

УДК 621.384.6

Источник рентгеновского излучения на базе многооборотного ускорителя-рекуператора*

Н.А. ВИНОКУРОВ, Я.В. ГЕТМАНОВ, Г.Н. КУЛИПАНОВ, О.А. ШЕВЧЕНКО

Перспективы использования многооборотных ускорителей-рекуператоров для создания современных источников излучения выглядят многообещающе благодаря относительно более низкой стоимости установки. В настоящее время в мире существует только один многооборотный ускоритель-рекуператор – Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ). На сегодняшний день ЛСЭ работает в двухоборотном либо однооборотном режимах [1]. Концепция источника излучения на основе многооборотного ускорителя-рекуператора MAPC (Multiturn Accelerator-recuperator Radiation Source – MARS) была предложена в 1997 году Г.Н. Кулипановым, А.Н. Скринским и Н.А. Винокуровым. Использование ускорителя-рекуператора с двумя разделенными ускоряющими структурами позволяет избавиться от основного недостатка схемы с одной ускоряющей структурой – прохождения двух электронных пучков через одни и те же магнитные структуры поворотов. В статье обсуждается возможность создания источника излучения четвертого поколения на основе такого многооборотного ускорителя-рекуператора.

Ключевые слова: источники синхротронного излучения, ускорители-рекуператоры.

ВВЕДЕНИЕ

В последние 30 лет развитие источников синхротронного излучения (СИ) преследует различные цели. Наиболее важными являются повышение спектральной яркости и энергии кванта излучения, использование особенных свойств СИ (когерентность, поляризация, временная структура и т. д.). Кроме того, очень важным является то, что каждым источником СИ, при среднем времени работы около 7000 часов в год, может пользоваться много исследовательских групп (до 60-ти) из различных областей науки.

В настоящее время источники СИ 3-го поколения являются эффективными установками для генерации новых знаний, технологий и материалов.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Существующие и создаваемые источники синхротронного излучения третьего поколения (ESRF, APS, Spring-8, SLS, DIAMOND, SOLEIL, ALBA и др.) являются эффективными фабриками производства новых знаний, технологий, материалов. Последнее десятилетие активно обсуждается создание рентгеновских источников синхротронного излучения четвертого поколения. Мировое сообщество выработало требования к этим источникам и предложило несколько путей создания таких источников. Эти требования таковы [4].

- Полная пространственная когерентность;
- максимально достижимая временная когерентность ($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-4}$) без дополнительной монохроматизации;
- средняя яркость источника должна превышать $10^{23} - 10^{24}$ фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ($\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%$)⁻¹;
- поток фотонов из источника синхротронного излучения четвертого поколения должен быть на уровне потока из источников третьего поколения;

* Статья получена 29 сентября 2012 г.

- для ряда экспериментов требуется высокая пиковая яркость
 $\sim 10^{33}$ фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2} (\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%)^{-1}$;
- длина электронного сгустка до 1 пс, а при использовании специальной техники – короче 100 фс;
- высокая долговременная стабильность; генерация линейно и циркулярно поляризованного излучения с быстрым переключением типа и знака поляризации; постоянный тепловой поток на вакуумные камеры и оптику;
- одновременное обслуживание большого количества экспериментальных групп.

За последние 30 лет яркость рентгеновских источников СИ, основанных на базе накопителей, возросла в 10^9 раз. Тем не менее, на самых современных источниках, поток когерентных квантов составляет только 10^{-3} от общего потока. Из-за этого рентгеновская голография, даже после успешных демонстраций, не стала эффективным методом исследования структуры реальных объектов, большинство из которых имеют некристаллическую природу. Даже для кристаллических структур чрезвычайно важна рентгеновская спекл-спектроскопия, которая возможна только при когерентном освещении. Поэтому из всех требований к источникам синхротронного излучения четвёртого поколения наиболее важным является получение полностью пространственно когерентного потока квантов при сохранении величины потока равным тому, что дают источники СИ третьего поколения. Получение ондуляторного излучения с монохроматичностью на уровне 10^{-3} – 10^{-4} без использования монохроматоров, которые, как правило, портят пространственную когерентность пучка, также очень важно.

Невозможно удовлетворить все требования, предъявляемые к источникам рентгеновского излучения четвёртого поколения, используя только один вид источников. Высокую пиковую яркость и фемтосекундную длительность импульсов излучения можно получать, используя рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) на основе линейного ускорителя с высоким импульсным током ($I_p > 1$ кА). Первый такой ЛСЭ, LCLS, уже заработал в США в апреле 2009 года, выдавая рентгеновские импульсы длительностью 10 фс на длине волны около 1 Å, и второй – Spring-8 – начал работать в 2011 году. В ближайшие годы заработают рентгеновские ЛСЭ в Корее и Европе.

Остальные требования легче и дешевле реализуются при использовании излучения из длинных ондуляторов, установленных на ускоритель-рекуператор. Для генерации полностью пространственно когерентного ондуляторного излучения с длиной волны λ необходимо уменьшать эмиттанс электронного пучка на энергии 5–6 ГэВ до дифракционного предела $\varepsilon_{x,z} < \lambda / 4\pi \approx 10^{-11}$ м-рад (при $\lambda \sim 1$ Å). Для этого заряд в одном сгустке не должен превышать 10^{-11} Кл. На частоте 1.3 ГГц это соответствует среднему току 10 мА. Решения, предлагаемые в некоторых проектах однооборотных ускорителей-рекуператоров – использование тока до 100 мА для сохранения потока фотонов – выглядят не оптимальными, так как при таком повышении тока яркость не повышается, а даже иногда понижается. Для компенсации уменьшения тока, по сравнению с источниками третьего поколения, следует использовать длинные ондуляторы. В этом случае решаются проблемы полной пространственной когерентности и сохранения потока фотонов на уровне 3-го поколения.

2. СХЕМА УСКОРИТЕЛЯ

Концепция ускорителя-рекуператора с одной ускоряющей структурой была предложена для реализации полностью пространственно-когерентного источника рентгеновского излучения в 1997 году [2, 5]. Основным недостатком данной схемы является то, что два электронных пучка (ускоряемый и замедляемый) одновременно проходят через каждую магнитную дорожку за исключением последней. Из-за этого в ондуляторах, установленных на дорожках с низкой энергией, одновременно генерируется излучение двумя разными пучками электронов (ускоряемым и замедляемым). Более того, это осложняет управление электронным пучком. Поэтому было предложено использовать схему с двумя ускоряющими секциями и отдельными магнитными поворотами (арками) для ускоряемого и замедляемого пучков [3, 6].

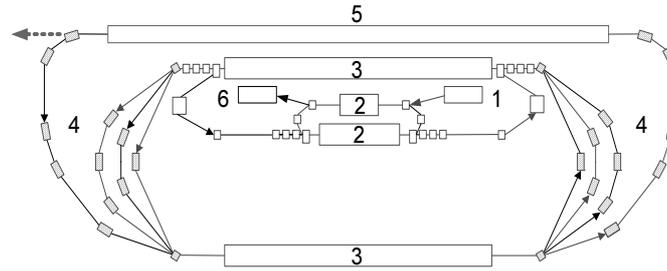


Рис. 1. Ускоритель-рекуператор с двумя ускоряющими секциями

Принцип действия ускорителя-рекуператора показан на рис. 1. Электроны из инжектора 1 проходят через промежуточные высокочастотные (ВЧ) ускоряющие структуры 2 и 180-градусные повороты, затем попадают в первую основную ВЧ ускоряющую структуру 3. Магнитная система 4 направляет ускоренные частицы во вторую основную ВЧ ускоряющую структуру 3. После двух проходов через каждую из двух основных ускоряющих структур 3 электроны приобретают конечную энергию (5.6 ГэВ) и проходят через ондулятор 5. Искользованные электроны замедляются в тех же ускоряющих структурах, где они были ускорены, возвращая туда энергию. При этом вне ускоряющих структур ускоряемый и замедляемый пучки проходят по разным электронооптическим каналам. Замедленные частицы направляются в поглотитель 6.

3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ УСТАНОВКИ

Инжектор. Каскадная схема инжектора содержит две предварительные ускоряющие секции, разгоняющие электроны до энергий 50 МэВ и 400 МэВ. Эта, относительно большая энергия инжекции, упрощает фокусировку частиц с различными энергиями, пролетающими одновременно через ускоряющую структуру. Более того, это повышает пороговый ток поперечной неустойчивости (известной как beam breakup, или ВВU). По той же причине используются две ассиметричные ускоряющие структуры (0.7 ГэВ и 1.9 ГэВ). Использование каскадной инжекции и рекуперации энергии понижает радиационную опасность и исключает наведенную радиоактивность благодаря низкой энергии электронов в поглотителе (5–8 МэВ). Это приводит к снижению стоимости здания и источников питания инжектора.

Ондуляторы. Как уже упоминалось, чтобы достичь полной пространственной когерентности с сохранением потока фотонов на уровне третьего поколения источников излучения, необходимо использовать длинные ондуляторы. Для одновременной работы нескольких экспериментальных групп схема с одним ондулятором (рис. 1) может быть дополнена установкой длинных ондуляторов в поворотные арки 4 (рис. 2). Таким образом, в установке содержится 7 ондуляторов на энергию 5.6 ГэВ и по 4 на энергии 3.7 ГэВ, 3 ГэВ и 1.1 ГэВ. Чтобы облегчить вывод излучения, магнитные арки разведены одновременно по горизонтали и вертикали (рис. 2).

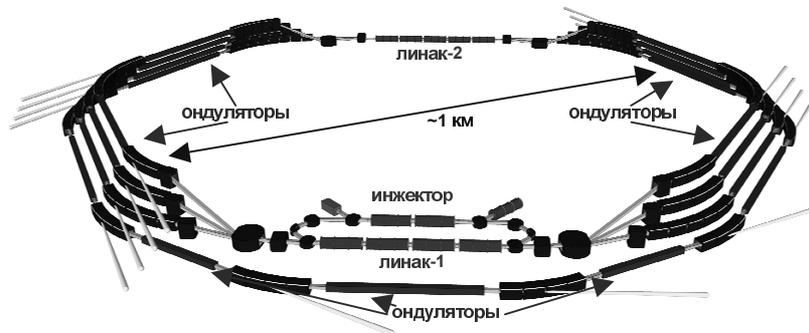


Рис. 2. Рентгеновский источник излучения четвертого поколения МАРС

Сравнение параметров излучения MARS ($I = 10$ мА) и лучшего из существующих источников СИ третьего поколения Spring-8 ($I = 100$ мА) представлено в табл. 1.

Таблица 1

установки	Число периодов ондулятора	Количество выводов излучения	Яркость фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$)	Поток фот/с ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$)
MARS	10^2	48	10^{22}	$7.7 \cdot 10^{13}$
	10^3	12	10^{23}	$7.7 \cdot 10^{14}$
	10^4	4	10^{24}	$7.7 \cdot 10^{15}$
Spring-8	–	23	10^{16}	10^{13}
	130	34	$3 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{15}$
	780	4	10^{21}	$1.2 \cdot 10^{16}$

Магнитная структура. Магнитная структура каждой дорожки (4 на рис. 1) состоит из шести шестидесятиградусных ахроматических поворотов с 26 магнитами в каждом. Магнитные элементы образуют FODO структуру с подавителями дисперсии (рис. 3).

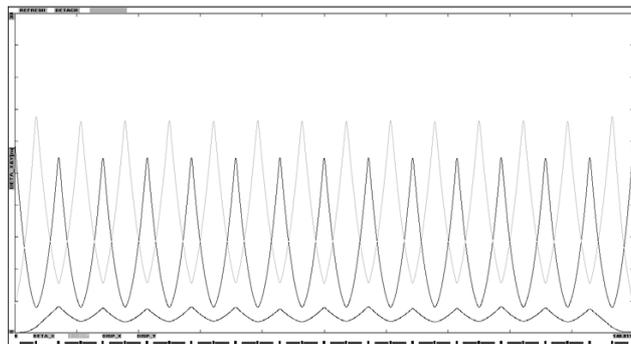


Рис. 3. Оптические функции шестидесятиградусного поворота

Чтобы квантовые флуктуации синхротронного излучения не приводили к значительному росту энергетического разброса и поперечного эмиттанса, радиус последнего оборота должен быть более 60 м. Для упрощения производства элементов вакуумных камер такой же радиус используется и для других орбит. При максимальной энергии (последняя орбита) рост горизонтального эмиттанса ограничивает «инвариант» дисперсионной функции:

$$\gamma_T \eta^2 + 2\alpha_T \eta \eta' + \beta \eta'^2 < 3 \text{ см},$$

где $\gamma_T, \alpha_T, \beta$ – параметры Твисса и η – горизонтальная дисперсионная функция.

Продольное движение должно обеспечивать низкий энергетический разброс ($2 \cdot 10^{-5}$) и малую (менее 0.1 пс) длину сгустка. Для этого необходим продольный эмиттанс менее 5 кэВ·пс. Кроме того, продольная фокусировка должна обеспечивать короткие сгустки в последних арках. Поэтому повороты между линаками делаются неизохронными. Ограничение «инварианта» горизонтальной дисперсии также ограничивает продольную дисперсию $R_{56} = \pi \bar{\eta} / 3$ (0.18 м для шестидесятиградусных поворотов последнего оборота). При энергетическом разбросе $2 \cdot 10^{-5}$ это соответствует удлинению пучка всего на 11 фс. Это значит, что два последних ставосьмидесятиградусных поворота не могут быть использованы для группировки. На первых двух поворотах прирост эмиттанса из-за квантовых флуктуаций меньше, поэтому возможно повысить поперечную, а следовательно, и продольную дисперсию.

ВЧ структура. Для получения пучка с энергией 5.6 ГэВ используются два основных сверхпроводящих линейных ускорителя с максимальными наборами энергии 0.8 ГэВ и 2 ГэВ

на каждом и два вспомогательных – с максимальными наборами энергии 400 МэВ и 50 МэВ. Одновременно через каждый основной линак проходят 4 электронных пучка (два ускоряемых и два тормозящихся) со средним током 10 мА. Поэтому из-за такого высокого среднего тока основной задачей проектирования ускорителя является не достижение высокого темпа ускорения, а обеспечение стабильности пучка.

Так как магнитная структура поворотов не изохронна, то проявляются все три типа неустойчивости, связанных с взаимодействием пучка и резонатора (нагрузка резонатора пучком, поперечные и продольные неустойчивости, связанные с возбуждением высших мод резонатора). В простейшем случае однорезонаторной модели пороговый ток поперечной неустойчивости может быть оценен как [7]

$$I_{th} \approx 0.14 I_A \frac{\lambda_{RF} \sqrt{\gamma_1 \gamma_2}}{Q \sqrt{\beta_1 \beta_2}},$$

где $I_A = 17$ кА, γ_1 и γ_2 – Лоренц-факторы электронов на первом и втором проходах через резонатор, а β_1 и β_2 – соответствующие бета-функции пучков. Таким образом, для тока 10 мА, $\lambda_{RF} = 0.23$ м и добротности несимметричной моды $Q = 10^6$ достаточно иметь $\sqrt{\beta_1 \beta_2} / \sqrt{\gamma_1 \gamma_2} < 0.06$ м. При энергиях на входе в первую основную ускоряющую структуру 400 МэВ и 3 ГэВ получается $\sqrt{\beta_1 \beta_2} < 120$ м, что легко достижимо.

В случае взаимодействия пучков электронов и основной ускоряющей моды резонатора может развиваться продольная неустойчивость пучка из-за неизохронных поворотов между ускоряющими структурами. Тогда, в однорезонаторном приближении, необходимое условие продольной устойчивости [8]

$$\epsilon_{p1} I \sin(2\Phi_1) \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} S_{4N-2n-1,2k} + \epsilon_{p2} I \sin(2\Phi_2) \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} S_{4N-2n-2,2k+1} < \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2}.$$

Здесь I – средний ток пучка, S_{nk} элемент транспортной матрицы R_{56} между k -м и n -м проходом через ускоряющие структуры, ρ и Q – характеристические импедансы и нагруженные добротности фундаментальной моды (ТМ₀₁₀), $\Phi_{1,2}$ – разности фаз соответствующих ускоряющих напряжений и токов пучка. Пороговый ток зависит от фаз ускорения $\Phi_{1,2}$, которые также определяются условиями продольной фокусировки. Численное моделирование показывает, что существуют стабильные области, в которых выполняются условия продольной устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование длинных ондуляторов и высококачественного электронного пучка в ускорителе-рекуператоре позволяет создать рентгеновский источник излучения четвертого поколения. Ускоряющие структуры и большинство основных элементов установки уже протестированы во многих лабораториях (Jefferson Laboratory, DESY, MAMI, LEP, Budker INP, KEK, MAX). На сегодняшний день не существует каких-либо физических проблем в разработке источника излучения четвертого поколения со средним током 10 мА. Основной проблемой является стоимость такого источника.

Основные идеи проекта MARCS позволяют значительно снизить стоимость установки и расход энергии, обеспечивая при этом одновременную работу нескольких пользователей. Эти идеи просты и понятны.

1. Эмиттанс электронного пучка с энергией $E = 5 - 6$ ГэВ меньше, чем 10^{-11} м·рад, что соответствует нормализованному эмиттансу $\epsilon_n < 10^{-7}$ м·рад.

2. Заряд сгустка не должен превышать 10^{-11} Кл, что определяет величину среднего тока ускорителя 10 мА.

3. Поток фотонов из источника пропорционален среднему току пучка и количеству излучателей N . Чтобы компенсировать уменьшение тока в 10–50 раз, необходимо использовать излучение из длинных ондуляторов и виглеров с числом периодов $N > 100$.

4. Чтобы обеспечить низкий уровень радиационной опасности и исключить наведенную радиоактивность, энергия пучка в поглотителе не должна превышать 5–8 МэВ.

5. Чтобы обеспечить условия одновременного движения электронов с различными энергиями в ускоряющих (тормозящих) ВЧ-структурах, необходимо использовать схему каскадной инжекции.

6. Для одновременной работы нескольких пользователей может использоваться схема с разделенными ускоряющими структурами. Это исключает основной недостаток схемы с одиночным линаком, в которой ускоряемые и замедляемые пучки создают два источника излучения в каждом ондуляторе, а также облегчает настройку и управление пучком.

7. Магнитная структура должна содержать длинные пустые промежутки ($L \sim 200$ м) для установки в них ондуляторов с числом периодов $Nu = 10^2 - 10^4$.

8. Энергетический разброс электронного пучка в ондуляторах не должен превышать $\Delta E/E = 10^{-4}$.

9. Для подавления квантовых флуктуаций синхротронного излучения радиус поворотов магнитной системы должен быть не менее 60 м.

Основные параметры ускорителя-рекуператора представлены в табл. 2, а схема в масштабе – на рис. 4.

Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ и финансовой поддержке Минобрнауки России.

Таблица 2

Энергия	5.6 ГэВ
Средний ток	10 мА
Пиковый ток	10 А
Нормализованный эмиттанс	0.1 мкм
Относительный энергетический разброс	$2.2 \cdot 10^{-5}$
Источник синхротронного излучения	19 ондуляторов ($Nu = 10^2 - 10^4$)
Размер	1×1 км

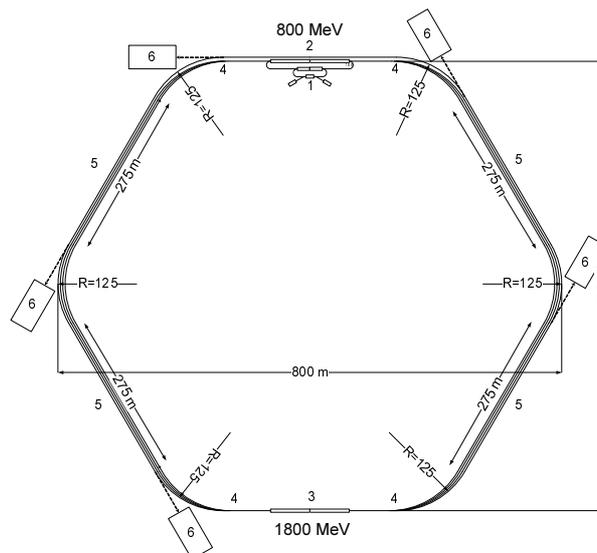


Рис. 4. Схема ускорителя-рекуператора МАРС в масштабе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Vinokurov N.A.** Novosibirsk Free Electron Laser Facility: Two-orbit ERL with Two FELs / N.A. Vinokurov, E.N. Dementyev, B.A. Dovzhenko et al. – Proc. IPAC'10. – 2010. – P. 2427–2430.
- [2] **Kulipanov G.N.** Synchrotron light sources and recent development of accelerator technology / G.N. Kulipanov, A.N. Skrinisky, N.A. Vinokurov // J. of Synchrotron Radiation. – 1998. – Vol. 5 pt. 3. – P. 176–178; MARS – recirculator-based diffraction limited X-ray source, Budker INP. – 1997, preprint No 97-103.
- [3] **Douglas D.** A Generic Energy-Recovering Bisected Asymmetric Linac (GERBAL) / D. Douglas // ICFA BD-NI 26. – 2001. – P. 40–45.
- [4] Scientific Needs for Future X-Ray Sources in the U.S., A White Paper, LBNL, SLAC, 2008.
- [5] **Kulipanov G.N.** MARS a project of the diffraction-limited fourth generation x-ray source based on supermicrotron / G.N. Kulipanov, A.N. Skrinisky, N.A. Vinokurov // Nuclear Instruments and Methods. – 2001. – P. 16–20.
- [6] **Kulipanov G.N.** Multi-passes accelerator recuperator (MARS) as coherent x-ray SR source / G.N. Kulipanov, A.N. Skrinisky, N.A. Vinokurov. – Daegu, Korea, 2006. – P. 234–239.
- [7] **Vinokurov N.A.** Critical Issues for High-Power FEL Based on Microtron Recuperator / N.A. Vinokurov, A.A. Zholents, W.M. Fawley, K.-J. Kim // Electron Out-Coupling Scheme, proc. SPIE 2988. – 1997. – P. 221–231.
- [8] **Getmanov Ya.V.** Longitudinal Stability of ERL with Two Accelerating RF Structures / Ya.V. Getmanov, O.A. Shevchenko, N.A. Vinokurov // proc. IPAC'11. – 2011. – P. 1509–1511.

Винокуров Николай Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Основное направление научных исследований: физика ускорителей заряженных частиц, лазеры на свободных электронах. Имеет более 200 публикаций. E-mail: N.A.Vinokurov@inp.nsk.su

Кулипанов Геннадий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, действительный член РАН, заместитель директора института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Основное направление научных исследований: физика ускорителей заряженных частиц, источники синхротронного излучения. Имеет более 300 публикаций. E-mail: G.N.Kulipanov@inp.nsk.su

Шевченко Олег Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Основное направление научных исследований: физика ускорителей заряженных частиц, лазеры на свободных электронах. Имеет более 100 публикаций. E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

Гетманов Ярослав Владимирович, аспирант института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Основное направление научных исследований: физика ускорителей заряженных частиц, лазеры на свободных электронах. Имеет более 10 публикаций. E-mail: y_getmanov@mail.ru

Ya.V. Getmanov, G.N. Kulipanov, O.A. Shevchenko, N.A. Vinokurov

Multiturn energy-recovery linac x-ray source (MARS) feasibility study

Multiturn energy recovery linacs (ERL) looks very promising for making modern synchrotron radiation sources, being less expensive and more flexible, but have serious intrinsic problems. At this time only one multiturn ERL exists. This Novosibirsk ERL operates with two orbits and two free electron lasers now. The conception of Multiturn Accelerator-recuperator Radiation Source (MARS) was proposed in 1997 by G.N. Kulipanov, A.N. Skrinisky and N.A. Vinokurov. The use of the ERL with two separated accelerating structures allows to exclude main disadvantages of scheme with one linac, such as the pass of electron bunches with different energies through the same magnetic arcs. The feasibility study for such ERL-based high brightness x-ray source is presented.

Key words: synchrotron radiation sources, energy-recovery linacs.