

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

**И.А.Артиюков, Е.Г.Бессонов, А.В.Виноградов, М.В.Горбунков,
Я.В.Зубавичус, Б.С.Ишханов, П.В.Кострюков, Ю.Я.Маслова,
Н.Л.Попов, А.В.Посеряев, А.А. Постнов, Ю.Л.Словохотов,
В.Г.Тункин, Ю.А.Успенский, Р.М.Фещенко, Ю.В.Шабалин,
В.И.Шведунов**

ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 7/806

Москва
2006

УДК 621.384.6

E-mail addresses: vinograd@sci.lebedev.ru, poseryaev@nm.ru

**I.A. Artyukov, E.G. Bessonov, A.V. Vinogradov, M.V. Gorbunkov,
Ya.V. Zubavichus, B.S. Ishkhanov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, N.L. Popov,
A.V. Poseryaev, A.A. Postnov, Yu.L. Slovoхотов, V.G. Tunkin, Yu.A. Uspensky,
R.M. Fechtchenko, Yu.V. Shabalin, V.I. Shvedunov**

LASER-ELECTRON X-RAY GENERATOR

Preprint INP MSU – 2006 – 7/806

Abstract

The possibility of creation and the application prospects of laser-electron X-ray generator are discussed. X-ray generation in such a source is based on Thomson backscattering of counter propagated laser and electron beams. This generator will take up the intermediate position by the average luminosity, brightness, total manufacturing and operation cost and overall dimensions between synchrotrons based sources and conventional X-ray tubes existed at present time. The structure of channels and experimental stations for elemental analysis, material structure and biological objects researches are also discussed.

**И.А. Артюков, Е.Г. Бессонов, А.В. Виноградов, М.В. Горбунков,
Я.В. Зубавичус, Б.С. Ишханов, П.В. Кострюков, Ю.Я. Маслова, Н.Л. Попов,
А.В. Посеряев, А.А. Постнов, Ю.Л. Словохотов, В.Г. Тункин,
Ю.А. Успенский, Р.М. Фещенко, Ю.В. Шабалин, В.И. Шведун**

ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 7/806

Аннотация

Рассматривается возможность создания и перспективы применения лазерно-электронного рентгеновского генератора, основанного на эффекте томсоновского рассеяния лазерного излучения на пучке релятивистских электронов. Такой генератор заполняет существующий сегодня пробел между рентгеновскими трубками и синхротронными источниками, который составляет несколько порядков величины по яркости, средней интенсивности, габаритам, а также по стоимости сооружения и эксплуатации. Обсуждается конфигурация каналов и экспериментальных станций, предназначенных для применения рентгеновского лазерно-электронного генератора в исследованиях элементного состава и структуры материалов и биологических объектов.

© Артюков И.А., Бессонов Е.Г., Виноградов А.В. и др., 2006
© НИИЯФ МГУ, 2006 <http://www.sinp.msu.ru>

Оглавление.

Введение.	4
§1. Томсоновское рассеяние фотонов лазерного излучения на релятивистских электронах.	6
§2. Интенсивность и яркость лазерно-электронного генератора.	9
а) Интенсивность.	9
б) Яркость.	11
§3. Применения генератора в спектроскопии и науках о материалах.	12
Список литературы.	16

Введение.

Развитие технологий, связанных с генерацией и применением рентгеновского излучения, является важной составляющей научно-технического прогресса во многих секторах производства, включая металлургию, машиностроение, химическую и фармацевтическую промышленность, а также в таких областях человеческой деятельности, как медицина, оптовые поставки сельхозпродуктов и продуктов питания, экологический контроль, общественная безопасность, работа таможенных и пограничных терминалов, и т.п. Для внедрения многих научных разработок в этих сферах деятельности исследователям также необходим постоянный доступ к источникам рентгеновского излучения.

Практически во всех источниках (генераторах) рентгеновское излучение возбуждается электронным пучком. Современные генераторы рентгеновского излучения можно разбить на два основных класса. К первому классу относятся рентгеновские трубки (с неподвижным или вращающимся анодом), ко второму – ускорители электронов: синхротроны и накопительные кольца. В рентгеновских трубках жесткое электромагнитное излучение возникает при торможении электронного пучка в материале анода, в ускорителях – при отклонении пучка в сильном магнитном поле.

Рентгеновские трубки используются в подавляющем большинстве серийных приборов и аппаратов. Трубки с неподвижным анодом достаточно надёжны, компактны, просты в эксплуатации и сравнительно недороги – от сотен до нескольких тысяч долларов. Современные трубки с вращающимся анодом дают в 10-100 раз более высокую интенсивность излучения, однако они стоят десятки и сотни тысяч долларов и гораздо сложнее в эксплуатации. Общими недостатками этого класса рентгеновских источников являются отсутствие направленности рентгеновского пучка, широкий и, при заданном материале анода, практически неварьируемый спектр энергий, относительно малая интенсивность излучения и связанная с этим невозможность получения ярких монохроматических рентгеновских пучков с перестраиваемой энергией.

В отличие от рентгеновских трубок, синхротроны и накопительные кольца – это крупные энергоёмкие исследовательские установки с замкнутой траекторией электронного пучка, длина орбиты которого составляет десятки и сотни метров. Во всем мире насчитывается около ста ускорителей, предназначенных для получения рентгеновского синхротронного излучения (СИ). Это излучение обладает высокой яркостью, направленностью и широким спектром, благодаря чему возможно получение перестраиваемых по энергии достаточно интенсивных монохроматических пучков. Рентгеновское излучение, получаемое в специализированных синхротронных центрах, используется как для научных исследований, так и для практических приложений. Как правило, на одном накопительном кольце синхротронного центра устанавливаются приборы для различных исследовательских и прикладных задач; на этих приборах одновременно работают несколько десятков групп пользователей. Однако размеры и высокая стоимость – десятки и сотни миллионов долларов – современных синхротронных источников серьезно ограничивают масштабы их применения, которые не отвечают пока потребностям науки и практики. На сегодня в мире имеется лишь около 40 синхротронных центров коллективного пользования, которые расположены в наиболее технологически развитых и богатых странах. Отсутствие источников интенсивного рентгеновского излучения, массово доступных на уровне предприятий и исследовательских организаций, препятствует развитию новейших рентгеновских методов и

технологий, а также их широкому использованию в науке, медицине и других отраслях.

Таким образом, в настоящее время имеется объективная потребность в новом источнике рентгеновского излучения, который заполнил бы разрыв, образовавшийся между рентгеновскими трубками и синхротронными центрами. От лабораторных генераторов на рентгеновских трубках такой источник должен унаследовать компактность и относительно невысокую стоимость, а от центров СИ – высокую интенсивность рентгеновского пучка и возможности управления его параметрами.

Рентгеновский источник, отвечающий сформулированным требованиям, может быть создан на основе комплексных установок, которые объединяют компактный сильноточный электронный ускоритель и лазер, испускающий интенсивные световые импульсы. Рентгеновское излучение в этом случае генерируется при встречном столкновении электронного и лазерного пучков; другими словами, фотоны высоких энергий рождаются в результате отклонения электронного пучка от прямолинейной траектории в поле интенсивной световой волны. Соответствующий элементарный процесс хорошо изучен и носит название томсоновского или комптоновского рассеяния (в зависимости от значения параметра $E\hbar\omega_L/(mc^2)^2$, определяющего величину квантовых поправок, E – энергия электрона, $\hbar\omega_L$ – энергия лазерного фотона). С конца 70-х годов XX века комптоновское рассеяние на пучках релятивистских электронов служит эффективным способом получения γ -квантов (вплоть до энергий ~ 2 ГэВ), используемых в фотоядерных реакциях. Однако для получения фотонов более низких энергий (~ 10 – 100 кэВ), представляющих наибольший интерес для приложений, рентгеновские трубки и синхротронное излучение до последнего времени оставались вне конкуренции.

В настоящее время ситуация изменилась благодаря достижениям лазерной и ускорительной техники. Новые активные твердотельные среды, использующие накачку лазерными диодами, диодными линейками и матрицами, позволяют генерировать и усиливать цуги пикосекундных световых импульсов в компактных устройствах с высоким КПД. С другой стороны, современные электронные ускорители позволяют генерировать пучки с высокой яркостью, которые могут быть сфокусированы в пятно размером около 10 мкм, а современные ускоряющие структуры могут обеспечить темп ускорения до 50 МэВ/м, что позволяет создавать установки небольших размеров. Объединение лазеров и ускорителей в одном устройстве даёт возможность создать относительно дешёвый компактный источник интенсивного рентгеновского излучения для научных и прикладных целей. Такой источник, доступный для организаций и учреждений (заводов, университетов, клиник) не просто заполнит разрыв между рентгеновскими трубками и синхротронами: он способен превзойти их по целому ряду параметров, в том числе по экономической эффективности.

Перечислим основные преимущества лазерно – электронного (лазерно-ускорительного) рентгеновского генератора, определяющие перспективы его развития и применения: сравнительно узкий спектр (с шириной практически доступной области 3-5 кэВ), резко (скачком) обрывающийся в сторону высоких энергий; высокие интенсивность и направленность излучения (конус рассеяния $\sim 1^\circ$); возможность перестройки спектра путем изменения магнитного поля ускорителя и (или) смены лазера; возможность управления временной структурой пучка в широком диапазоне длительностей импульсов и пиковой мощности; компактность (занимаемая площадь $< 100\text{м}^2$) и сравнительно низкое энергопотребление. Проектные параметры нового генератора позволяют реализовать на нем многие «синхротронные» рентгеновские методы, для которых

недостаточно мощности рентгеновских трубок – EXAFS-спектроскопию, аномальное рентгеновское рассеяние в малых и больших углах («элементный контраст»), разностную ангиографию и др. А поскольку излучение такого источника по энергетическому и пространственно-временному спектру отличается как от излучения рентгеновских трубок, так и от СИ, на его основе могут разрабатываться новые уникальные исследовательские и прикладные методики.

По-видимому, первыми потребителями лазерно-электронных рентгеновских генераторов будут университеты и другие организации, в которых обучение специалистов и рентгеновские исследования в области материаловедения, кристаллохимии, белковой кристаллографии, биологии и медицины уже проводятся на серийной аппаратуре, использующей рентгеновские трубки.

Уже на стадии экспериментального образца новый лазерно-ускорительный рентгеновский источник может использоваться для исследований в различных областях физики твёрдого тела, наук о материалах, биологии и медицины. Развитие самых передовых и динамичных областей науки и практической деятельности в обозримом будущем будет способствовать широкому распространению таких источников. Нет сомнений, что в перспективе они будут востребованы многими учебными, научно-исследовательскими и производственными организациями, как в нашей стране, так и за рубежом. Принимая во внимание широкое использование рентгеновских технологий, представляется целесообразным с самого начала вести работы по созданию нового рентгеновского источника с учетом перспектив его практического применения. С этой целью на раннем этапе разработки желательно предусмотреть патентное сопровождение, мониторинг рынка, контакты с потенциальными потребителями и инвесторами, используя при этом взаимодействие с естественнонаучными и финансово-экономическими кафедрами МГУ.

Создание и развитие рентгеновских источников нового типа будет играть важную образовательно-интегрирующую роль. Коллектив разработчиков должен включать специалистов в области физики ускорителей и лазеров, рентгеновской оптики и регистрирующей аппаратуры, современных оптических материалов и методов обработки изображений, а также потенциальных пользователей. Такие специалисты, безусловно, есть и готовятся на целом ряде кафедр МГУ. Работающий лазерно-ускорительный источник позволит поднять на качественно новый уровень обучение экспериментаторов в области физики, химии, современного материаловедения, молекулярной биологии и других быстро развивающихся дисциплин. Его применение существенно повысит качество исследований и разработок, выполняемых в МГУ, и позволит расширить контакты университетских исследователей с мировым рентгеновским сообществом.

§1. Томсоновское рассеяние фотонов лазерного излучения на релятивистских электронах.

Работы по получению гамма и рентгеновского излучения при рассеянии лазерных пучков на релятивистских электронах ведутся уже свыше 40 лет [1-5]. Обзор приложений комптоновского и томсоновского рассеяния лазерного излучения можно найти в [6,7]. При комптоновском рассеянии лазерного излучения на пучках синхротронов и накопительных колец генерируются фотоны с энергией от сотен кэВ до 2.4 ГэВ, которые используются для исследования

фотоядерных реакций. В настоящей работе речь идёт о лазерно-электронном генераторе более мягких рентгеновских квантов с энергией от 5 до 50 кэВ. Отметим, что именно этот диапазон энергий имеет наиболее широкие научные и практические приложения, в нём работают как рентгеновские трубки, так и источники синхротронного и ондуляторного излучения. Лазерно-электронный генератор способен заполнить имеющийся разрыв между ними, поскольку его характеристики – яркость, габариты, стоимость и др. – предоставляют удачный компромисс между рентгеновскими трубками и источниками синхротронного излучения (СИ) третьего поколения (см. Введение).

В ряде научных и практических приложений лазерно-ускорительные генераторы могут служить и разумной альтернативой существующим источникам СИ первого и второго поколения. Такие генераторы, с одной стороны, позволяют проводить в перечисленных выше дисциплинах многие исследования, для которых интенсивность рентгеновских трубок недостаточна, а с другой – обеспечат возможность предварительной отладки аппаратуры, создаваемой для каналов СИ, и смогут разгрузить эти каналы от рутинных измерений, не требующих предельно высокой интенсивности рентгеновского пучка. Благодаря существенному, по сравнению с синхротроном, уменьшению габаритов и стоимости при сохранении достаточно высокой яркости, лазерно-электронные генераторы могут найти широкое практическое применение в медицине, технологиях производства, системах контроля и безопасности, фармацевтической и пищевой промышленности и других областях, где использование СИ до сих пор в основном ограничено научными исследованиями.

В этом разделе мы дадим оценку интенсивности и яркости лазерно-электронного генератора и сравним его по последнему параметру с рентгеновскими трубками и источниками СИ. При энергиях электронов $E_e = \gamma m_e c^2 \sim 25\text{--}50$ МэВ и лазерных фотонов $\hbar\omega_L \leq 2$ эВ, обеспечивающих генерацию рентгеновского излучения в интересующем нас диапазоне 5 – 50 кэВ, выполнено соотношение:

$$2\gamma\hbar\omega_L \ll mc^2, \quad (1)$$

где $\gamma = E_e/mc^2$ – релятивистский фактор. Это позволяет рассматривать столкновение электронов с лазерными фотонами как классическое томсоновское рассеяние. Полное число рентгеновских фотонов, генерируемых при взаимодействии одиночного лазерного импульса с электронным сгустком в этом случае равно

$$n = \frac{\sigma_T}{s} N_L N_e, \quad \sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 = 6.6 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2, \quad (2)$$

где σ_T – сечение томсоновского рассеяния, N_L , N_e – соответственно, полное число фотонов в лазерном импульсе и число электронов в сгустке. В формуле (2) предполагается, что электроны и фотоны имеют гауссово поперечное распределение с одинаковыми дисперсиями $s = 2s_{L,e} = 4\pi\sigma_{L,e}^2$, $\sigma_L = \sigma_e$.

Энергия рентгеновского фотона $\hbar\omega$ связана с энергией фотонов в лазерном пучке $\hbar\omega_L$ и углом рассеяния θ соотношением

$$\hbar\omega = \frac{4\gamma^2}{1+(\gamma\theta)^2} \hbar\omega_L. \quad (3)$$

Отсюда видно, что рентгеновское излучение лазерно-электронного генератора распространяется в узком угле $\sim 1/\gamma$ рад в направлении движения электронного пучка.

Переходя к определению интенсивности рентгеновского генератора, рассмотрим два обсуждающиеся в литературе варианта: оптимистичный и реалистичный. В схеме последнего в основном заложены уже достигнутые параметры ускорительной и лазерной техники, первый вариант учитывает прогноз их развития. Следует отметить, что лазеры и ускорители относятся к чрезвычайно динамичным продуктам современных высоких технологий, как по своим физическим параметрам, так и по стоимости и экономической эффективности. Нередко вновь спроектированные установки устаревают к моменту завершения их сооружения. Рассматриваемые ниже два варианта рентгеновского генератора отличаются параметрами накопительного кольца, типом и временной структурой лазера, а также схемой использования резонатора (циркулятора), который служит для увеличения эффективности взаимодействия лазерного излучения с электронным пучком.

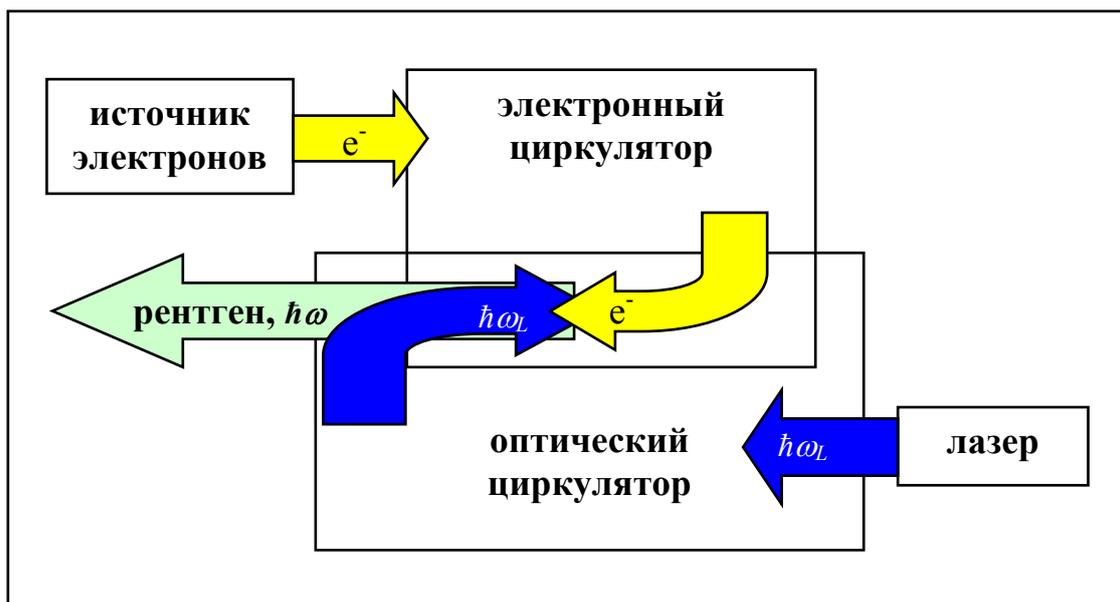


Рис.1. Общая схема лазерно-электронного генератора рентгеновского излучения.

Общая блок-схема генератора изображена на рис.1. Электронные сгустки с частотой $f=30-50$ Гц из линейного ускорителя (источника электронов) инжектируются в электронный циркулятор. С той же частотой $f=30-50$ Гц лазер генерирует цуги импульсов, которые направляются в оптический циркулятор. Рентгеновское излучение генерируется в камере взаимодействия, в области, где плотность лазерного излучения и электронов максимальна. Средний поток рентгеновских фотонов равен

$$\Phi = fN, \quad N = nn_L n_c = \frac{\sigma_T}{s} N_L N_e n_L n_c, \quad (4)$$

где N – количество рентгеновских фотонов, генерируемых одним лазерным цугом, n – число фотонов (2), генерируемых при одном столкновении лазерного микроимпульса с электронным сгустком, n_L – число лазерных микроимпульсов в цуге, n_c – число оборотов лазерного импульса в оптическом циркуляторе. Очевидно, целесообразно выбирать $n_c \approx n_s$, где n_s – число оборотов электронного сгустка в накопителе. По мере движения в накопителе электронный сгусток расплывается, а его эмиттанс растёт, т.е. увеличивается площадь поперечного сечения пучка и уменьшается поток генерируемых фотонов. Вместе с тем энергия лазерного импульса в оптическом циркуляторе уменьшается из-за внутриврезонаторных потерь, которые складываются из потерь при отражениях на

зеркала и потерь на оптических элементах, установленных внутри циркулятора. Это ограничивает величины n_c и n_s .

§2. Интенсивность и яркость лазерно-электронного генератора.

а) Интенсивность.

Оценки интенсивности начнём с лазерно-электронного генератора, проект которого приведён в [7] (см. рис. 2). Особенности этой схемы являются малый средний радиус кольца $R_0=0,5$ м и использование квазинепрерывного лазера сравнительно небольшой мощности $P_L = 10$ Вт, с высокочастотным резонатором. В частности в выражении (4) авторы [7] полагали $n_L=1$, $n_c=10^4$, в то время как экспериментально подтверждённое усиление мощности ультракоротких импульсов в пассивном резонаторе не превышает в настоящее время $n_c \leq 10^2$ [13]. Основные параметры источника, предложенного в работе [7], включая интенсивность рентгеновского пучка, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры источника рентгеновского излучения [7].

E , кэВ	$\hbar\omega_L$, эВ	E_e , МэВ	$\sigma_e = \sigma_L$, мкм	N_e	N_L	f , МГц	n_L	P_L , Вт	n_c	Φ , фот/с
12	1,16	25	30	$6 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{11}$	90	1	10	10^4	$1,9 \cdot 10^{13}$

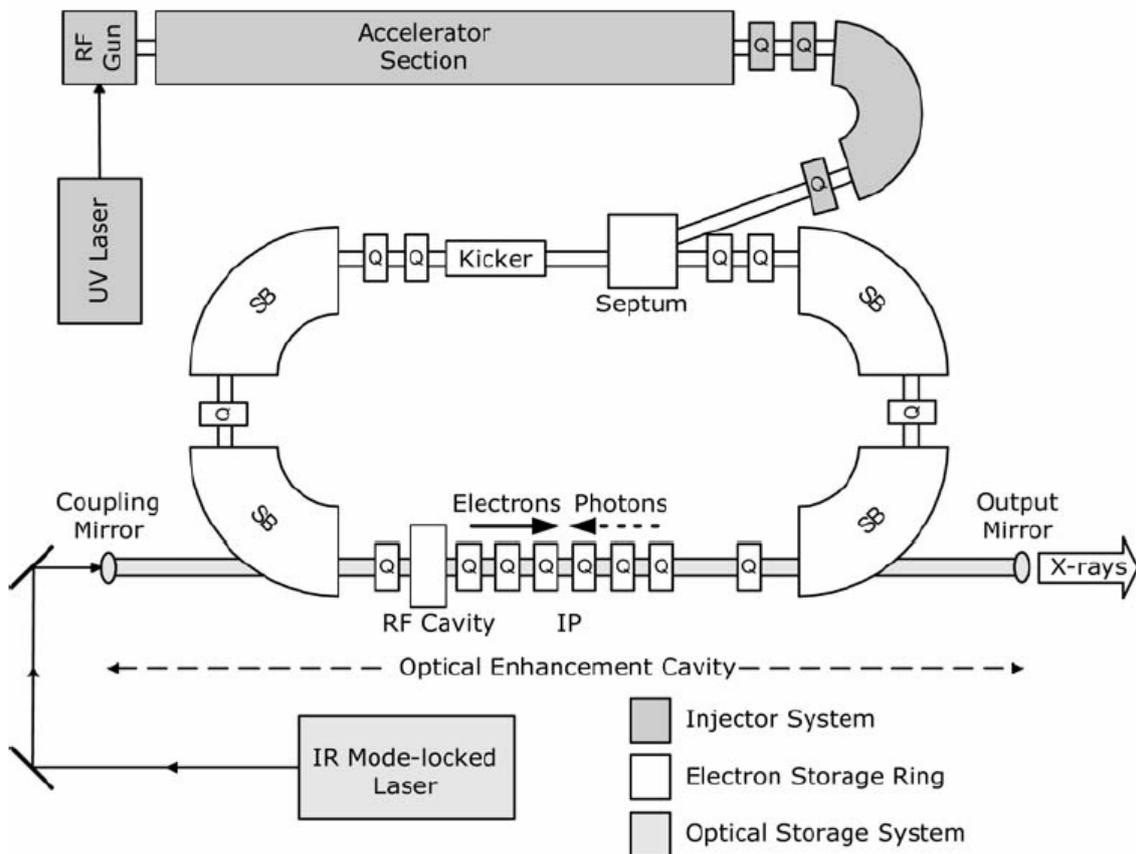


Рис.2. Схема источника рентгеновского излучения [7].

Другая схема лазерно-электронного генератора рассматривается в работе [14] (см. рис. 3) в связи с задачами ангиографии. В этом случае интенсивность источника должна обеспечить экспозицию за время порядка нескольких миллисекунд с частотой ~ 30 Гц. С этой целью разрабатывается импульсный пикосекундный лазер [14,15], управляемый оптоэлектронными обратными связями, со специальной временной структурой: длительностью пуга 2 мс, числом импульсов в пуге $n_L=10^3$, частотой следования пугов 30 Гц. Характерное время жизни лазерного излучения в высокооборотном оптическом циркуляторе достаточно велико и соответствует $n_c \sim 10^2$. Эффективный радиус накопительного кольца в данной схеме $R_0 = 1$ м вдвое выше, чем в предыдущем случае. Основные параметры источника, предложенного в проекте [14, 16], суммированы в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры источника для нужд коронарной ангиографии.

E , кэВ	$\hbar\omega_L$, эВ	E_e , МэВ	$\sigma_e = \sigma_L$, мкм	N_e	N_L	f , МГц	n_L	P_L , Вт	n_c	Φ , фот/с
33	1,16	43	30	$6 \cdot 10^9$	$2,7 \cdot 10^{16}$	30	10^3	10	10^2	$2,8 \cdot 10^{12}$

В схеме (см. рис. 3) предусмотрен также второй лазер с близкой длиной волны, что даёт возможность получить бихроматический рентгеновский пучок для неинвазивной разностной ангиографии. Пуг второго лазера может содержать большее количество импульсов для компенсации увеличения эмиттанса электронного пучка в накопителе.

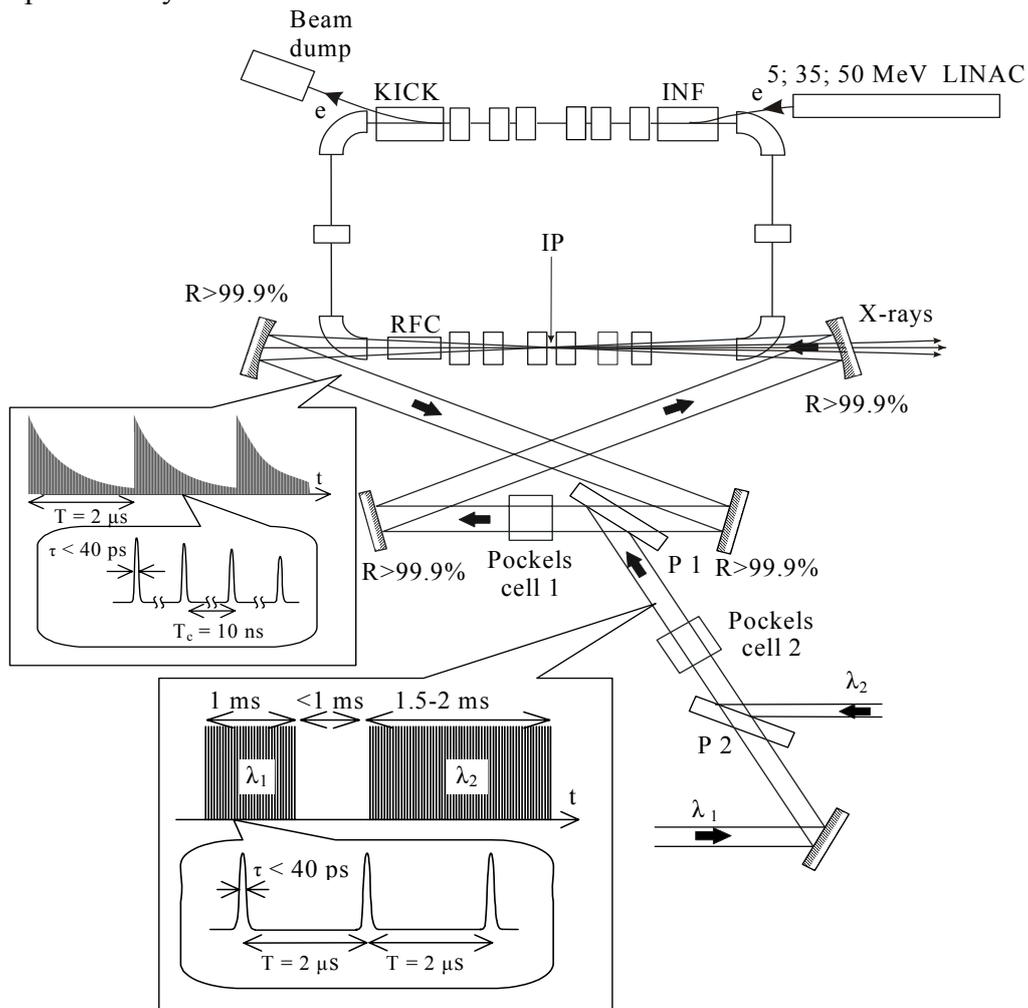


Рис. 3. Схема бихроматического рентгеновского источника для нужд коронарной ангиографии.

б) Яркость.

Яркость источника B_ω определяется через дифференциальный поток $d\Phi(\theta, \varphi, \omega)/(d\Omega d\omega)$, который в свою очередь связан с полным потоком Φ следующим образом:

$$\Phi = \int d\Phi(\theta, \varphi, \omega) = \int \frac{d\Phi(\theta, \varphi, \omega)}{d\Omega d\omega} d\Omega d\omega. \quad (5)$$

По определению яркости:

$$B_\omega(\theta, \varphi, \omega) = \frac{10^{-6}}{s[\text{мм}^2]} \int d\Phi(\theta, \varphi, \omega)_{d\omega=10^{-3}\omega} \left[\frac{\text{фот}}{\text{с} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{мрад}^2} \right], \quad (6)$$

где в знаменателе стоит площадь источника $s=2\pi\sigma_e^2$ [мм²], а интегрирование ограничено интервалом частот $d\omega=10^{-3}\omega$. Чтобы воспользоваться формулой (6), выразим дифференциальный поток томсоновского лазерно-электронного генератора через дифференциальное сечение томсоновского рассеяния:

$$d\Phi = d\Omega \delta(\omega - \omega(\theta)) d\omega \frac{d\sigma_T}{d\Omega} \frac{fN_e N_L n_L n_i}{s}, \quad (7)$$

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} = \frac{3}{2\pi} \sigma_T \gamma^2 \frac{1 + (\gamma\theta)^4}{(1 + \gamma^2 \theta^2)^4}, \quad (8)$$

где $\omega(\theta)$ определена в (3). Наличие δ -функции в выражении (7) предполагает монохроматичность электронного пучка. Подставляя (7) в (6), находим:

$$B_\omega(\theta) = \frac{10^{-6}}{s[\text{мм}^2]} \frac{d\sigma_T}{d\Omega} \frac{fN_e N_L n_L n_i}{s}. \quad (9)$$

Сравнивая полученное выражение с выражением (4), окончательно имеем:

$$B_\omega(\theta) = \frac{10^{-6}}{s[\text{мм}^2]} \frac{1}{\sigma_T} \frac{d\sigma_T}{d\Omega} \Phi. \quad (10)$$

Используя формулу (10), определим яркость лазерно-электронного генератора в направлении движения электронного пучка. Для этого положим в (10) $\theta = 0$ и учтём (8). Тогда имеем:

$$B_\omega(\theta) = \frac{10^{-6}}{s[\text{мм}^2]} \frac{3}{2\pi} \gamma^2 \Phi = \frac{1.2 \cdot 10^{-7}}{s[\text{мм}^2]} \frac{\omega}{\omega_L} \Phi, \quad (11)$$

где Φ – полный рентгеновский поток, определяемый выражением (4).

В таблице 3 сравниваются проектные яркости обсуждавшихся ранее лазерно-электронных генераторов с яркостью рентгеновской трубки, а также яркостью источника СИ третьего поколения при $s=2\pi\sigma_e^2$ (см. (6)). Видно, что лазерно-электронный генератор уступает по яркости 6-8 порядков источникам СИ третьего поколения, но на 4-5 порядков превосходит рентгеновские трубки.

Таблица 3. Яркости источников рентгеновского излучения.

Источник	Рентгеновская трубка [17]	Лазерно-электронный генератор		Источник СИ третьего поколения [17]
		[7]	[14]	
Яркость, фот/(с·мм ² ·мрад ²)	10 ⁸	3,8·10 ¹²	1,5·10 ¹²	10 ¹⁸ – 10 ²⁰

§3. Применения генератора в спектроскопии и науках о материалах.

Как уже отмечалось ранее, лазерно-электронные генераторы открывают перспективы получения перестраиваемого по спектру рентгеновского излучения в сравнительно компактных устройствах. Они могут применяться как для проведения самостоятельных исследований при интенсивности пучка, превышающей интенсивности рентгеновских трубок, так и для разработки новых методик, тестирования оборудования, и подготовки образцов к исследованию в центрах СИ. С другой стороны, фокусировку и монохроматизацию излучения лазерно-электронного генератора можно осуществлять, используя методики, разработанные и испытанные в центрах синхротронного излучения.

В то же время распределение фотонов пучка лазерно-электронного генератора по энергиям и углам обладает рядом особенностей, которые дают возможность проводить некоторые спектральные измерения в прямом пучке, то есть без каких-либо устройств коллимации или монохроматизации [17]. В этом смысле просматривается аналогия с ондуляторным излучением.

Используя выражение (7), спектр лазерно-электронного генератора можно представить в виде:

$$dE_\omega = \hbar\omega d\Phi = \frac{fN_e N_L n_L n_i}{s} \sum_T(\omega) \frac{d\omega}{\omega_{\max}}, \quad \omega_{\max} = 4\gamma^2\omega_L. \quad (12)$$

Спектральная функция $\sum_T(\omega)$ определяется интегрированием (7) по углам:

$$\sum_T(\omega) = \hbar\omega_{\max} \sigma_T x \varphi(x) = \hbar\omega_{\max} \sigma_T \frac{3x}{2} (2x^2 - 2x + 1), \quad x = \frac{\omega}{\omega_{\max}}. \quad (13)$$

Если распределение электронов по энергиям не является монохроматичным, то функция $\varphi(x)$ имеет более сложный вид, однако, интеграл от этой функции остаётся равным единице.

Спектры лазерно-электронного генератора для случая второй гармоники Nd:YAG лазера и двух значений энергии электронов вблизи 15 МэВ и 22 МэВ изображены на рисунке 4.

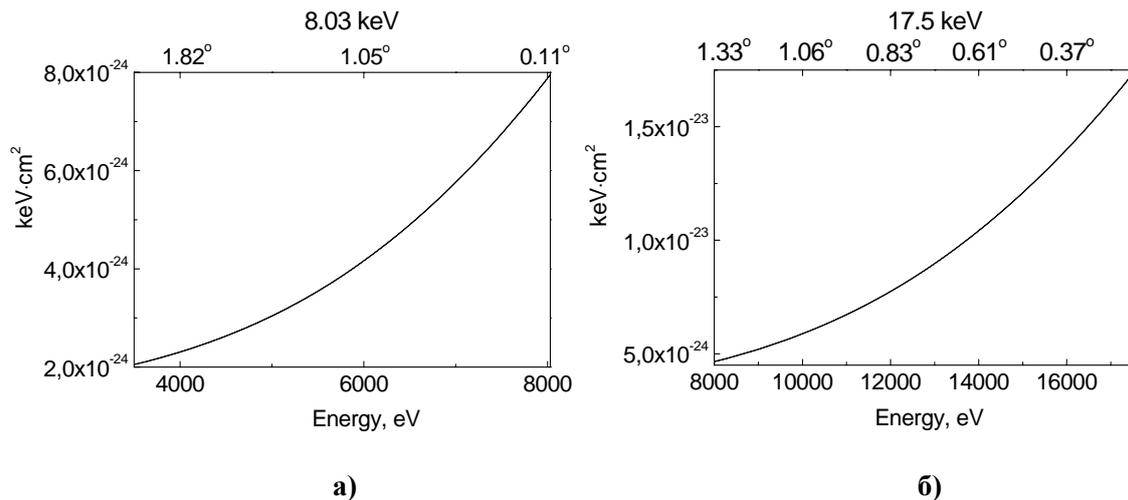


Рис. 4. Спектры лазерно-электронного генератора для двух значений энергии электронов: а) $E_e=15$ МэВ, б) $E_e=22$ МэВ.

Максимальные энергии рентгеновских фотонов соответствуют К – линиям меди (8 кэВ) и молибдена (17,5 кэВ), широко используемых в приложениях. Видно, что спектр имеет резкую коротковолновую границу, и около половины полной энергии сосредоточено в полосе $\delta E/E \approx 0.2$. Особенности, отличающими

его от спектра «белого» СИ, являются также: 1) “треугольная” форма: интенсивность излучения возрастает с ростом энергии до порогового значения $E_0=4\gamma^2\hbar\omega_L$, а затем резко падает; 2) относительно узкий непрерывный интервал энергий фотонов, полуширина которого ~ 1.5 кэВ при пороговой энергии 8.03 кэВ и ~ 3 кэВ при пороговой энергии 17.5 кэВ. Однако приемлемый для измерений интервал интенсивностей значительно шире и составляет $0.1I_0 - I_0$, где I_0 – максимальная интенсивность. Для указанных пороговых значений ему соответствуют области от 5 до 8 кэВ и от 9 до 17.5 кэВ. Таким образом, лазерно-ускорительный генератор создаёт полихроматическое рентгеновское излучение в интервале шириной от нескольких кэВ до ~ 10 кэВ (в зависимости от энергий электронного пучка и лазерного излучения) с иным, по сравнению с «белым» СИ спектральным распределением. При возможности варьировать (указанными выше способами) энергию такого излучения в диапазоне от 4-5 кэВ до 25-30 кэВ на нем могут быть реализованы все основные методы рентгеновского анализа материалов на большинство химических элементов и их соединений.

Другой особенностью излучения лазерно-ускорительного генератора является его дисперсия по энергии внутри угла $1/\gamma$: падение энергии фотонов в указанном интервале интенсивностей от I_0 до $0.1I_0$ соответствует изменению угла рассеяния θ от 0° до 1.2° . С одной стороны, это отличие от параллельного пучка «белого» СИ должно учитываться при разработке рентгеновской оптики (брегговских монохроматоров и многослойных зеркал) для данного типа излучения. С другой стороны, угловая дисперсия по энергии создает возможность для работы в прямом пучке, т.е. монохроматизации излучения с использованием коллиматоров без потерь интенсивности на брегговское отражение. Так, при пороговом значении энергии 17.5 кэВ на удалении 5 м от источника излучения интервалу энергий 12–13 кэВ (30 – 35% от максимальной интенсивности I_0) соответствует интервал расстояний ~ 10 мм, включающий несколько сотен чувствительных элементов стандартного однокоординатного детектора. Благодаря этому возникает принципиальная возможность регистрации EXAFS-спектров в прямом пучке и разработки новых методик дифрактометрии с использованием аномального рассеяния и иных нестандартных рентгенооптических схем.

Несмотря на то, что интенсивность излучения лазерно-ускорительного генератора (10^{12} – 10^{13} фотонов в секунду) значительно уступает лучшим мировым источникам синхротронного излучения 3-го поколения, она всё же достаточно высока для проведения исследований такими стандартными «синхротронными» методами, как рентгенофлуоресцентный анализ, малоугловое рассеяние, рентгеновская дифракция, EXAFS-спектроскопия. Импульсный характер излучения и его регулируемая временная структура создает широкие возможности для динамических измерений. Наконец, перестройка частоты лазерного излучения позволяет получать бихроматические и трихроматические рентгеновские пучки, используемые для достижения элементного контраста в материаловедческих или медицинских исследованиях и для прямого определения фаз рефлексов методом MAD (multiwavelength anomalous diffraction) в белковой кристаллографии.

Перечисленные выше характеристики излучения лазерно-ускорительного генератора создают хорошую перспективу для его оснащения многофункциональным оборудованием, позволяющим реализовать в одном центре все основные методы по исследованию рентгеновских спектров и рентгеновского рассеяния. Учитывая, с одной стороны, конструкцию источника (единственный квази-синхротронный канал либо «пучок» каналов с узкими интервалами энергий), а с другой стороны – большую гибкость предлагаемой

системы, представляется целесообразным оборудовать при таком источнике небольшое число (2-3) заменяемых полифункциональных станций. Такими станциями, перекрывающими набор основных методов, могли бы стать (рис. 5)

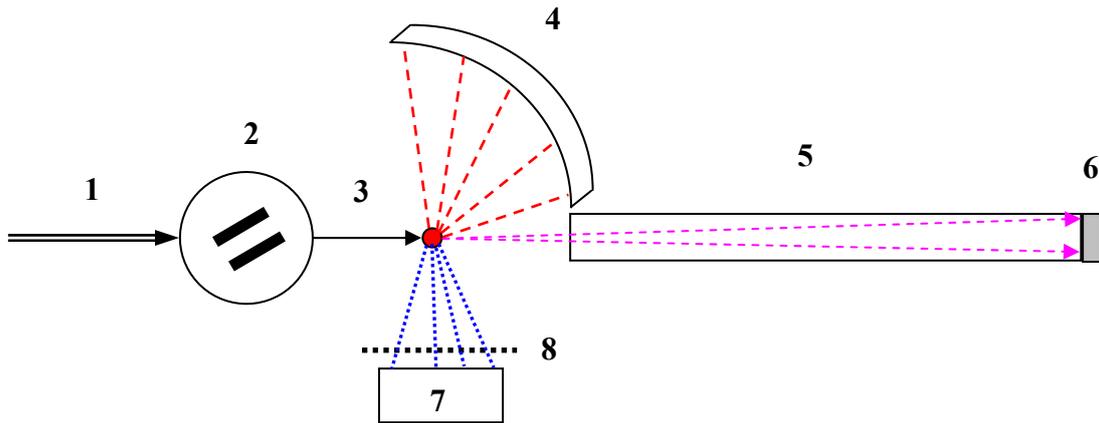
- a) Станция для комбинированного исследования материалов и биологических образцов методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФЛА), малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР, или SAXS: small-angle X-ray scattering), рентгеновского рассеяния в широком угловом диапазоне (WAXS) и анализа тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (XAFS).
- b) Станция для рентгенодифракционного исследования монокристаллов (включая белковые) и порошковых образцов с возможностями съемки как на монохроматическом излучении с варьируемой длиной волны, так и методом Лауэ на полихроматическом пучке.

Оба предлагаемых сочетания методов реализуются в хорошо испытанной «блочной» конструкции станций, обеспечивающей быстрый переход от одного метода к другому и параллельную регистрацию нескольких массивов данных (комбинированные методики SAXS-WAXS, SAXS-XAFS, MAD, аномальное рентгеновское рассеяние и др.). Первая схема (рис. 5a), предназначенная для комбинированного исследования широкого круга материалов с произвольной степенью упорядоченности, позволяет получить многоуровневую информацию о ближнем порядке и элементах дальнего порядка в расположении атомов, а также об упорядочении образца на мезоуровне (распределении наночастиц по диаметру, форме белковых глобул и др.). Вторая схема (рис. 5b) рассчитана на наиболее распространённые в настоящее время методы структурного исследования монокристаллов (включая биополимеры), предполагающие вращение образца на рентгеновском гониометре; эта схема также позволяет регистрировать прецизионные дифрактограммы кристаллических образцов. Съёмка без монохроматора в первой схеме позволяет, в частности, реализовать стандартные синхротронные методы рентгенофлуоресцентного анализа с возбуждением белым пучком, а во второй схеме – методы Лауэ-дифрактометрии. При проектировании станций должен всемерно использоваться опыт аналогичных многофункциональных приборов, работающих на отечественных и зарубежных источниках СИ. В их конструкции следует учитывать особенности углового и спектрального распределения излучения лазерно-ускорительного генератора (см. выше). Указанные блок-схемы при необходимости могут быть оптимизированы для динамических измерений, в которых будет использоваться временная структура генерируемого рентгеновского пучка.

Подобные полностью оснащённые станции позволят унифицировать оборудование, предназначенное для исследований в различных областях, и повысить эффективность использования лазерно-электронного генератора.

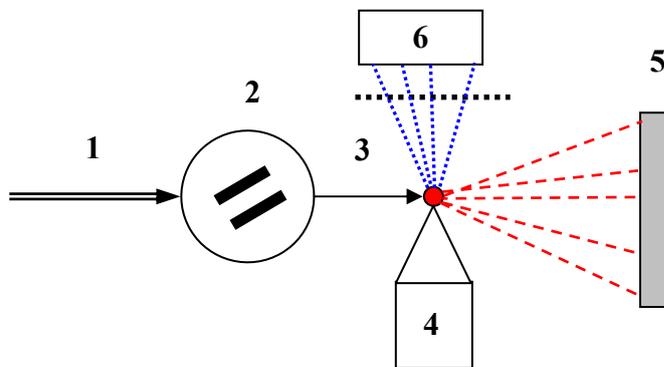
В заключение обсудим возможности исследования биологических и медицинских образцов (*in-vivo*, либо специально приготовленных объектов). В этом случае новый источник предлагает два принципиальных улучшения по сравнению с традиционно используемыми трубками различных конструкций: легко варьируемый спектр с удобством коллимации и увеличенную яркость. Приближение свойств пучка к СИ позволит реализовать традиционные для синхротрона приложения с использованием рентгеновской оптики, такие как рентгеновская микроскопия, фазовая и абсорбционная микро и нанотомография, включая элементный анализ на перестраиваемой длине волны.

а) Станция исследования материалов и биологических образцов (блок-схема)



- образец
- 1 «розовый» рентгеновский пучок
- 2 монохроматор
- 3 монохроматический рентгеновский пучок
- 4 1D-координатный детектор
- 5 вакуумированная камера малоуглового рассеяния
- 6 2D-координатный детектор МУРР
- 7 детектор рентгеновской флуоресценции
- 8 рентгеновский фильтр

б) Станция дифракционного исследования монокристаллов и порошков (блок-схема)



- образец
- 1 «розовый» рентгеновский пучок
- 2 съемный монохроматор
- 3 монохроматический или «розовый» рентгеновский пучок
- 4 гониометр
- 5 2D-координатный детектор
- 6 детектор рентгеновской флуоресценции; фильтр

Рис. 5. Блок-схемы станций

а) комбинированного исследования образцов методами SAXS/ WAXS/ XAFS/ РФЛА, б) дифракционного исследования монокристаллов и порошков (включая белковую кристаллографию).

Вместе с тем, научная станция, оснащенная этим источником, несмотря на меньшую по сравнению с синхротроном яркость, будет лишена основного его недостатка: высокой стоимости эксперимента и дефицита времени, доступного пользователю и не позволяющего проводить серию экспериментов на большом числе образцов. Кроме того, достаточно компактный размер станции позволит располагать ее в уже существующих научных и медицинских центрах. Установка станции в госпитале, к примеру, может обеспечить микротомографию раковых биопсий в реальном времени прямо в ходе операции, что до настоящего времени было невозможно осуществить из-за длительности процедуры. Яркость и направленность источника также может уменьшить радиационную нагрузку при ангиографии.

Количество фотонов, испускаемых за вспышку $\sim 10^{10}$ - 10^{12} , достаточно для получения качественной теневой проекции даже при использовании субмикронного разрешения, а заявленная частота 30 Гц позволяет набрать необходимое для микротомографии число проекций в течение нескольких секунд. Это открывает широкие перспективы в изучении быстропротекающих процессов, к примеру, позволит использовать быстро выводимые контрастирующие вещества при исследовании живых объектов.

Данная работа поддержана грантом РФФИ 05-02-17162.

Список литературы.

1. F.R.Arutyunian, V.Tumanian, Phys.Letters, 4 (1963), 176.
2. R.H.Milburn, Phys. Rev. Letters, 10 (1963), 176.
3. O.Kulikov et al., Phys. Rev., 138 (1964), 344.
4. I.F.Ginsburg, G.L.Kotkin, V.G.Serbo, V.Telnov, Nucl. Instr. and Meth., 205, (1983), 77.
5. G.M.Gurevich, L.E.Lazareva, V.M.Mazur, S.Yu.Merkulov, G.V.Soloduchov, V.A.Tyutin, Nucl. Phys. A, 351 (1981), 257.
6. C.Schaerf, "Polarized Gamma-Ray Beams", Physics Today, pp. 44-50, Aug. 2005.
7. R.J.Loewen, SLAC-R-632, June 2003, Ph.D.thesis, Stanford University, Stanford CA.
8. A.Agafonov, V.Androsov, J.I.M.Botman, V.Bulyak, A.Dovbnya, I.Drebot, P.Gladkikh, V.Grevtsev, Yu.Grigor'ev, A.Gvozd, V.Ivashchenko, I.Karnaukhov, N.Kovalyova, V.Kozin, V.Lapshin, A.Lebedev, V.Lyashchenko, V.Markov, N.Mocheshnikov, V.Molodkin, A.Mytsykov, I.Neklyudov, F.Peev, A.Rezaev, A.Shcherbakov, V.Skirda, V.Skomorokhov, A.Shpak, R.Tatchyn, Yu.Telegin, V.Trotsenko, A.Zelinsky, O.Zvonar'ova, "Status of Kharkov x-ray generator NESTOR", Proc. SPIE, 5917, pp.97-104, 2005.
9. F.E.Carroll, "Tunable Monochromatic X Rays: A New Paradigm in Medicine", AJR 179, pp 583-590, 2002.
10. W.J.Brown, S.G.Anderson, C.P.J.Barty, S.M.Betts, R.Booth, J.K.Crane, R.R.Cross, D.N.Fittinghoff, D.J.Gibson, F.V.Hartemann, E.P.Hartouni, J.Kuba, G.P.Le Sage, D.R.Slaughter, A.M.Tremaine, A.J.Wootton, J.B.Rosenzweig and P.T.Springer, "Experimental characterization of an ultrafast Thomson scattering x-ray source with three-dimensional time and frequency-domain analysis", Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 7, 060702, pp. 1 – 12, 2004.
11. K.Dobashi, A.Fukasawa, M.Uesaka, H.Iijima, T.Imai, F.Sakamoto, F.Ebina, J.Urakawa, M.Akemoto, T.Higo, H.Hayano, "Design of Compact Monochromatic

- Tunable Hard X-Ray Source Based on X-band Linac*”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No.4A , pp.1999-2005, 2005/
12. T.Yanagida, T.Nakajyo, S.Ito, F.Sakai, “*Development of high-brightness hard x-ray source by Laser-Compton scattering*”, Proc. SPIE, Vol. 5918, p. 231-238, 2005.
 13. C.Gohle, T.Udem, M.Herrmann, J.Rauschenberger, R.Holzwarth, H.A.Schuessler, F.Krausz, T.W.Hansch, “*A frequency comb in the extreme ultraviolet*”, Nature,436, 234-237, 2005.
 14. M.V.Gorbunkov, V.G.Tunkin,E.G.Bessonov, R.M.Fechtchenko, I.A.Artyukov, Yu.V.Shabalin, P.V.Kostyukov, Yu.Ya.Maslova, A.V.Poseryaev, V.I.Shvedunov, A.V.Vinogradov, B.S.Ishkhanov, “*Proposal of a Compact Repetitive Dichromatic X-ray Generator with Millisecond Duty Cycle for Medical Applications*“, Proc. SPIE, 5919, OU1-OU6, 2005.
 15. М.В.Горбунков, Л.А.Фомин, Ю.В.Шабалин, “*Эффект стабилизации излучения и генерации пикосекундного излучения Nd-YAG лазеров при использовании нелинейного зеркала на кристалле КТР*”, Краткие сообщения по физике ФИАН, №12, стр.14-21, 2000.
 16. E.G. Bessonov, R.M. Fechtchenko, M.V. Gorbunkov, A.V. Vinogradov, „*The Analysis of Laser Electron X-Ray Generator based on Thomson Scattering*“, X-ray lasers 2004, Proc. of the 9th International Conference on X-Ray Lasers, Institute of Physics, Conference Series, #186, pp. 435-441, IOP, 2005.
 17. H.Winick, SLAC-PUB-777 1, March 1998.
 18. T.Kaneyasu, M.Uesaka, K.Dobashi, M.Torikoshi, “*Dual-energy X-ray CT by Compton scattering hard X-ray source*”, Proc. of 2005 Particle Accelerator Conference.

Игорь Анатольевич Артюков¹
Евгений Григорьевич Бессонов¹
Александр Владимирович Виноградов¹
Михаил Валерьевич Горбунков¹
Ян Витаутасович Зубавичус²
Борис Саркисович Ишханов³
Павел Владимирович Кострюков⁴
Юлия Ярославна Маслова¹
Николай Леонидович Попов¹
Антон Владимирович Посеряев³
Андрей Александрович Постнов¹
Юрий Леонидович Словохотов^{2,5}
Владимир Григорьевич Тункин⁴
Юрий Алексеевич Успенский¹
Руслан Михайлович Фещенко¹
Юрий Владимирович Шабалин¹
Василий Иванович Шведун³

¹Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский проспект 53

²Институт элементоорганических соединений РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова 28

³Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, 119899, Москва, Ленинские горы

⁴Международный лазерный центр МГУ, 119899, Москва, Ленинские горы

⁵Химический факультет МГУ, 119899, Москва, Ленинские горы

ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 7/806

Работа поступила в ОНТИ 23.05.2006 г.