

## ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ДИАПАЗОНА ЭНЕРГИЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2021 г. С. В. Андреев<sup>а</sup>, Н. С. Воробьев<sup>а,\*</sup>, Ю. М. Михальков<sup>а</sup>,  
А. В. Смирнов<sup>а</sup>, Е. В. Шашков<sup>а</sup>, А. Г. Турьянский<sup>б</sup>, В. М. Сенков<sup>б,\*\*</sup>,  
И. В. Пиршин<sup>б</sup>, Р. И. Фишман<sup>б</sup>, С. С. Гижа<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

<sup>б</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН  
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

\*e-mail: vor@kapella.gpi.ru

\*\*e-mail: senkov42@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.07.2020 г.

После доработки 07.08.2020 г.

Принята к публикации 14.08.2020 г.

Описан точечный источник рентгеновского излучения диапазона энергий до 40 кэВ, созданный на основе специально разработанного электронно-оптического преобразователя и работающий в импульсном и непрерывном режимах. Основная цель разработки — применение источника для тестирования времяанализирующих рентгеновских электронно-оптических камер. Прибор также может быть использован в рентгеновской микроскопии и спектроскопии в качестве эталонного источника излучения, в медико-биологических исследованиях и ряде других областей.

DOI: 10.31857/S0032816221010237

### ВВЕДЕНИЕ

Генерация и регистрация нано-, пико- и субпикосекундных импульсов рентгеновского излучения среднего диапазона энергий, ~10–100 кэВ, представляет большой научный и практический интерес. Приборы, удовлетворяющие этим требованиям и способные работать на воздухе, находят широкое применение в задачах, где существенную роль играет пространственное и временное разрешение. К таким задачам относятся: изучение быстропротекающих процессов в рентгеновском диапазоне длин волн; рентгеновская спектроскопия с временным разрешением; исследования быстропротекающих процессов с использованием дифракции электронов или рентгеновского излучения; контроль быстрых химических реакций; получение стробоскопических изображений в биологии и медицине; уменьшение дозы воздействия рентгеновского излучения на биообъекты и ряд других.

В представленной работе основное внимание сосредоточено на создании и исследовании точечного источника рентгеновского излучения (и.р.и.) диапазона энергий до 40 кэВ на основе электронно-оптического преобразователя (э.о.п.). Такой

источник может работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

В и.р.и. эмиссия электронов происходит при воздействии светового излучения на фотокатод, находящийся внутри вакуумного объема электростатического преобразователя, разгоняющего и фокусирующего электронный пучок на анод-мишень. Фокусировка электронного пучка на мишень из выбранного металла в пятно порядка сотни микрометров позволяет генерировать тормозное и характеристическое рентгеновское излучение в зависимости от напряжения (до десятков киловольт) между фотокатодом и анодом-мишенью. Рентгеновское излучение через бериллиевое или алмазное окно выводится из прибора и может быть использовано для дальнейших целей.

Получение коротких рентгеновских импульсов возможно, например, при использовании: 1) лазерной плазмы, образуемой при фокусировке ультракоротких лазерных импульсов на различные твердые мишени, или 2) фотокатодов при воздействии на них лазерными импульсами соответствующей длительности. Исследованию подобных устройств посвящены многие работы [1, 2].

В первом случае в возникшей за счет мощного лазерного излучения плазме образуются надтепловые электроны, которые вызывают импульсы рентгеновского излучения. Основным недостатком “прямого” источника является очень высокая стоимость лазерной системы, используемой для создания плазмы, обусловленная большой сложностью ее оптической схемы.

Во втором случае при воздействии на фотокатод низкоинтенсивного лазерного излучения соответствующей длительности и спектрального диапазона за счет фотоэффекта генерируются импульсы электронов, которые приобретают необходимую энергию в поле ускоряющих электродов и фокусируются на анод-мишень. В “непрямом” способе получения импульсного рентгеновского излучения требования к лазерной системе значительно ниже, что позволяет использовать компактные и коммерчески доступные лазеры нужного временного диапазона.

В настоящее время наибольший интерес вызывают “непрямые” и.р.и., например фоторентгеновская трубка с фотоэлектронным множителем в качестве источника электронов [3] и прибор PicoXspeC [4]. В ОАО ЦНИИ “Электрон” (г. Санкт-Петербург, Россия, <http://www.niielectron.ru/>) фоторентгеновская трубка, разработанная для аппаратуры рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, а также для приборов специального назначения, имеет следующие основные параметры: ускоряющее напряжение от 3 до 100 кВ (в зависимости от модификации), быстродействие порядка 100 нс.

Фоторентгеновская трубка может работать в непрерывном и импульсном режимах, при этом интенсивность рентгеновского излучения может регулироваться током светодиода. Применение разных материалов для фотокатода фотоэлектронного множителя позволяет получать фоторентгеновскую трубку с управлением световым потоком различного диапазона спектра – от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного. Конструкция фоторентгеновской трубки дает возможность использовать один и тот же прибор для получения как мягкого рентгеновского излучения (при низких напряжениях), так и излучения средней жесткости (при напряжениях до 100 кВ). Однако следует отметить, что длительность рентгеновских импульсов в такой трубке составляет десятки наносекунд, что ограничивает применение ее для исследования быстропротекающих процессов.

Прибор PicoXspeC разработан корпорацией Hamamatsu Photonics (Япония) для изучения процессов флуоресценции, возникающих в сцинтилляторах и других материалах, облучаемых пикосекундным рентгеновским излучением. Основной

частью прибора является импульсная рентгеновская трубка с фотокатодом в качестве эмиттера электронов. Трубка является излучателем зеркального типа с вольфрамовым анодом и окном из бериллия. Компактная система PicoXspeC легко размещается на лабораторном столе, и управление ею осуществляется от персонального компьютера. Система безопасна, радиационный фон не превышает разрешенного уровня радиации. С помощью PicoXspeC можно измерять рентгеновские импульсы длительностью от 100 пс до 1 нс при спектральном диапазоне чувствительности фотокатода от 200 до 850 нм.

В настоящее время в ИОФ РАН ведутся работы по созданию рентгеновских стрик-камер с пикосекундным временным разрешением, способных регистрировать рентгеновское излучение среднего диапазона энергий. Для их тестирования разработан и.р.и., основой которого является новый специализированный э.о.п.

Как известно, некоторые времяанализирующие преобразователи, например ПИФ-01 [5], могут иметь временное разрешение лучше 1 пс.

В связи с этим можно ожидать, что и.р.и., при соответствующей геометрии электронной оптики используемого э.о.п., будет способен излучать рентгеновские импульсы пикосекундной длительности при облучении его фотокатода фемто- или пикосекундными лазерными импульсами. Такой излучатель сможет работать и в непрерывном режиме при облучении постоянными источниками света с длиной волны, соответствующей области чувствительности фотокатода. В данной работе приводятся результаты по расчету, изготовлению и исследованию характеристик точечного и.р.и.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Расчет основных характеристик и конструкции прибора осуществлялся с использованием пакета прикладных программ MASIM [6], разработанного в отделе фотоэлектроники ИОФ РАН. Пакет обладает широким спектром возможностей по расчету статических и динамических электромагнитных полей, траекторий заряженных частиц, а также на их основе различных характеристик для решения задач электронной оптики, масс-спектрометрии, создания электронных усилителей и многих других электронных устройств и приборов.

Расчет электромагнитных полей в пакете программ MASIM осуществляется на основе разностных интегральных методов, а также их комбинаций для решения уравнений Лапласа и Пуассона. При расчете электрических полей и их производных вблизи поверхностей электродов применяются методы выделения особенностей, позволя-

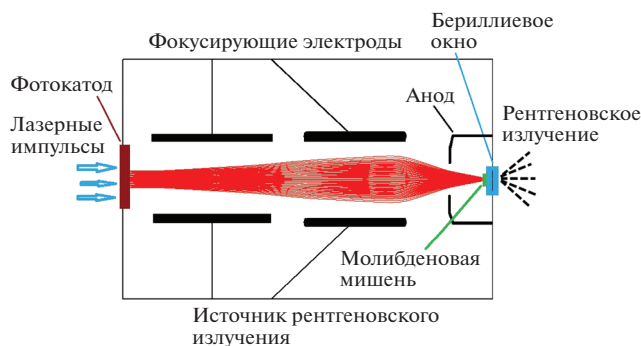


Рис. 1. Принципиальная схема и.р.и.

ющие добиться высокой точности расчета, что особенно важно в задачах электронной оптики, в которых электронное изображение формируется в прикатодной области.

Для расчета характеристик на основе электронных и ионных пучков широко применяется теория aberrаций 3-го порядка [7], что позволяет рассчитывать быстро и с высокой точностью интегральные характеристики, такие как плотность тока, временное и пространственное разрешение и т.д. Разработанные алгоритмы, реализованные в программе MASIM, прошли тщательное тестирование на модельных задачах, имеющих строгие аналитические или квазианалитические решения.

Для создания 40-килоэлектронвольтового электронного пучка диаметром 100 мкм, достаточного для получения рентгеновского излучения средней энергии ~17 кэВ, рассчитана конструкция электронно-оптической пушки, состоящей из фотокаатода, двух фокусирующих электродов и анода. Схема пушки показана на рис. 1. Непрерывное или импульсное излучение лазера видимого или инфракрасного диапазона длин волн падает на фотокаатод (например, S1 или S20), эмитирующий пучок электронов, которые ускоряются до 40 кэВ и фокусируются на аноде. При этом генерируется рентгеновское излучение, которое выводится через бериллиевое выходное окно. Молибденовый анод имеет конструкцию прострельного типа.

Основной целью сжатия пучка в диаметре с 3 мм (размер лазерного пятна на фотокаатоде) до 100 мкм (электронный пучок на мишени) является получение очень малого электронно-оптического увеличения в заданной области путем сближения плоскости кроссовера с плоскостью Гаусса. Этот эффект, достижимый в электронных пучках с двумя и более фокусирующими электродами, демонстрирует рис. 2. Здесь приведены графики aberrационных коэффициентов первого порядка, обозначенные как  $v$  и  $w$ , которые в точках пересечения с осью э.о.п. определяют положение плоскостей Гаусса и кроссовера.

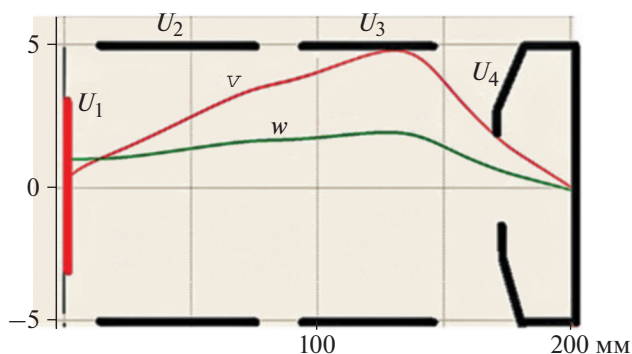


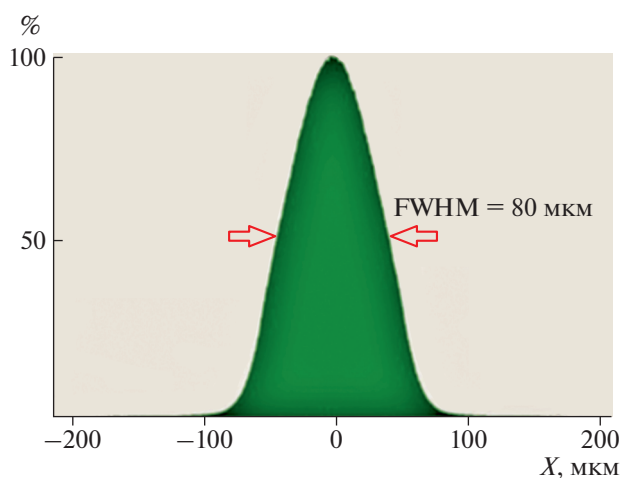
Рис. 2. Кривые aberrационных коэффициентов  $v$  и  $w$ , определяющие положение плоскостей изображения и кроссовера.  $U_1$  – потенциал катода,  $U_2$  – потенциал 1-го фокусирующего электрода,  $U_3$  – потенциал 2-го фокусирующего электрода,  $U_4$  – потенциал анода.

В результате решения оптимизационной задачи, целью которой было достижение минимального сечения пучка в плоскости, отстоящей от фотокаатода на 200 мм, получены следующие значения потенциалов электродов:

$$U_1 = -40 \text{ кВ}, \quad U_2 = -38.667 \text{ кВ}, \\ U_3 = -37.663 \text{ кВ}, \quad U_4 = 0 \text{ В}.$$

По итогам многократной последовательной оптимизации конструкции и потенциалов на электродах удалось получить размер пучка в плоскости кроссовера менее 100 мкм по полуширине (FWHM). Структура электронного пучка в разрезе хорошо видна на расчетном графике нормированной плотности тока в заданной плоскости  $z = 200$  мм, представленном на рис. 3.

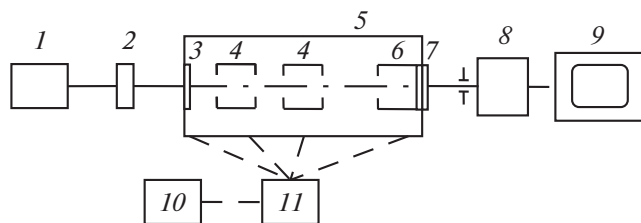
Расстояния между электродами подобраны так, чтобы напряженность электрического поля нигде не превышала 1.5 кВ/мм при анодном напряжении 40 кВ, что при должном качестве шлифовки и округления краев электродов должно гарантировать электрическую прочность прибора. Наличие двух фокусирующих электродов обеспечивает возможность точной настройки рассчитанного режима фокусировки. Общая длина э.о.п. немногим больше 200 мм. Конструктивно источник представляет собой вакуумный прибор в виде стеклянного цилиндра с кольцевыми металлическими электродами, внутри которого смонтирована электронно-оптическая система. Последняя содержит прозрачное входное окно, на котором формируются полупрозрачный фотокаатод мультищелевого типа S20 (Cs–Na–K–Sb), фокусирующие электроды и анод. Анодом является молибденовая пленка-мишень толщиной 1 мкм, нанесенная с внутренней стороны на бериллиевое выходное окно толщиной 250 мкм. В разработанной конструкции фотокаатод наносился классическим способом,



**Рис. 3.** Нормированная плотность тока в плоскости  $z = 200$  мм с полушириной (FWHM)  $\sim 80$  мкм и основанием  $\sim 200$  мкм для пучка электронов, эмитированных с рабочей области фотокатода диаметром 3 мм.



**Рис. 4.** Экспериментальный образец источника рентгеновского излучения.



**Рис. 5.** Принципиальная схема измерений спектров рентгеновского излучения. 1 — полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 532 нм; 2 — блок светофильтров; 3 — фотокатод; 4 — фокусирующие электроды; 5 — и.р.и. в защитном кожухе; 6 — молибденовая мишень; 7 — бериллиевое окно; 8 — рентгеновский спектрометр; 9 — персональный компьютер; 10 — высоковольтный источник питания и.р.и.; 11 — делитель напряжения.

т.е. непосредственно внутри объема колбы источника [8].

На рис. 4 представлен опытный образец разработанного источника рентгеновского излучения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для опытного образца и.р.и. были измерены спектры его рентгеновского излучения, определен размер рентгеновского фокуса источника, измерен ток насыщения в трубке при облучении фотокатода непрерывным лазерным излучением, получены рентгеновские импульсы при облучении катода импульсным лазерным излучением.

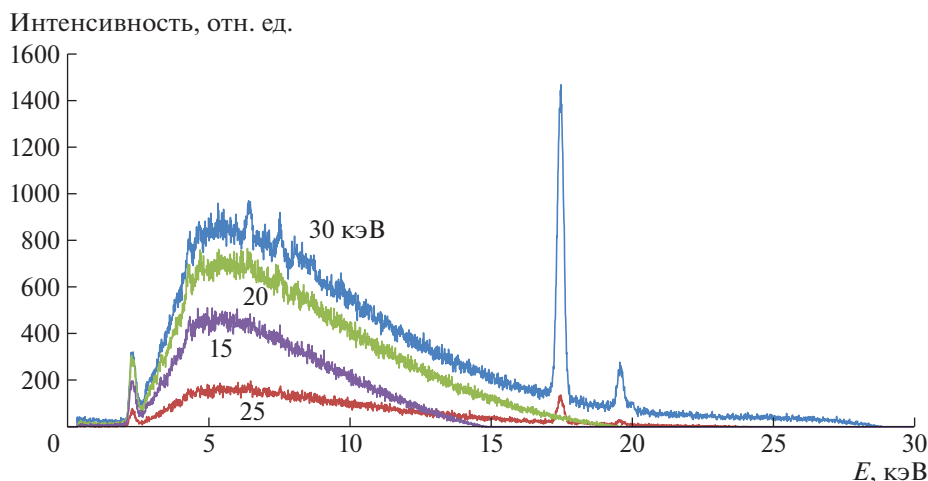
Принципиальная схема измерения спектров представлена на рис. 5. В процессе измерений непрерывное излучение полупроводникового лазера с длиной волны 532 нм освещало центральную область фотокатода диаметром  $\sim 3$  мм.

Подбором светофильтров обеспечивалась такая освещенность фотокатода, при которой измеренный микроамперметром фототок в трубке и.р.и. составлял 0.5–2 мкА и не изменялся со временем, т.е. достигался стационарный режим. Такой режим позволял получать стабильное по интенсивности рентгеновское излучение на выходе источника. При более высокой освещенности фототок в трубке существенно изменялся со временем, что, возможно, связано с дефектами фотокатода и трубки, так как технология изготовления и.р.и. только обрабатывается.

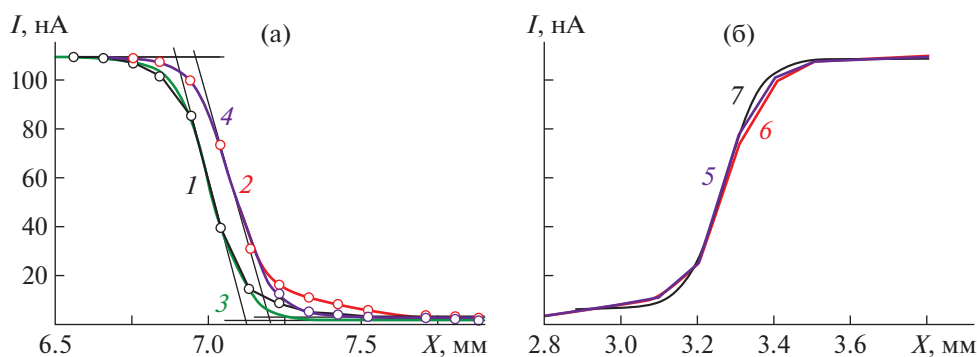
Спектр рентгеновского излучения регистрировался полупроводниковым детектором X-123 SDD (Amptek, США, Великобритания). Результаты измерений спектра рентгеновского излучения на выходе излучателя представлены на рис. 6.

В приведенном спектре и.р.и. при анодном напряжении 30 кВ наблюдаются тормозное излучение и характеристические линии молибдена при энергиях 17.48, 19.61 и 2.3 кэВ. При напряжениях на источнике  $\leq 20$  кВ характеристические линии в районе 17 и 19 кэВ не наблюдаются. Изменяя анодное напряжение, можно выделить нужную спектральную область рентгеновского излучения для дальнейшего использования, например, в рентгеновской спектроскопии и т.п. Таким образом, изготавливая многослойные мишени из различных металлов, можно получать ряд спектральных линий рентгеновского излучения или выделять одну, изменяя анодное напряжение и.р.и.

Методика определения размера рентгеновского фокуса и.р.и. заключалась в измерении сигнала рентгеновского излучателя при перемещении танталового экрана относительно фокуса прибора. Схема измерения включала в себя: лазер, освещающий фотокатод рентгеновского источника; сам и.р.и.; непрозрачный для рентгеновского из-



**Рис. 6.** Спектры рентгеновского излучения прибора при различных анодных напряжениях. Спектр при 25 кВ был измерен при меньшем фототоке по сравнению с остальными.



**Рис. 7.** Результаты измерения диаметра рентгеновского пятна и.р.и.: **а** – ток ф.э.у. при перемещении экрана в прямом (1) и обратном (2) горизонтальном направлении, 3, 4 – аппроксимация функцией Больцмана для  $t = 61.4$  (3) и  $64.5$  (4); **б** – ток ф.э.у. при перемещении экрана в прямом (5) и обратном (6) вертикальном направлении, 7 – аппроксимация функцией Больцмана ( $t = 45.7$ ).

лучения танталовый экран, расположенный сразу после бериллиевого окна и перемещаемый в двух направлениях (по горизонтали и вертикали) микрометрическими подвижками; рентгеновский детектор с входной диафрагмой; электрические цепи, измеряющие токи анода излучателя и рентгеновского детектора. В процессе измерений напряжение на трубке было ~30 кВ, фототок – на уровне десятых долей микроампер.

Интенсивность рентгеновского излучения измерялась сцинтилляционным детектором. В качестве сцинтиллятора использовался кристалл CsI:Тl. ФЭУ-85, работающий в токовом режиме, регистрировал световое излучение сцинтиллятора. Для измерения токов в цепях анода излучателя и рентгеновского детектора были собраны цепи, содержащие сопротивления 1 МОм и мультиметры “Mastech” МУ62 с входным сопротивлением

≥20 МОм. Расстояние от анода до экрана составляло 2.5 мм, от анода до детектора – 92 мм.

Экспериментальные зависимости аппроксимировались функцией Больцмана

$$F(X) = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{X - X_0}{t}\right)} + A_2,$$

где  $X_0$  – координата центра анода, а  $X$  – смещение экрана относительно анода;  $t$  – параметр ширины перехода;  $A_1$  и  $A_2$  – горизонтальные асимптоты.

На рис. 7 представлены результаты измерения зависимости тока ф.э.у. от положения экрана при его горизонтальных и вертикальных перемещениях относительно фокуса источника.

В результате расчетов размер рентгеновского фокуса оказался равен ~125 мкм в горизонтальном направлении и около 55 мкм – в вертикаль-

ном при точности измерений  $\sim 30\%$ , т.е. фокус имеет форму эллипса и вытянут в горизонтальном направлении.

Причиной эллиптичности пятна могут быть: неточность изготовления электронной оптики и.р.и., неточная фокусировка электронного пучка на аноде, погрешности системы измерения размеров фокуса. Тем не менее, расчетные характеристики и.р.и. практически выдержаны при его изготовлении, и данный прибор можно использовать как точечный источник рентгеновского излучения в различных научных и технических приложениях.

В предварительных экспериментах при облучении фотокатода непрерывным лазерным излучением с длиной волны 532 нм и плотностью мощности от 0.04 до 0.3 Вт/см<sup>2</sup> фототок в трубке менялся от 1.7 до 8.8 мкА. Интенсивность лазерного излучения изменялась за счет введения светофильтров перед фотокатодом. Фототок насыщения в трубке соответствовал  $\sim 9$  мкА, датчик рентгеновского излучения (СОЭКС-01М), расположенный на расстоянии 5 см от источника, фиксировал превышение дозы над фоном примерно в 1000 раз (100 мкЗв/ч).

Поток рентгеновского излучения измерялся с помощью описанного выше полупроводникового рентгеновского спектрометра. На расстоянии 78 мм от выходного окна рентгеновского источника устанавливалась диафрагма с диаметром отверстия 0.55 мм. Полагая, что угловая диаграмма излучения из фокуса источника является приближенно изотропной, поток излучения в полный телесный угол при энергии электронов 30 кэВ и мощности 0.02 Вт составил  $2 \cdot 10^{10}$  фотонов/с.

Вследствие фильтрации мишенью и выходным окном источника нижний порог энергии рентгеновских фотонов ограничен примерно 2 кэВ, а верхний порог – энергией падающих электронов. Плотность потока энергии электронов на аноде для указанной мощности источника при размере фокусного пятна 100 мкм равна 250 Вт/см<sup>2</sup>.

Для исследования работы и.р.и. в импульсном режиме использовалась установка на основе импульсного наносекундного лазера “Quanta-Ray” GCR-130 (Spectra-Physics, USA) по схеме на рис. 5, только вместо спектрометра использовался сцинтиллятор, разработанный в ИОФ РАН, с временем релаксации  $\sim 20$  нс [9]. Импульсы лазерного излучения с длиной волны 532 нм, длительностью 20 нс и частотой следования 10 Гц после ослабления светофильтрами облучали фотокатод. При этом анодное напряжение составляло  $\sim 30$  кВ. Как показали предыдущие эксперименты, при этих условиях на выходе и.р.и. возникает характеристическое излучение Mo с энергией квантов 17.48 кэВ и

19.61 кэВ. При помощи чувствительного к рентгеновскому излучению с такими энергиями сцинтиллятора и ф.э.у. СНФТ-3 с временным разрешением  $\sim 5$  нс были зарегистрированы на осциллографе LeCroy WaveSurfer 3054 импульса длительностью  $\sim 30$  нс. Полученные результаты показывают возможность работы и.р.и. в импульсном режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что изготовленный на основе э.о.п. точечный и.р.и. может работать в непрерывном и импульсном режимах и обладает характеристиками (спектральными, временными и пространственными), позволяющими использовать его в различных областях науки и техники. В дальнейшем предполагается провести ряд исследований по генерации пикосекундных импульсов рентгеновского излучения, поскольку, как показывают расчеты, в созданном приборе временной разброс электронов в пучке на мишени составил около 30 пс.

Авторами рассматривается возможность получения более коротких рентгеновских импульсов. В качестве следующего шага предполагается добавить в и.р.и. ускоряющую сетку, что позволит поднять временное разрешение прибора до субпикосекундных значений. На основании собственного опыта применения квазистационарных полей [10] авторы планируют в новых модификациях и.р.и. сжимать формируемые на фотокатоде электронные пучки до фемтосекундных длительностей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают глубокую благодарность за оказание помощи в изготовлении опытных образцов и.р.и. Г.П. Левиной, С.Р. Ивановой, В.А. Макушиной и всем сотрудникам технологического участка отдела фотоэлектроники ИОФ РАН, а также А.И. Заровскому и В.И. Пелипенко за участие в проведении экспериментов и Н.В. Васильевой за предоставление сцинтиллятора. Особую благодарность авторы выражают директору НПП “Фон” Д.П. Бельскому за участие в изготовлении узла прострельного анода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фетисов Г.В.* // УФН. 2020. Т. 190. С. 2. <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.10.038435>
2. *Egbert A., Mader B., Chichkov B.N.* // Laser Physics. 2002. V. 12. P. 403.
3. *Альмов О.В., Левко Г.В., Лукьянов В.Н., Серебряков А.С., Мамаева Г.А., Филиппова О.А., Фролов В.М., Коротун В.П.* Патент на полезную модель № 123222 РФ // Бюл. № 35. Оpubл. 20.12.2012.
4. *Denzer U.* // Hamamatsu news. 2011. № 2. P. 28.

5. *Degtyareva V.P., Kulikov Yu.V., Monastyrskiy M.A., Platonov V.N., Postovalov V.E., Prokhorov A.M., Ulasyuk V.N., Ushakov V.K.* // Proc. SPIE. 1984. V. 491. P. 239.
6. *Greenfield D.E., Monastyrskiy M.A., Tarasov V.A.* // CPO-7 International Conference. Cambridge, UK. 2006. P. 23.  
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2008.07.106>
7. *Schelev M.Ya., Monastyrskiy M.A., Vorobiev N.S., Garnov S.V., Greenfield D.E.* Aspects of Streak Image Tube Photography / Advances in Imaging and Electron Physics. V. 180. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2013.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407755-3.00001-7>
8. *Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д.* Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях / Под ред. Е.К. Завойского М.: Наука, 1978.
9. *Васильев Д.А., Верещагин К.А., Верещагин А.К., Спасский Д.А., Соколов В.О., Хахалин А.В., Васильева Н.В., Галстян А.М., Плотниченко В.Г.* // Прикладная физика. 2015. Т. 4. С. 5.
10. *Андреев С.В., Белолипецкий В.С., Брюхневич Г.И., Воробьев Н.С., Дегтярева В.П., Кузьменко Е.А., Лозовой В.И., Монастырский М.А., Сердюченко Ю.Н., Тарасов В.А., Щелев М.Я.* // Прикладная физика. 2008. Т. 2. С. 33.