

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и инновационной
деятельности НИУ «БелГУ», д.т.н.



И.С. Константинов

» февраль 2016 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу Масловой Юлии Ярославовны «Оптическая система импульсно-периодического лазерно-электронного источника рентгеновского излучения для медицинских применений», представленную на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Разработка новых источников рентгеновского излучения является одной из наиболее актуальных задач, интерес к которым за последние несколько десятков лет только возрастает ввиду востребованности данного вида излучения для решения множества прикладных задач. К настоящему времени образовался значительный пробел в области лабораторных источников рентгеновского излучения, по своим характеристикам занимающих нишу между рентгеновскими трубками и синхротронами. Необходимо, чтобы новый источник имел квазимонохроматический спектр, обладал возможностью плавной регулировки генерируемой линии, превосходил по интенсивности современные рентгеновские трубки, что востребовано во многих прикладных задачах, в настоящее время решаемых на дорогостоящих синхротронах.

Одним из современных направлений разработки подобного источника является совмещение лазерных систем, испускающих интенсивные световые импульсы пикосекундной длительности, и компактных сильноточных электронных ускорителей. Современный уровень техники позволяет разработать на основе данного подхода сравнительно компактные источники рентгеновского излучения для использования на предприятиях, в лабораториях и научно-исследовательских центрах.

Основу диссертационной работы Ю.Я. Масловой составляет расчёт, создание и экспериментальное исследование оптической схемы возможного импульсно-периодического лазерно-электронного источника рентгеновского излучения (ЛЭИРИ) для решения широкого круга задач. Особенностью источника является возможность его использования для получения контрастных изображений в режиме реального времени за счет высокого потока рентгеновских фотонов на миллисекундных временах экспозиции. В диссертационном исследовании был найден ряд решений для оптической системы источника, позволяющих существенно увеличить интенсивность генерируемого рентгеновского излучения до уровней, необходимых для

решения современных прикладных задач. Стоит отметить важность данных результатов, поскольку в последние годы к лазерно-электронным источникам наблюдается устойчивый интерес, однако методы увеличения выхода фотонов, применяемые в существующих проектах томсоновских источников, не позволяют достичь потоков излучения, необходимых, в том числе, для рентгеновской ангиографии. В работе исследуются методы формирования временной структуры лазерного излучения с параметрами, обеспечивающими требуемый уровень потока рентгеновских фотонов.

В частности, диссертационная работа Ю.Я. Масловой посвящена особенностям создания задающего генератора и оптического циркулятора, предназначенных для формирования, в области взаимодействия с электронным пучком, лазерного излучения с параметрами (длительностью, частотой, энергией), которые при взаимодействии с последовательностью электронных сгустков с зарядом 1 нКл обеспечат выход 5×10^{11} фотонов за 1 мс. Найденные в работе решения позволяют снизить требования к мощности оптической системы не менее чем на порядок. Выполненные в работе реализация и тестирование прототипа задающего генератора оптической системы предварялись выбором системы обратной связи на основе аналитических оценок и численного моделирования, способной обеспечить требуемую временную структуру. Выполненные в работе исследования перспективных режимов управления лазерной генерацией проведены на экспериментальном стенде, основу которого составляет твердотельный лазер. Особенной ценностью работы является возможность использования большинства полученных результатов не только для разработки обсуждаемых источников рентгеновского излучения, но и для иных устройств, использующих элементы лазерной генерации.

Полученные в работе результаты обладают существенной новизной в научном и техническом плане. Важной особенностью работы является достаточно подробное описание возможности использования полученных результатов для разностной рентгеновской ангиографии, что делает диссертацию законченной работой.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

Введение характеризует работу в целом, в том числе содержит актуальность, постановку целей работы, описание научной новизны, практической значимости, формулировку положений, выносимых на защиту, и оценку личного вклада автора.

В главе 1 автор поясняет суть метода разностной рентгеновской ангиографии, который призван снизить риски для пациентов при проведении кардиологического обследования. Применение в качестве источника для ангиографии ЛЭИРИ предоставляет уникальную возможность распространить метод разностной ангиографии из центров синхротронного излучения, где он был разработан, в медицинские клиники для широкого использования. С учетом этой цели автор анализирует схемные решения существующих ЛЭИРИ и использующихся в них приемов повышения эффективности взаимодействия

последовательностей лазерных импульсов и цугов электронных сгустков, которые, однако, не способны решить поставленную в работе задачу.

Глава 2 посвящена выбору оптического накопителя для ЛЭИРИ, который позволит использовать лазерное излучение многократно. На основе сравнительного анализа свойств высокодобротных резонаторов и оптических циркуляторов сделан выбор в пользу последних. Для быстрого ввода лазерного излучения в циркулятор предложено использовать оптический ключ на основе генерации второй гармоники, обеспечивающий наибольшее время жизни импульса в циркуляторе. Применение оптического ключа такого типа предполагает, что временной ход лазерного излучения на входе в циркулятор должен иметь весьма специфическую форму: необходим цуг пикосекундных импульсов с периодом следования 2 мкс при полной длительности цуга 1 мс. Традиционные способы, позволяющие получить требуемую временную структуру, достаточно сложны. Они основаны на применении квазинепрерывных пикосекундных лазеров в комбинации с регенеративным усилителем. Поэтому задача разработки прогрессивных способов управления временной структурой излучения проектируемого источника, позволяющих вносить значительные упрощения, решаемая в следующих главах, является весьма актуальной.

В **главе 3** проведено подробное описание экспериментальных и теоретических работ посвященных управлению лазерной генерацией с помощью внешней задержанной обратной связи. Проведенный анализ позволил автору более наглядно высветить новизну как самой задачи изучения регулярной и хаотической динамики с характерными временами соответствующим десяткам-сотням обходов лазерного резонатора, так и адекватность выбранного метода исследования на основе описания поведения лазера режиме синхронизации мод как объекта дискретного управления. С помощью изучения свойств дискретных отображений проведено исследование динамики лазера, управляемого комбинациями обратных связей, и показано, что наиболее перспективным режимом управления является тот, в котором первая обратная связь задержана на один проход, вторая – на два, включая случай комбинации положительной и отрицательной обратных связей. При этом поведение системы полностью определяется с помощью двух параметров – обобщенного усиления r и относительной чувствительности первой обратной связи α .

Глава 4 посвящена исследованию нового режима импульсного твердотельного лазера – генерации последовательности микроцугов пикосекундных импульсов с полной длительностью в несколько миллисекунд, а также изучению проявления нелинейной динамики лазера охваченного цепями внешних обратных связей. Особенностью развитого в работе подхода является то, что для получения пикосекундных импульсов, стабилизации излучения и осуществления режима регулярных пульсаций микросекундного диапазона используется единственный элемент: система отрицательной обратной связи на основе внутрирезонаторного электрооптического модулятора.

Задача синхронизации задающего генератора с ускорительной системой и сокращения длительности лазерных импульсов решается в главе 5. На основе численного моделирования с высоким временным разрешением показано, что при использовании предложенного способа управления с помощью комбинаций обратных связей достаточно одного дополнительного высокочастотного модулятора, что существенно упрощает финальную схему оптической системы. Большой потенциал разработанных методов управления усматривается благодаря приведенным в конце главы результатам по управлению лазерной генерацией в более высокочастотном диапазоне, чем необходим для ЛЭИРИ.

Заключение содержит формулировку основных результатов работы, среди которых следует выделить следующие результаты, представляющий наибольший интерес и обладающие существенной новизной и оригинальностью:

1. Разработана схема оптического модуля лазерно-электронного источника рентгеновского излучения для покadroвой 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 Tr , так и в область низких частот с характерным временем в десятки-сотни Tr .

3. Для управления, соответствующего комбинации положительной и задержанной на Tr 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 режимах – 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 микроуглов 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 Tr динамику, соответствующую логистическому отображению на масштабе Tr ; б) режим высокочастотных пульсаций с периодами $3-4Tr$ с использованием задержки на $2Tr$.

В **Приложениях** подробно описаны методы анализа динамики отображений, примененные в диссертации.

Исследования, проведенные Ю.Я. Масловой, носят комплексный характер и включают как численные, так и экспериментальные исследования. Достоверность и надежность результатов не вызывает сомнений.

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены и получить дальнейшее развитие в научно-исследовательских организациях (ФИАН, НИИ ЯФ МГУ, НИЦ «Курчатовский институт») и промышленных предприятиях, медицинских учреждениях, а также в зарубежных научных центрах, проводящих исследования по близким тематикам.

По диссертационной работе необходимо сделать ряд замечаний:

1. Не отмечены дальнейшие направления развития исследований.
2. Обсуждаемые в работе ЛЭИРИ основаны на электрон-фотонном взаимодействии в циркуляционном режиме, однако в работе отсутствуют данные о стабильности пучка электронов в режиме многократной циркуляции в магнитооптической системе, хотя, исходя из работы, такая стабильность должна быть достаточно высокой.
3. В работе обсуждается возможность использования ЛЭИРИ для ангиографии в контрастном режиме. В данной связи возникает вопрос, как близко предполагается размещение объекта исследования, поскольку его площадь достаточно большая и при близком размещении к источнику будет наблюдаться ухудшение монохроматичности источника, что нежелательно для контрастных методов, а при удалении от источника поток излучения через объект будет значительно уменьшаться.

Однако указанные замечания не влияют на высокую оценку диссертации. Достоверность представленных в ней результатов подтверждается публикацией в ведущих научных журналах и трудах российских и международных конференций.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Работа была заслушана и обсуждена на расширенном заседании кафедры теоретической и математической физики Института инженерных технологий и естественных наук НИУ «БелГУ» 10 февраля 2016 г. Отзыв одобрен на расширенном заседании кафедры теоретической и математической физики Института инженерных технологий и естественных наук НИУ «БелГУ» 10 февраля 2016 г. протокол №7.

В целом, представленная работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.05 – оптика, а Маслова Ю.Я., безусловно, заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил
Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры теоретической
и математической физики
Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Белгородский государственный
национальный
исследовательский университет» (НИУ
«БелГУ»)
адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85
тел.: +79803293261
e-mail: vokhmyanina@bsu.edu.ru

Вохмянина Кристина
Анатольевна

