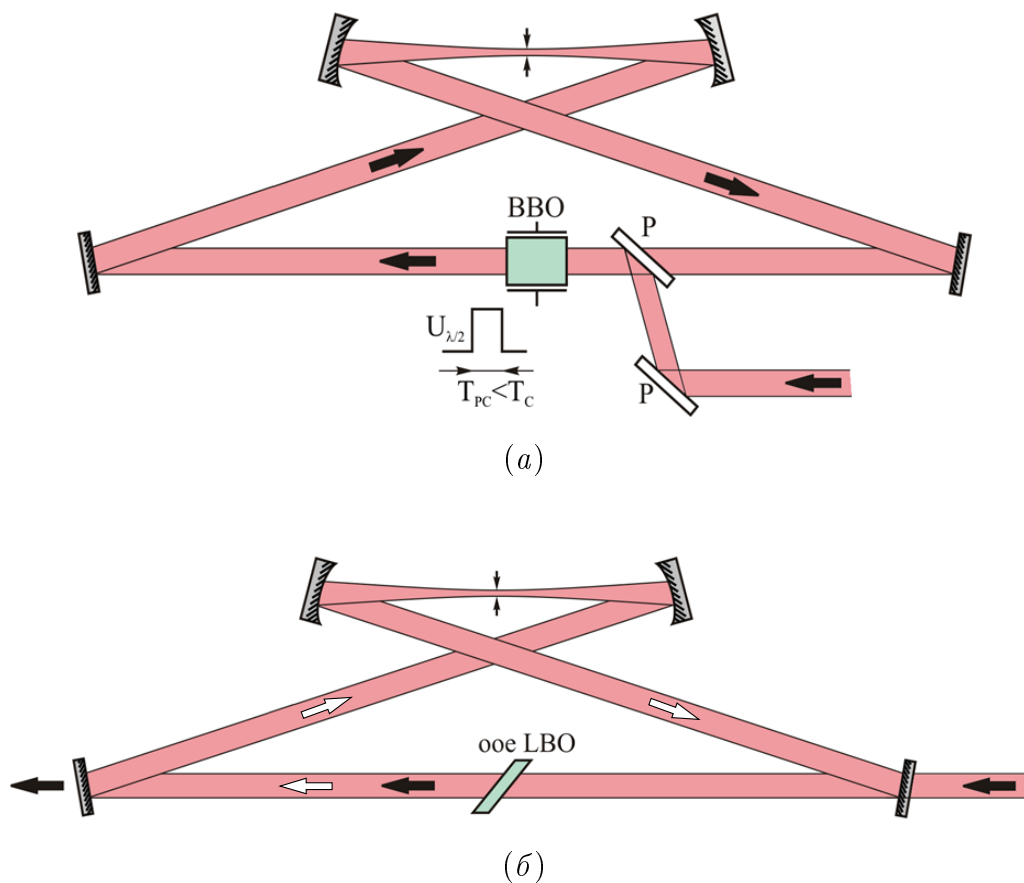


Рис. 3. Схемы кольцевых оптических циркуляторов для импульсно-периодического ЛЭИ-РИ: (а) — циркулятор с электрооптическим ключом (длительность импульса управляющего напряжения T_{PC} не превышает время обхода циркулятора T_C), (б) — циркулятор, основанный на внутрирезонаторной генерации второй гармоники.

накопления лазерного излучения в высокодобротном оптическом резонаторе к многократному использованию каждого импульса в оптическом циркуляторе. Для увеличения эффективности циркулятора за счет уменьшения потерь в оптическом ключе предложено использовать кольцевую четырехзеркальную схему. В пп. 2.4–2.5 выбраны перспективные нелинейные кристаллы для двух типов оптических циркуляторов: ВВО для циркулятора с электрооптическим ключом (рис. 3, а; 4) и LBO для пассивного циркулятора, основанного на внутрирезонаторной генерации второй гармоники (рис. 3, б и 18). Показано, что наибольшего выигрыша (~ 200) можно достичь при использовании пассивного циркулятора.

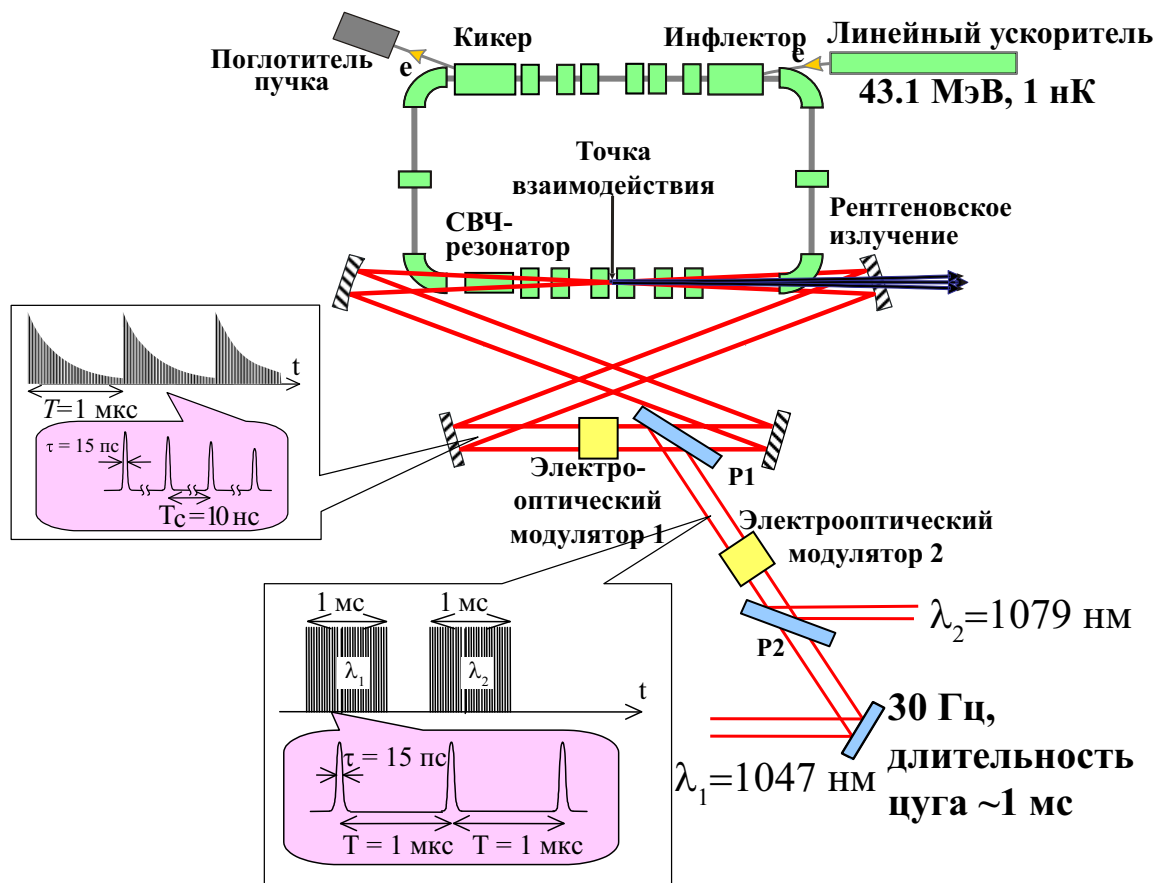


Рис. 4. Схема импульсно-периодического ЛЭИРИ для разностной ангиографии вблизи К-края поглощения йода. Оптический циркулятор с электрооптическим ключом. P1, P2 — поляризаторы.

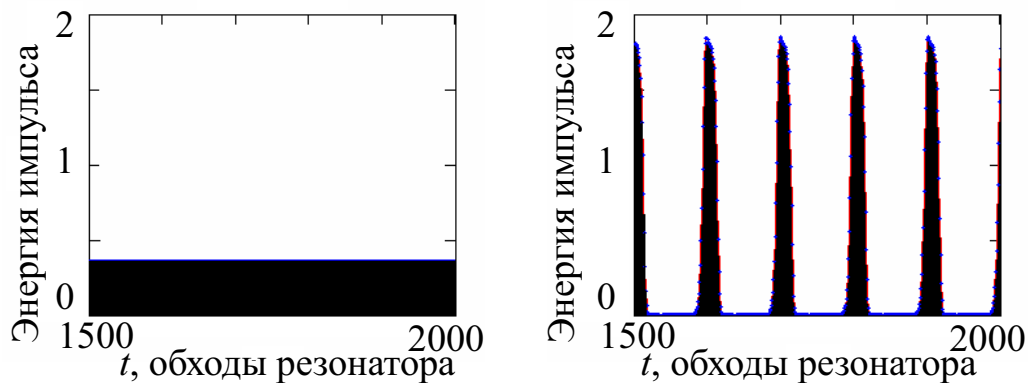


Рис. 5. Режимы генерации последовательности импульсов с одинаковой амплитудой и микропугов импульсов с большим периодом. Средняя мощность излучения на обоих рисунках одинакова, максимальная отличается более чем в 5 раз (отдельные импульсы не разрешаются).

В п. 2.6 предложено для накачки циркулятора использовать лазерное излучение с временной структурой в виде миллисекундных последовательностей пикосекундных импульсов, следующих с микросекундным интервалом (рис. 4,18), а в задающем генераторе — режим пульсаций (рис. 5).

В третьей главе показано, что требуемый режим работы задающего генератора оптической системы ЛЭИРИ реализуется за счет применения комбинации положительной и отрицательной обратных связей. Свойства систем, управляемых обратными связями, исследовались на основе точечных отображений. Дискретное отображение вида $x_{n+1} = rx_n f(x_n, x_{n-1} \dots)$ связывает нормированную энергию x короткого лазерного импульса на обходе с номером $(n + 1)$ с энергией на предыдущих обходах через обобщенное (с учетом потерь) усиление r , а функция f соответствует действию обратной связи или комбинации обратных связей. Индекс n соответствует дискретно изменяемому времени, нормированному на время обхода светом резонатора T_r . Для имеющих практическое значение сценариев управления, во временной динамике последовательности $\{x_n\}$, при выбранном постоянном r , можно выделить характерные этапы. Последовательность $\{x_n\}$ сходится к постоянному ненулевому значению, если $r \in (1, r_2)$, где r_2 — верхняя граница области устойчивости. При $r > r_2$ зависимость $\{x_n\}$ от n приобретает периодический характер. Дальнейшее увеличение r приводит к хаотизации динамики, а при еще больших усилениях последовательность расходится. В п. 3.1 приведен обзор результатов исследований по управлению динамикой лазера с помощью обратных связей. П. 3.2 посвящен исследованию нелинейной динамики отображений, соответствующих управлению с помощью одной отрицательной обратной связи. Получены характерные периоды нелинейной динамики для безынерционной и инерционной связей, задержанных на время одного и более обходов светом резонатора. К увеличению периода приводит как увеличение задержки, так и увеличение инерционности (коэффициент затухания

$\gamma = e^{-T_r/RC}$, где RC — временная постоянная цепи обратной связи).

Переход к комбинации обратных связей позволяет расширить возможности управления динамикой. Приведенный в п. 3.3 анализ точечных отображений позволил найти параметры двух обратных связей (их задержки и относительную чувствительность), при которых период регулярной — периодической — динамики лежит в диапазоне десятков–сотен времен обхода светом резонатора (см., н-р, рис. 6, а). Рассмотрено точечное отображение вида

$$x_{n+1} = rx_n(1 - \alpha x_n - x_{n-1}), \quad (1)$$

в котором сценарий управления соответствует двум безынерционным обратным связям, где одна действует с минимальной задержкой, а вторая задержана на одно время обхода светом резонатора. Переход α в область отрицательных значений (положительная связь опережает отрицательную) приводит к неограниченному росту периода (рис. 6, б).

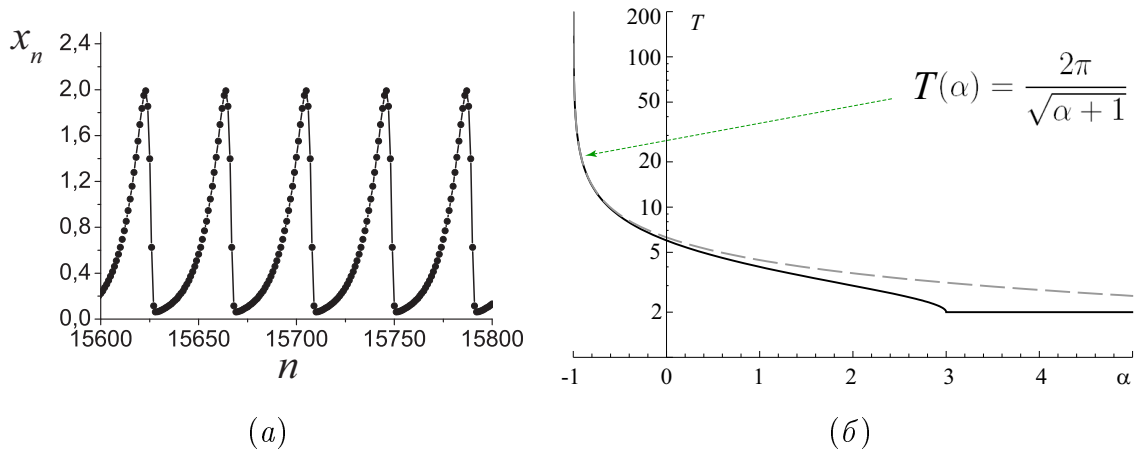


Рис. 6. Отображение (1): (а) — динамика последовательности x_n при относительной чувствительности обратных связей $\alpha = -0.9$, (б) — зависимость периода регулярной динамики на границе области устойчивости от относительной чувствительности.

Четвертая глава посвящена экспериментальной реализации задающего генератора оптической системы ЛЭИРИ. Для осуществления режима генерации микроцугов с регулируемым периодом следования в п. 4.1.1 предложе-

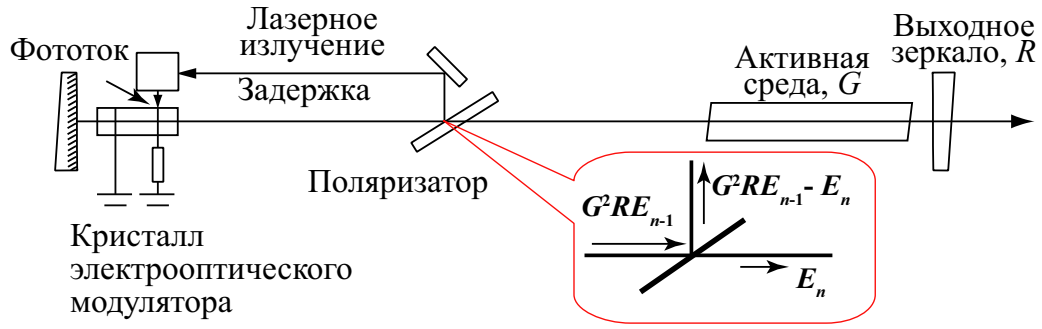


Рис. 7. Схема лазера с обратной связью на основе отраженного от внутрирезонаторного поляризатора сигнала. Энергия импульса, отраженного в цепь обратной связи, равна разности падающего сигнала и прошедшего. G — усиление активной среды, R — коэффициент отражения выходного зеркала, E_n — энергия импульса на обходе с номером n .

на схема, в которой излучение для управления генерацией подается от поляризатора внутрирезонаторного электрооптического модулятора (рис. 7). Показано, что такая система управления соответствует комбинации двух обратных связей, в которой отрицательная обратная связь задержана относительно положительной на один обход светом резонатора. Предложенный способ обеспечивает уникальную возможность перестройки периода следования микропугов изменением напряжения смещения внутрирезонаторного электрооптического модулятора. Увеличение периода осуществляется при уменьшении напряжения смещения U_0 . В пределе малых U_0 получена аналитическая оценка уровня усиления, необходимого для развития гармонической модуляции огибающей (границы области устойчивости):

$$r_2(U_0) \approx 1 + \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{U_0}{U_{\lambda/4}} \right)^2 \quad (2)$$

и соответствующего периода модуляции:

$$T(U_0) \approx 2T_r \sqrt{\frac{2\pi U_{\lambda/4}}{U_0}}. \quad (3)$$

В качестве прототипа задающего генератора для ЛЭИРИ создан Nd:YAG лазер с ламповой миллисекундной накачкой, в котором синхронизация мод

осуществляется за счет оптоэлектронного управления (рис. 8, п. 4.1.2). Эксперименты проводились с двумя типами электрооптических модуляторов. Использовался способ управления “от поляризатора”. Активным элементом служил стержень Nd:YAG ($\varnothing 6.3 \times 60$ мм), помещенный в термостатированный квантрон К-104 Г. Резонатор был образован двумя плоскими зеркалами с коэффициентами отражения 0.98 и 0.35 на клиновидных подложках и имел длину ~ 150 см, время обхода $T_r = 10$ нс.

Зеркальный телескоп с коэффициентом увеличения 3:1 состоял из двух сферических зеркал с радиусами кривизны 100 и 300 мм. Для селекции нижней поперечной моды резонатора в резонатор была установлена ирисовая диафрагма с рабочим диаметром 3 мм. Использование телескопа позволило увеличить объем моды в активном элементе, повысить выходную мощность и уменьшить влияние насыщения активной среды в процессе генерации, управляемой системой отрицательной обратной связи. Кроме того, с помощью телескопа диаметр лазерного луча в кристалле внутрирезонаторного электрооптического модулятора был уменьшен до < 400 мкм (ширина на половине высоты по интенсивности).

Режим самосинхронизации мод осуществлялся за счет выбора задержки в цепи оптоэлектронной отрицательной обратной связи. Задержка устанавливалась так, чтобы потери электрооптического модулятора во время прохода лазерного импульса были минимальны. Используемая схема позволяла генерировать в Nd:YAG лазере короткие импульсы длительностью менее 200 пс [5].

В п. 4.1.3 и 4.1.4 приведены результаты экспериментов, выполненных с использованием низковольтного двухсекционного электрооптического модулятора на основе танталата лития. Двухсекционный модулятор был изготовлен из двух кристаллов танталата лития по термокомпенсированной схеме $3 \times 3 \times 15$ мм³ (поперечный электрооптический эффект, $U_{\lambda/4} \sim 200$ В на

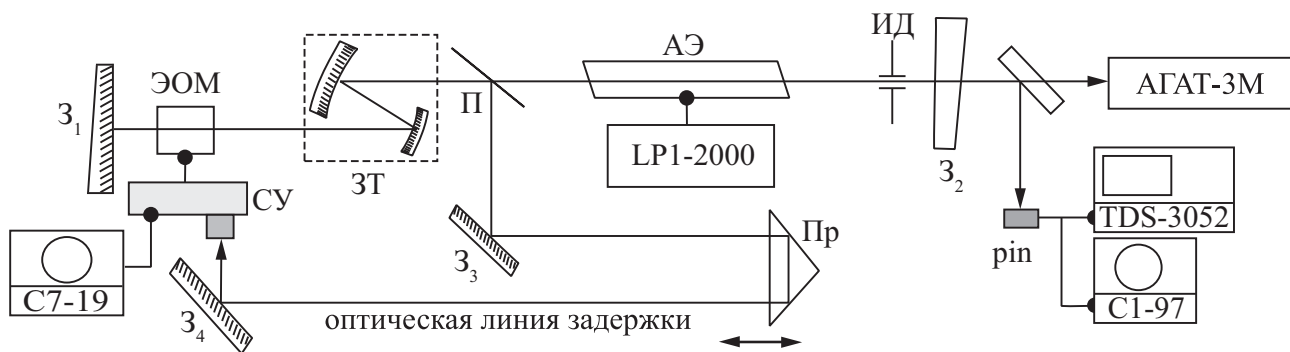


Рис. 8. Миллисекундный Nd:YAG лазер с ламповой накачкой. АЭ — Nd:YAG активный элемент; П — поляризатор; З₁, З₂ — зеркала резонатора; З₃, З₄ — зеркала оптической задержки; Пр — призма; ИД — ирисовая диафрагма; ЗТ зеркальный телескоп; ЭОМ — электрооптический кристалл внутрирезонаторного модулятора (танталат лития или DKDP); СУ — оптоэлектронная управляющая схема.

Таблица 1. Период развитых пульсаций в зависимости от напряжения смещения модулятора U_0 .

U_0 , В	120	110	100	90	80	70	60	50	45	40	22.5	10
T , мкс	0.30	0.31	0.32	0.33	0.38	0.43	0.48	0.49	0.52	0.62	0.91	1.7

длине волны $\lambda = 1.064$ мкм). Модулятор был смонтирован непосредственно на плате управляющей схемы, расположенной вблизи глухого зеркала резонатора. Были получены гладкие цуги импульсов длительностью до 3.9 мс. Картина генерации менялась как за счет изменения напряжения, так и уровня накачки (рис. 9). При превышении порогового уровня накачки развивался режим регулярных пульсаций (микроцугов коротких импульсов).

В п. 4.1.3 представлены результаты исследований зависимости периода гармонической модуляции огибающей коротких импульсов от напряжения смещения модулятора (рис. 10). Полученные зависимости находятся в согласии с результатами численного моделирования. В п. 4.1.4 приведены экспериментальные результаты по генерации развитых пульсаций — регулярных мик-

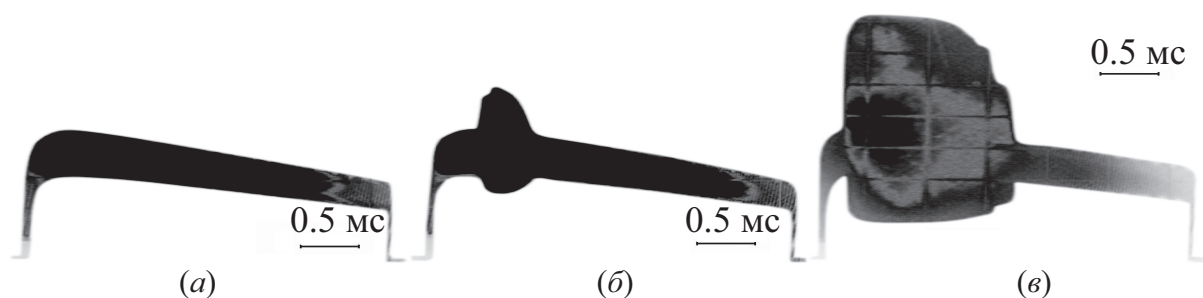


Рис. 9. Обзорная картина развития пульсаций излучения с ростом усиления ((*b*) на 7%, (*c*) на 13% по сравнению с (*a*)), запоминающий низкочастотный осциллограф С8-14. Вертикальный масштаб одинаков. Цуг коротких импульсов отображается в виде узкой темной полосы, режим микроцугов — в виде широкой.

роцугов коротких импульсов. Период следования микроцугов плавно варьируется напряжением смещения и уровнем накачки (табл. 1, рис. 11). Сделан вывод, что периоды следования микроцугов коротких импульсов, пригодные для практического применения, лежат в диапазоне 25–70 обходов резонатора. Для реализации регулярной динамики с периодом 1 мкс в данной системе требуется увеличение времени обхода резонатора до 15–25 нс. Увеличение периода следования с увеличением усиления в пределах области регулярной нелинейной динамики зависит от периода, но не превышает 20%.

Для увеличения периода пульсаций в **п. 4.2** предложен альтернативный способ генерации регулярных пульсаций за счет самовозбуждения сдвиговых акустических колебаний в кристалле электрооптического модулятора. В **п. 4.2.1** на основе анализа литературных источников рассмотрено влияние возбуждения основной моды сдвиговых акустических колебаний в внутрирезонаторном кристалле DKDP на динамику твердотельного лазера. **П. 4.2.2** посвящен анализу публикаций, по резонансному возбуждению сдвиговых колебаний на высших акустических модах в кристаллах с выраженным вторичным электрооптическим эффектом. В **п. 4.2.3** с помощью привлечения анализа точечных отображений показано, что внесение внешней гармонической модуля-

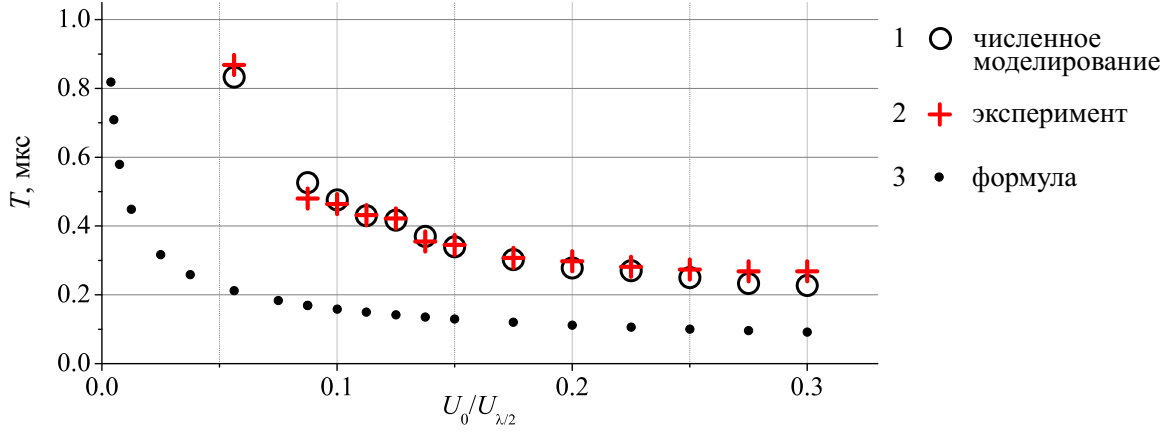


Рис. 10. Период гармонической модуляции T в зависимости от напряжения смещения U_0 : 1 — расчет в программе LaserIV (для $RC = 4T_r$), 2 — экспериментальные данные, 3 — расчет по формуле (3) для безынерционных связей. Напряжение смещения U_0 нормировано на полуволновое напряжение модулятора.

ции в систему, управляемую выбранной ранее комбинацией обратных связей, проявляется в следующем: а) даже незначительная глубина модуляции в области частот, близких к частотам, задаваемым комбинацией обратных связей, позволяет эффективно “раскачивать” режим синхронизированных с внешним устройством пульсаций, причем порог возникновения пульсаций снижается; б) внешняя модуляция меняет временной ход отдельных пульсаций; в) при увеличении усиления отчетливо проявляется бифуркация удвоения периода.

Результаты экспериментов по генерации последовательностей цугов коротких импульсов с дискретно изменяемым периодом за счет самовозбуждения высших сдвиговых акустических мод в кристалле DKDP приведены в **п. 4.2.4**. Использовался модулятор размером $8 \times 8 \times 11 \text{ мм}^3$ (продольный электрооптический эффект, $U_{\lambda/4} = 3.4 \text{ кВ}$ при $\lambda = 1.064 \text{ мкм}$). Применение телескопа (рис. 8) позволило осуществить переключение между режимами за счет выбора положения лазерного луча в сечении кристалла DKDP, соответствующего пучности стоячей акустической волны (рис. 12). Резонансные

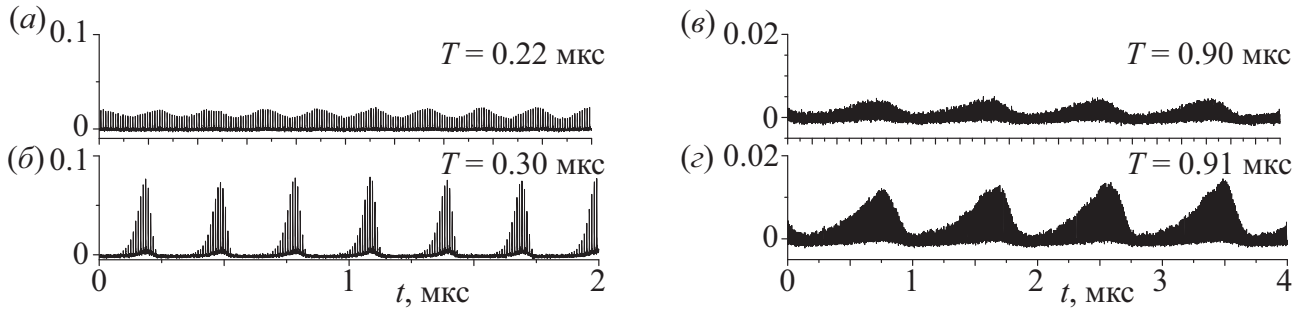


Рис. 11. Осциллограммы выходного излучения лазера, управляемого внутрирезонаторным модулятором на основе танталата лития (цифровой осциллограф Tektronix TDS-3052): (а), (б) — действующее напряжение смещения модулятора $U_0 = 120$ В, (в), (г) $U_0 = 22.5$ В; (а), (в) — начало развития пульсаций; (б), (г) — развитые пульсации при большей мощности накачки. T — период регулярной динамики.

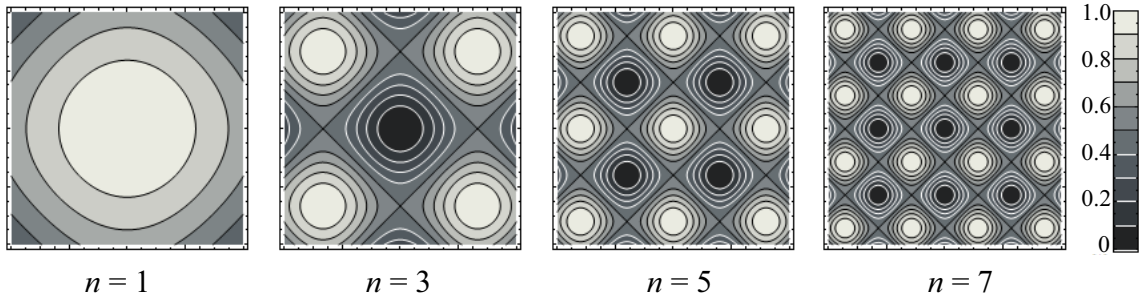


Рис. 12. Пропускание электрооптического модулятора в поперечном сечении кристалла в условиях резонансного возбуждения четырех первых мод сдвиговых акустических колебаний в кристалле квадратного сечения. n — номер моды, см. формулу (4). Оптимальное положение лазерного пучка в сечении кристалла соответствует пучности колебаний.

частоты колебаний рассчитываются по формуле

$$f_n = n \frac{v}{2d} \left(1 + \frac{8}{\pi^2 n^2} - \frac{16}{\pi^4 n^4} \right)^{0.5} \quad (4)$$

где $n = 1, 3, 5, \dots, 2k - 1$, k — целое число, $v = 1.64 \times 10^5$ см/с — скорость сдвиговых волн в кристалле, $d = 8$ мм — сторона квадратного сечения кристалла. Экспериментально реализовано селективное возбуждение пульсаций на девяти сдвиговых модах в диапазоне периодов 8–0.5 мкс (табл. 2). Наиболее близким к решению поставленной задачи является режим генерации

Таблица 2. Рассчитанный по формуле (4) период акустических сдвиговых мод в кристалле модулятора и полученный экспериментально период регулярных пульсаций, мкс. Экспериментальная погрешность измерения периода составляла ± 10 нс.

Номер моды	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
Расчет	7.60	3.12	1.92	1.38	1.08	0.88	0.75	0.65	0.57	0.51
Эксперимент	7.78	3.27	1.89	1.37	1.09	0.89	0.76	—	0.58	0.52

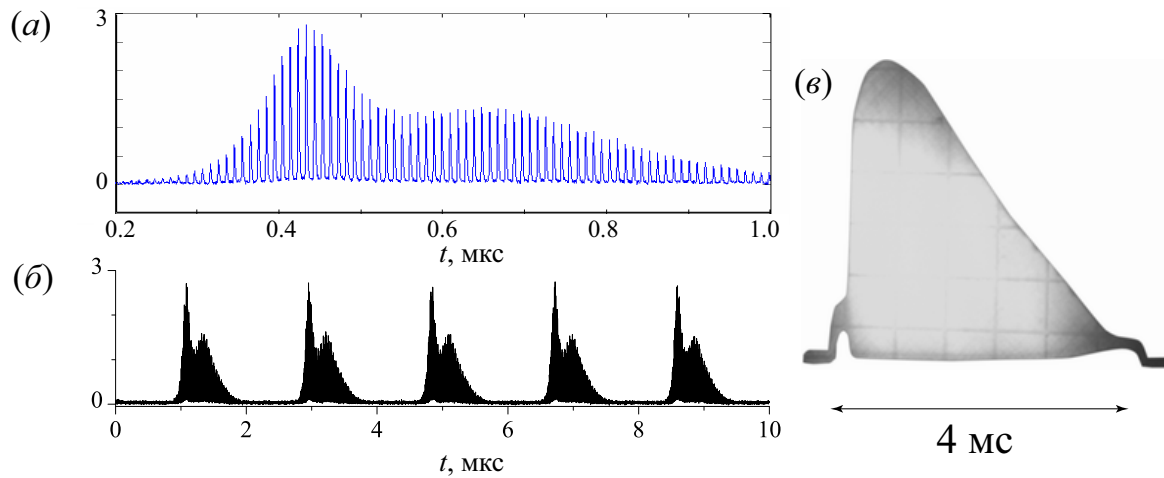


Рис. 13. Режим регулярных пульсаций с периодом 1.9 мкс: (а) — тонкая временная структура одной пульсации, (б) — цуги пульсаций (цифровой осциллограф Tektronix TDS-3052), (в) — обзорная осциллограмма (низкочастотный запоминающий осциллограф С8-14).

регулярных пульсаций с периодом 1.9 мкс (рис. 13). Период следования регулярных пульсаций практически не зависит от уровня усиления. Требуемый период в данной системе может быть реализован за счет выбора размеров кристалла.

П. 4.3 посвящен сравнительному анализу сценариев хаотизации динамики при использовании модуляторов на основе танталата лития и DKDP. Показано, что дискретные отображения качественно отражают особенности нелинейной динамики (рис. 14). Переход к хаотическому режиму пульсаций

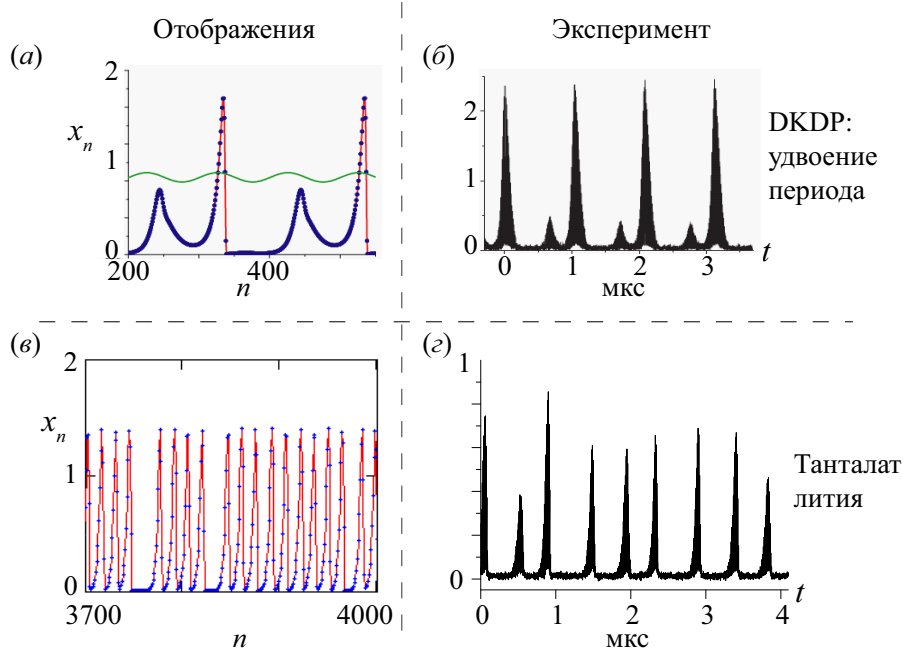


Рис. 14. Динамика дискретных отображений с комбинацией положительной и отрицательной обратных связей ((a) — с дополнительной гармонической модуляцией потерь, (в) — без модуляции) и экспериментально наблюдаемый в микросекундном временном диапазоне ход генерации лазеров с двумя типами модуляторов ((б) — модулятор на основе DKDP, (г) — на основе танталата лития). Характерные графики представлены для качественного сравнения, усиление составляло единицы-десятки процентов над порогом генерации.

при увеличении усиления осуществляется через удвоение периода в случае самовозбуждения сдвиговых акустических колебаний. В случае использования электрооптического модулятора на основе кристалла, не обладающего выраженным вторичным электрооптическим эффектом (танталат лития), в системе проявляется поведение, близкое к режиму с наличием хаотического аттрактора шильниковского типа (хаотическим образом меняется не только амплитуда, но и интервал между пульсациями).

Пятая глава посвящена численному моделированию динамики твердотельного лазера, охваченного цепями обратных связей, с учетом тонкой временной структуры излучения (временное разрешение < 0.5 пс). Использовал-

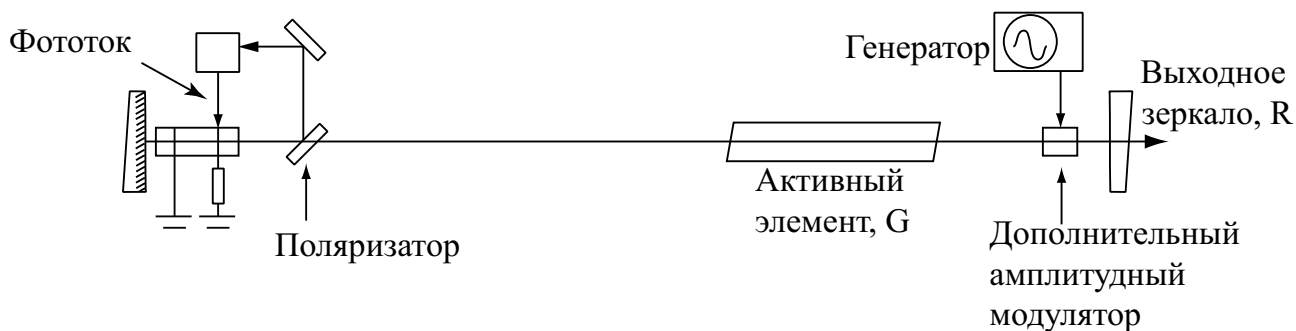


Рис. 15. Схема лазера с оптоэлектронным управлением от внутрирезонаторного поляризатора и дополнительной высокочастотной модуляцией.

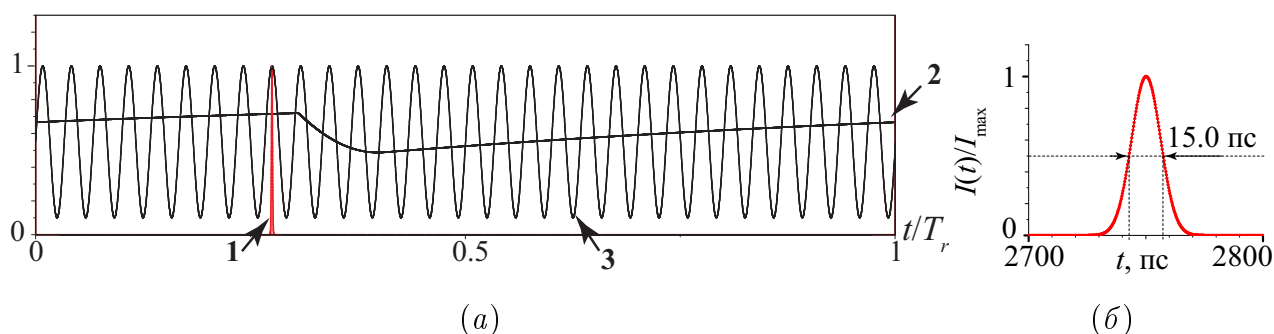


Рис. 16. Режим высокочастотной модуляции: (а) — временная структура излучения за один обход светом резонатора (1 — интенсивность, 2 — пропускание электрооптического модулятора, 3 — пропускание дополнительного модулятора, управляемого внешним генератором), (б) — пикосекундный лазерный импульс длительностью 15 пс. Результаты численного моделирования в программе LaserIV.

ся программный комплекс LaserIV¹. В п. 5.1 рассмотрена схема управления задающим генератором, обеспечивающая генерацию синхронизированных с электронными сгустками импульсов с длительностью, необходимой для эффективной генерации рентгеновских фотонов. П. 5.1.1 посвящен проблеме генерации импульсов пикосекундной длительности. Показано, что сочетание быстрой отрицательной обратной связи и высокочастотной (кратной обратному времени обхода, $f = N \cdot 1/T_r$) модуляции внутрирезонаторных потерь при достаточно больших N позволяет получить одиночные на аксиальном

¹ Программный комплекс LaserIV для моделирования динамики лазера, управляемого комбинациями обратных связей, разработан Ю.В. Шабалиным в Лаборатории фотоники молекул ОКРФ ФИАН.

интервале пикосекундные импульсы, синхронизированные с внешним генератором. Приводятся результаты расчетов, выполненных для Nd:YLF, Nd:YAP лазеров, охваченных цепью отрицательной обратной связи с управлением от поляризатора. Схема лазера представлена на рис. 15. Высокочастотная модуляция соответствовала используемой в ускорительном комплексе частоте 3 ГГц ($N = 30$). В численном эксперименте доказана возможность генерации импульсов длительностью 15 пс как в режиме гладких цугов (п. 5.1.2), так и в режиме пульсаций (п. 5.1.3, рис. 16). Без применения высокочастотной модуляции (самосинхронизация осуществляется только за счет оптоэлектронной обратной связи) длительность короткого импульса составляет ~ 85 пс.

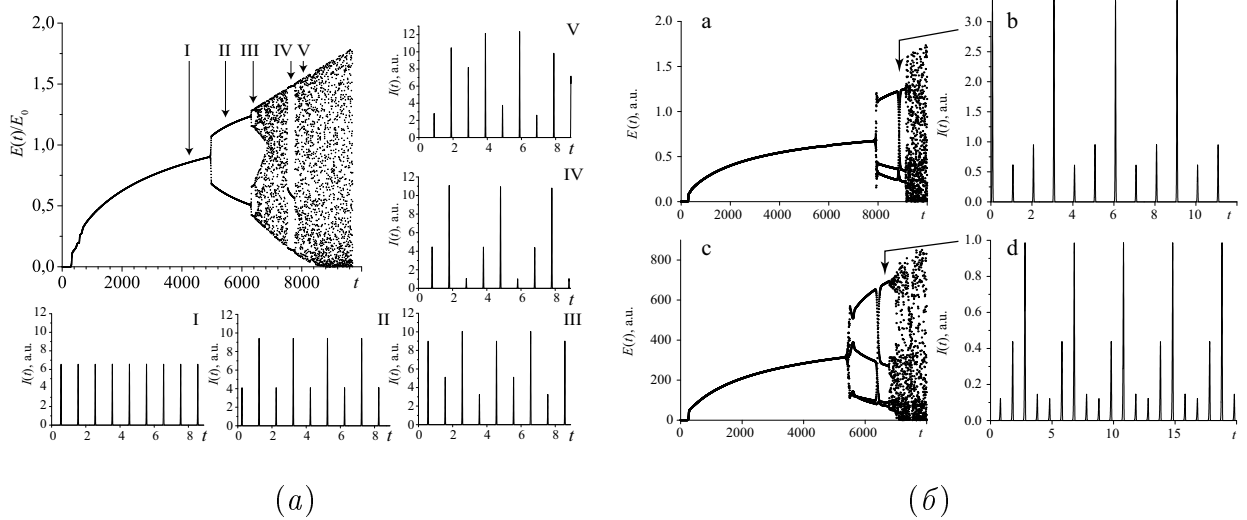


Рис. 17. Режимы с характерными временами порядка нескольких обходов светом резонатора: (а) — динамика логистического отображения, (б) — регулярные пульсации с периодами 3 и 4. E — энергия лазерного импульса при линейном росте усиления, время t нормировано на время обхода светом резонатора T_r . На вставках I-V и b, d приведена интенсивность излучения I на временах порядка T_r . Результаты численного моделирования в программе LaserIV.

Кроме того, применение комбинации положительной и отрицательной обратных связей позволяет организовать нелинейную динамику в диапазоне единиц обходов светом резонатора (п. 5.2). Отображение, соответствующее

управлению с помощью положительной и отрицательной инерционных связей, записывается в общем виде как

$$x_{n+1} = rx_n \left(1 - \overbrace{\sum_{m=i}^n x_{n-m} \gamma^{m-i}}^{\text{отрицательная}} + \alpha \overbrace{\sum_{m=j}^n x_{n-m} \gamma^{m-j}}^{\text{положительная}} \right), \quad (5)$$

где относительная задержка положительной обратной связи равна $(j-i)T_r$. Если $\alpha = \gamma^{j-i}$, то при $i = 0, j-i = 1$ сценарий управления сводится к логистическому отображению с одной безынерционной связью: $x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$, в котором реализуется каскад удвоений периода на масштабе одного обхода светом резонатора (рис. 17, а, п. 5.2.1). При $i = 0, j-i = 2$ отображение (5) сокращается до соотношения $x_{n+1} = rx_n(1 - x_n - \gamma x_{n-1})$, для которого характерна динамика в виде пульсаций с периодами 3 и 4 времени обхода светом резонатора (рис. 17, б, п. 5.2.2). Результаты моделирования с помощью программного комплекса LaserIV подтвердили, что указанные режимы могут быть реализованы в твердотельном лазере с оптоэлектронным управлением.

В Заключение приведена схема импульсно-периодического лазерно-электронного рентгеновского генератора, учитывающая новые подходы, разработанные для создания оптической системы (рис. 18), а также сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Разработана схема оптического модуля лазерно-электронного источника рентгеновского излучения для покадровой разностной съемки живых объектов вблизи скачка поглощения йода. Она включает а) две лазерные системы, работающие на близких длинах волн с использованием временной структуры излучения в виде миллисекундных цугов пикосекундных импульсов, следующих с микросекундным интервалом; б) кольцевой четырехзеркальный циркулятор с активным (на основе кристалла ВВО) или пассивным оптическим ключом (на основе генерации второй гармоники в кристалле LBO).

2. Методом анализа точечных отображений показано, что в отличие от режима управления с помощью одной инерционной отрицательной обратной связи, переход к комбинации положительной и отрицательной обратных связей позволяет расширить диапазон периодов регулярной нелинейной динамики твердотельных лазеров с оптоэлектронным управлением как в сторону высокочастотных пульсаций с периодом в несколько обходов светом резонатора T_r , так и в область низких частот с характерным временем в десятки–сотни T_r .
3. Для управления, соответствующего комбинации положительной и задержанной на T_r отрицательной обратной связи, предложено использовать одну систему отрицательной оптоэлектронной обратной связи, использующую отраженное от поляризатора внутрирезонаторного электрооптического модулятора излучение. При этом положительная обратная связь опережает отрицательную на один обход светом резонатора, а относительная чувствительность регулируется напряжением смещения модулятора.
4. Экспериментально изучена нелинейная динамика Nd:YAG лазера с оптоэлектронным управлением и использованием в цепи обратной связи сигнала, отраженного от внутрирезонаторного поляризатора. Использование модулятора на основе кристалла танталата лития приводит к развитию нелинейной динамики в виде регулярных пульсаций с плавно регулируемым периодом, который растет с уменьшением управляющего напряжения электрооптического модулятора. Максимальный период регулярных пульсаций составил 90 обходов светом резонатора, период пульсаций в пригодных для практических применений режимов — 30–75 обходов резонатора. Резонансное самовозбуждение высших мод сдвиговых акустических колебаний в кристалле DKDP электрооптического

модулятора приводит к развитию нелинейной динамики в виде регулярных пульсаций с дискретно варьируемым (за счет выбора номера моды колебаний) периодом следования в микро- и субмикросекундном диапазоне.

5. В случае использования внутрирезонаторного модулятора на основе кристалла DKDP, обладающего выраженным вторичным электрооптическим эффектом, хаотизация регулярной последовательности микропугов осуществляется через удвоение периода. В случае электрооптического модулятора на основе кристалла танталата лития, увеличение усиления приводит к нелинейной динамике, характеризующейся хаотическим аттрактором шильниковского типа, для которой характерно хаотическое изменение как амплитуды, так и периода следования пульсаций.
6. Комбинация инерционных отрицательной и задержанной положительной обратных связей позволяет за счет выбора относительной чувствительности, необходимой для компенсации действия отрицательной обратной связи по истечении времени относительной задержки, реализовать: а) при относительной задержке T_r динамику, соответствующую логистическому отображению на масштабе T_r ; б) режим высокочастотных пульсаций с периодами $3-4T_r$ с использованием задержки на $2T_r$.

В Приложениях А-Г представлены применявшиеся численные и аналитические методы анализа нелинейной динамики отображений, на примере двумерного отображения проведен вывод формулы для периода гармонической модуляции огибающей, представлены фрагменты фазопараметрических диаграмм двумерного точечного отображения для 32 значений параметра (относительной чувствительности обратных связей), дано описание программного комплекса LaserIV.

Список публикаций

- [A1] *И.А. Артюков, Е.Г. Бессонов, А.В. Виноградов, ... Ю.Я. Маслова и др.* Лазерно-электронный генератор рентгеновского излучения // *Поверхность*. — 2007. — Т. 8. — С. 3–11.
- [A2] *E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, B.S. Ishkhanov, ... Yu.Ya. Maslova et al.* Laser-electron generator for X-ray applications in science and technology // *Laser and Particle Beams*. — 2008. — Vol. 26, no. 03. — Pp. 489–495.
- [A3] *M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, A.V. Vinogradov.* Optical unit of Laser-Electron X-ray Generator designed for medical applications // *Nuclear Instruments and Methods A*. — 2009. — Vol. 608. — Pp. S32–S35.
- [A4] *M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, V.A. Petukhov et al.* Submicrosecond regular and chaotic nonlinear dynamics in a pulsed picosecond Nd:YAG laser with millisecond pumping // *Applied Optics*. — 2009. — Vol. 48, no. 12. — Pp. 2267–2274.
- [A5] *E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova et al.* Design study of compact Thomson X-ray sources for material and life sciences applications // *Journal of Instrumentation*. — 2009. — Vol. 4, P07017. — Pp. 1–14.
- [A6] *М.В. Горбунков, Ю.Я. Маслова, О.И. Чабан, Ю.В. Шабалин.* Каскад удвоений периода и детерминированный хаос в лазере с самосинхронизацией мод за счет комбинации инерционных отрицательной и положительной обратных связей // *КСФ ФИАН*. — 2009. — Т. 5. — С. 39–48.
- [A7] *М.В. Горбунков, Ю.Я. Маслова, Ю.В. Шабалин.* Генерация регулярной последовательности микроцугов пикосекундных импульсов с дискретно

варьируемым периодом следования // *КСФ ФИАН*. — 2009. — Т. 9. — С. 29–39.

Цитированная литература

- [1] Доклад о ситуации в области неинфекционных заболеваний в мире // *Всемирная организация здравоохранения*. — 2014. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/148114/6/WHO_NMH_NVI_15.1_rus.pdf?ua=1.
- [2] *T. Dill, W.-R. Dix, C.W. Hamm et al.* Intravenous coronary angiography with synchrotron radiation // *European Journal of Physics*. — 1998. — Vol. 19, no. 6. — Pp. 499–511.
- [3] *M. Jacquet.* High intensity compact Compton X-ray sources: Challenges and potential of applications // *NIM B*. — 2014. — Vol. 331. — P. 1–5.
- [4] *F.R. Marshall, D.L. Roberts.* Use of Electro-Optical Shutters to Stabilize Ruby Laser Operation // *Proceedings of the IRE*. — 1962. — October. — P. 2108.
- [5] *М.В. Горбунков, Ю.В. Шабалин.* Пикосекундный ИАГ:Nd³⁺ лазер с самовозбуждением гигагерцовых колебаний в системе оптоэлектронной отрицательной обратной связи // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. — 1998. — Т. 8. — С. 43–50.

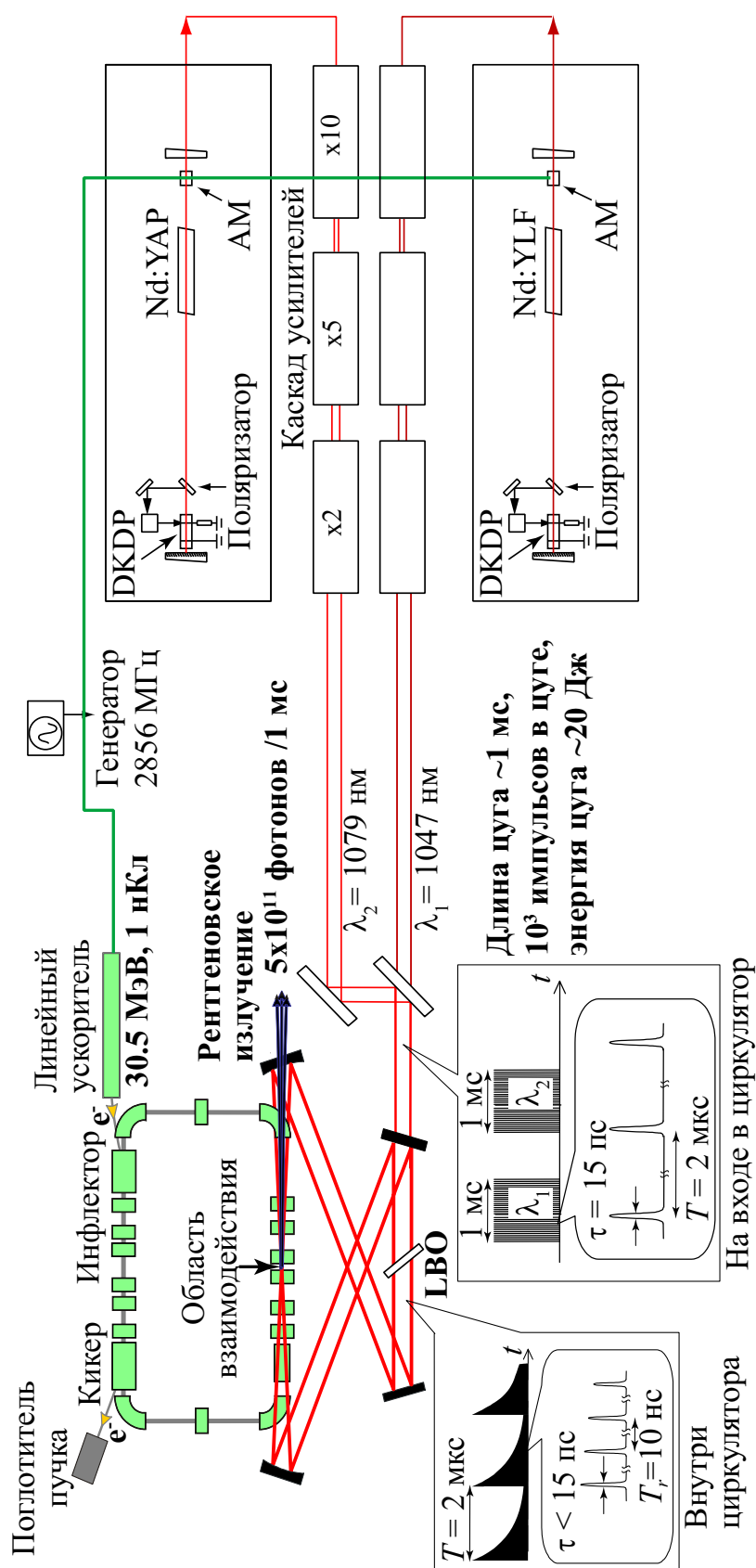


Рис. 18. Схема импульсно-периодического лазерно-электронного рентгеновского генератора с циркулятором на основе генерации второй гармоники. АМ — амплитудный модулятор, управляемый сигналом из ускорительной системы.