

УСТНЫЙ ВЫПУСК ЖУРНАЛА "УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК"

Изобретение В.Л. Гинзбургом ондуляторов и их роль в современных источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах

Г.Н. Кулипанов

Одним из основных элементов современных источников синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) являются ондуляторы — периодические магнитные структуры, предложенные впервые В.Л. Гинзбургом в 1947 г. для генерации электромагнитного излучения с помощью релятивистских электронов. В статье кратко представлена история развития трех поколений источников рентгеновского синхротронного излучения, создаваемых на базе накопителей электронов с использованием вигглеров и ондуляторов. Обсуждаются два варианта следующего поколения полностью пространственно когерентных источников рентгеновского излучения, на основе использования длинных ондуляторов и ускорителей-рекуператоров или ЛСЭ, создающихся на базе линейных ускорителей. Приведено описание созданного в последние годы Новосибирского терагерцевого ЛСЭ, являющегося самым мощным в мире источником терагерцевого излучения. Именно генерация электромагнитного излучения в этом диапазоне и обсуждалась В.Л. Гинзбургом в 1947 г.

PACS numbers: 07.85. -m, 07.85.Qe, 41.60.Cr

Содержание

1. Введение (384).
 2. Немного истории (384).
 3. Что такое ондуляторы и вигглеры? (386).
3.1. Ондуляторный режим ($K \ll 1$). 3.2. Режим генерации гармоник ондуляторного излучения ($K \gtrsim 1$). 3.3. Работа в режиме вигглера ($K \gg 1$).
 4. Ондуляторы и развитие источников рентгеновского синхротронного излучения (387).
 5. Ондуляторы и развитие лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) (390).
 6. Заключение (392).
- Список литературы (392).

1. Введение

Несколько лет назад, прочитав только что изданную книгу В.Л. Гинзбурга *Автобиография*, я обратился к нему после одного из заседаний редколлегии журнала *УФН*, заметив, что во многих своих книгах он очень

трепетно относится к описанию открытого им переходного излучения [1], однако совсем не упоминает о своей работе [2], в которой впервые было рассмотрено излучение релятивистских электронов в периодических структурах (сейчас такие структуры обычно называют ондуляторами, а излучение — ондуляторным). Конечно, переходное излучение, вызываемое равномерно и прямолинейно движущимся электроном, — физически очень красиво само по себе, но в последние 25 лет ондуляторы — это основа развития современных источников синхротронного излучения (СИ) и лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Такие установки сейчас являются, в свою очередь, инфраструктурой широкого класса научных исследований: это и физика твердого тела, и физика поверхности, и высокотемпературная сверхпроводимость, и биология и многое, многое из того, что, в частности, указано в знаменитом списке В.Л. Гинзбурга "особо важных и интересных проблем". Выслушав меня, Виталий Лазаревич подумал и сказал: "А вот Вы и напишите об этом". Поэтому мое сегодняшнее выступление фактически ответ на его просьбу.

2. Немного истории

Свое выступление я хочу начать с демонстрации изображения Крабовидной туманности, представленного на рис. 1а. С одной стороны, изучение Крабовидной туманности было очень важным для развития астрофизики, поэтому Виталий Лазаревич очень часто обращается к этому объекту во многих статьях и книгах. С другой стороны, рождение Крабовидной туманности связано со

Г.Н. Кулипанов. Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, просп. академика Лаврентьева 11,
Российская Федерация
Тел. (383) 339-44-98, 330-60-30
E-mail: G.N.Kulipanov@inp.nsk.su

Статья поступила 12 февраля 2007 г.

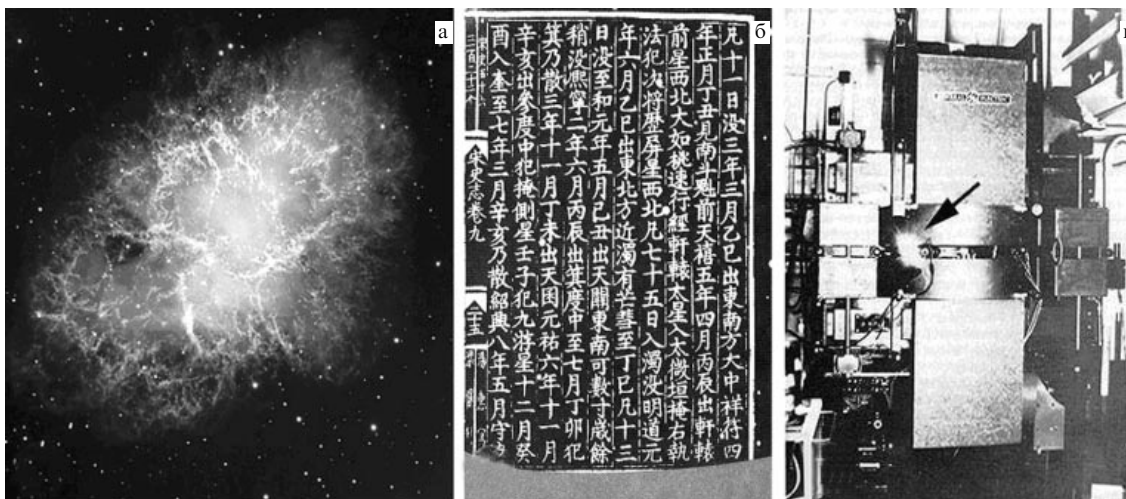


Рис. 1. (а) Фотография Крабовидной туманности — космического источника синхротронного излучения. (б) Документальная запись китайских монахов о взрыве в 1054 г. сверхновой, на месте которой образовалась Крабовидная туманность. (в) Фотография первого "рукотворного" СИ, полученного на электронном синхротроне компании "Дженерал электрик" (1947 г.).

взрывом сверхновой в 1054 г. — факт описанный и задокументированный в хрониках японскими и китайскими монахами (рис. 1б), наблюдавшими появление новой яркой "звезды-гостя", которая три недели была видна днем и в течение года являлась самой яркой звездой на ночном небосклоне. В середине прошлого века, т.е. через девятьсот лет, было высказано предположение, впоследствии подтвержденное экспериментально, что свечение Крабовидной туманности — это синхротронное излучение ультрарелятивистских электронов в межзвездных магнитных полях.

На рисунке 1в приведена фотография, на которой видно рукотворное синхротронное излучение, впервые наблюдавшееся в 1947 г. на одном из первых ускорителей электронов — синхротроне, сделанном компанией "Дженерал электрик" в США. Несколькоми годами позднее синхротронное излучение наблюдалось в Физическом институте АН СССР на первых советских синхротронах.

Между двумя событиями, которые иллюстрируются рис. 1а и 1в, прошло девятьсот лет. Это время было необходимо человечеству, с одной стороны, для того чтобы понять, что свечение Крабовидной туманности — это синхротронное излучение, а с другой стороны, для того чтобы развить современную физику, создать теорию синхротронного излучения [3–6], разработать принципы и методы ускорения заряженных частиц [7, 8], а затем создать накопители заряженных частиц [9, 10] и специальные генераторы синхротронного излучения — ондуляторы и вигглеры [2, 11–13].

В связи с этим нужно заметить, что, несмотря на интернациональность науки, в решении вышеперечисленных проблем российские ученые практически всегда были в числе первых. На рисунке 2 приведены фотографии выдающихся российских ученых, заложивших физические основы создания источников СИ: И.Я. Померанчука, Л.А. Арцимовича, В.И. Векслера, Г.И. Будкера и В.Л. Гинзбурга.

Хотя развитие теории синхротронного излучения было стимулировано ранней работой G.A. Shott [3], которая была выполнена в связи с изучением различных



Рис. 2. Выдающиеся российские ученые (слева направо): И.Я. Померанчук, Л.А. Арцимович, В.И. Векслер, Г.И. Будкер и В.Л. Гинзбург.

моделей атомов, однако реально впервые магнитотормозное (синхротронное) излучение релятивистских электронов было рассмотрено в 1938 г. И.Я. Померанчуком в работе [4]. Магнитотормозное излучение заинтересовало И.Я. Померанчука как возможная причина ограничения энергии электронов и позитронов, доходящих до Земли из космоса, которая могла заключаться в потере ими энергии на магнитотормозное излучение при прохождении магнитосферы. Работа [4] ознаменовала начало изучения астрофизического аспекта магнитотормозного излучения. В последующих работах И.Я. Померанчука с соавторами [5, 6], посвященных влиянию магнитотормозного излучения на работу циклического ускорителя — бетатрона, было показано, что это излучение приводит к установлению предела энергии электронов, ускоряемых в бетатроне. Кроме того, в совместной работе И.Я. Померанчука и Л.А. Арцимовича [6] изучены угловое и спектральное распределения магнитотормозного излучения, впервые получены в простом

виде основные формулы для излучения релятивистских электронов.

Создание ускорителей электронов до очень больших энергий стало возможным после того, как В.И. Векслер [7] и независимо от него Е. McMillan [8] сформулировали принцип автофазировки, что позволило использовать высокочастотное ускорение заряженных частиц, движущихся по окружности с постоянным радиусом, в ускорителях, которые получили название синхротронов. Поскольку излучение релятивистских электронов в магнитном поле впервые наблюдалось в синхротроне, то его стали называть синхротронным, хотя в *Теории поля* Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица соответствующий параграф в гл. 9 озаглавлен, может быть, физически более правильно — "Магнитотормозное излучение".

Последующий прогресс в создании источников СИ связан с предложением о создании накопителей элементарных частиц [9] для постановки экспериментов на встречных пучках. Одним из основоположников этого направления был Г.И. Будкер [10], который первым предложил использовать радиационное затухание для накопления и получения долгоживущих, имеющих малый размер и большую интенсивность пучков электронов и позитронов.

Одним из основных элементов современных источников СИ являются ондуляторы и вигглеры — периодические магнитные структуры, предложение об использовании которых впервые было рассмотрено в работе В.Л. Гинзбурга [2], а спустя несколько лет первый ондулятор создал и испытал на пучке линейного ускорителя Н. Motz [11].

3. Что такое ондуляторы и вигглеры?

Размещение в прямолинейных промежутках накопителей электронов — вигглеров и ондуляторов (иногда называемых также "змейками"), создающих знакопеременное периодическое магнитное поле с периодом λ_0 на участке длиной $L = N\lambda_0$ (где N — число периодов), — является весьма эффективным способом повышения интенсивности синхротронного излучения. В простейшем случае поле в таких структурах имеет вид

$$B_y(z) = B_0 \sin \frac{2\pi z}{\lambda_0}.$$

Полные потери энергии электронов при прохождении ими такой периодической структуры длиной L не зависят от ее конструктивных особенностей:

$$\Delta W \sim r_e^2 \bar{B}_y^2 \gamma^2 L,$$

где $r_e = e^2/(mc^2)$ — классический радиус электрона, γ — отношение энергии электрона к энергии покоя mc^2 .

Однако спектральное и угловое распределения излучения из змейки существенно зависят от обеспечения условия интерференции излучения и соответственно от геометрического перекрытия излучения электрона из всех полюсов ондулятора. Вот почему режим работы змейки определяется соотношением между максимальным углом поворота электрона в магнитном поле змейки $\alpha_0 = \lambda_0/(2\pi R) = \lambda_0 e B_0 / (2\pi \gamma mc)$ и характерным углом расходимости излучения из каждой точки траектории электрона $\psi_{x,z} \sim 1/\gamma$. Отношение этих величин $K = \alpha_0 \gamma =$

$= \lambda_0 e B_0 / (2\pi mc)$ принято называть параметром ондуляторности.

3.1. Ондуляторный режим ($K \ll 1$)

Для релятивистских электронов при малых полях, $K \ll 1$, поперечное движение электронов в змейке является нерелятивистским, величиной модуляции продольной скорости электрона при движении в змейке можно пренебречь. Электромагнитная волна, излученная электроном при однократном прохождении змейки (рис. 3), приходит в точку наблюдения, находящуюся на оси змейки, в виде цуга всплесков электрического и магнитного полей с периодом

$$T_1 = \frac{\lambda_0}{v_{\parallel}} \approx \frac{\lambda_0}{c},$$

где v_{\parallel} — скорость электрона вдоль оси змейки. Вследствие искривленности траектории в змейке средняя продольная скорость электронов вдоль оси z

$$v_{\parallel} = v \left(1 - \frac{\alpha_0^2}{4} \right),$$

отсюда

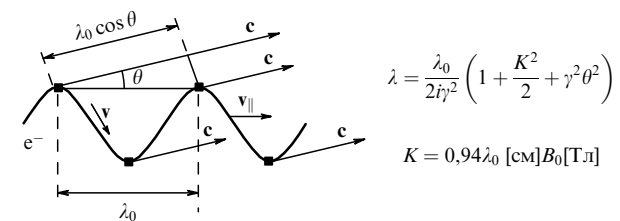
$$T_1 = \frac{\lambda_0}{v(1 - \alpha_0^2/4)} = \frac{\lambda_0}{c} \left(1 + \frac{\alpha_0^2 \gamma^2}{2} \right).$$

Соответственно в точке наблюдения на оси z регистрируется излучение с длиной волны

$$\lambda_u = T_1 c = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{\alpha_0^2 \gamma^2}{2} \right) = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right).$$

К точке наблюдения, находящейся на луче, расположенном под некоторым углом θ к оси змейки, источник излучения приближается со скоростью $v_{\parallel} \cos \theta$ (см. рис. 3). В этой точке регистрируется излучение с длиной волны

$$\lambda_u = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right).$$



$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right)$$

$$K = 0,94 \lambda_0 [\text{см}] B_0 [\text{Тл}]$$

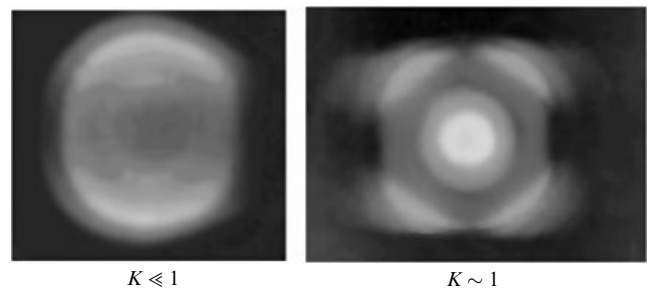


Рис. 3. Фотографии пучков ондуляторного излучения при различных значениях параметра ондуляторности K .

Монохроматичность ондуляторного излучения под нулевым углом определяется длительностью цуга и соответственно числом излучателей (периодов ондулятора):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_u} \sim \frac{1}{N_u}.$$

Угловая расходимость ондуляторного излучения по порядку величины составляет

$$\Delta\psi_{0z} \approx \Delta\psi_{0x} \approx \sqrt{\frac{\lambda_u}{L_u}} \approx \frac{\sqrt{1+K^2/2}}{\gamma\sqrt{2N_u}}.$$

Этой угловой расходимости ондуляторного излучения соответствует "эффективный" поперечный размер источника

$$A_{1z} \sim A_{1x} \sim \frac{1}{4\pi} \sqrt{\lambda_u L_u}.$$

Полное число квантов, излучаемых одним электроном при пролете через ондулятор,

$$N_{1u} = \frac{\Delta W_{\text{эм}} \lambda_u}{2\pi\hbar c} \approx \frac{1}{137} N (\alpha_0 K^2 \gamma)^2.$$

Излучение из ондулятора с поперечным магнитным полем линейно поляризовано, излучение из ондулятора со спиральным магнитным полем, в котором $B_y = B_0 \sin(2\pi z/\lambda_0)$, а $B_x = B_0 \cos(2\pi z/\lambda_0)$, циркулярно поляризовано.

Сегодня ондулятором принято называть змейку с большим числом полюсов, малым магнитным полем и малым периодом, отклоняющую траекторию электронов на угол $\alpha_0 \leq 1/\gamma$. Основное требование для работы змейки в ондуляторном режиме — обеспечение условий конструктивной интерференции излучения электронного пучка из всех полюсов ондулятора — накладывает жесткие ограничения на угловой разброс в электронном пучке. Например, в современных проектах рентгеновских источников ($\lambda_u \sim 1 \text{ \AA}$) предусматривается использование ондуляторов длиной $\sim 100 \text{ м}$, для чего требуются согласно простому условию интерференции

$$\frac{1}{2} L_u \Theta_{x,z}^2 < \frac{\lambda_u}{2\pi}$$

электронные пучки с угловым разбросом $\Theta_{x,z} < 10^{-6}$.

3.2. Режим генерации гармоник ондуляторного излучения ($K \gtrsim 1$)

При увеличении магнитного поля в змейке значение K увеличивается, поперечное движение электрона становится релятивистским и модуляция продольной скорости электрона вдоль оси змейки оказывается существенной. В этом случае в спектре излучения появляются гармоники ондуляторного излучения ($i = 1, 2, \dots$):

$$\lambda_u = \frac{\lambda_0}{2i\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right).$$

Параметр K определяет отношение двух характерных времен для излучения из змейки при большом поле. Первое время соответствует длительности всплеска электрического и магнитного полей от одиночного магнита, регистрируемого наблюдателем:

$$\Delta T_{\text{СИ}} \sim \frac{m}{\gamma^2 e B}.$$

Второе время определяется интервалом между всплесками электрического и магнитного полей, излученных из соседних периодов:

$$\Delta T_u = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2 c} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right).$$

Отношение $\Delta T_u / \Delta T_{\text{СИ}} \sim K(1 + K^2/2)$ и определяет число гармоник, вносящих существенный вклад в полную мощность излучения змейки.

На рисунке 3 приведены две фотографии излучения из ондулятора, на одной из которых видна генерация только первой гармоники ($i = 1$) при $K \ll 1$, а на другой — генерация двух гармоник ($i = 1, 2$) при $K \sim 1$. Отметим, что визуальное наблюдение ондуляторного излучения — разноцветной радуги, свернутой в конус, всегда доставляет удовольствие.

3.3. Работа в режиме вигглера ($K \gg 1$)

При больших значениях магнитного поля ($K \gg 1$) в спектре излучения появляется много гармоник, максимум интенсивности которых лежит в области длины волны синхротронного излучения, определяемой локальной кривизной траектории в одиночном магните ($\lambda \sim R/\gamma^3$). Характеристики потока СИ в точке наблюдения получаются в результате суммирования вкладов от разных участков траектории. При интегрировании интенсивности по конечному телесному углу и усреднении по параметрам электронов в пучке высшие гармоники при $K \gg 1$ уширяются и перекрываются по спектру. Угол излучения в длинноволновой области спектра больше $\psi_{x,z} \sim 1/\gamma$, так как $\psi_\lambda \sim (1/\gamma)(\lambda/\lambda_c)^{1/3}$, поэтому интерференция в длинноволновой части спектра наблюдается и при $K \gg 1$.

Сегодня слово "вигглер" используется для описания змейки с сильным магнитным полем и большим периодом, отклоняющей траекторию электронов на большой угол, $\alpha \gg 1/\gamma$, и предназначенной для генерации излучения со спектром, типичным для СИ. Использование вигглеров позволяет:

- получать излучение с фотонами, имеющими более высокую энергию за счет сильных магнитных полей вигглера;

- увеличить поток фотонов в $2N_u$ раз (N_u — число периодов) по сравнению с излучением из поворотных магнитов за счет суммирования излучения из всех полюсов вигглера;

- независимо изменять спектр на различных экспериментальных станциях, использующих излучение из разных вигглеров.

4. Ондуляторы и развитие источников рентгеновского синхротронного излучения

Анализ требований к источникам синхротронного излучения для различного рода экспериментов [14] показывает, что основной "потребительской" характеристикой является спектральная яркость $B_\lambda = \dot{N}_{\text{ph}} / (S\Omega)$, определяемая числом фотонов \dot{N}_{ph} , излучаемых в единицу времени в данной спектральной полосе ($\Delta\lambda/\lambda$) с единицы площади ($S \sim A_x A_z$) в единицу телесного угла ($\Omega \sim A_x' A_z'$).

При оценке яркости излучения ондуляторов необходимо учитывать протяженность источника, в связи с чем

эффективные поперечные размеры источника излучения

$$A_{x,z} = \sqrt{\sigma_{x,z}^2 + \frac{\lambda_u L_u}{(4\pi)^2} + \Theta_{x,z}^2 L_u^2},$$

а эффективная угловая расходимость излучения

$$A_{x',z'} = \sqrt{\frac{\lambda}{L_u} + \Theta_{x,z}^2},$$

где $\sigma_{x,z}$ — поперечный размер электронного пучка, $\Theta_{x,z}$ — угловая расходимость электронного пучка. Поскольку

$$\sigma_{x,z} \Theta_{x,z} = \varepsilon_{x,z}, \quad \sigma_{x,z} = \sqrt{\varepsilon_{x,z} \beta_{x,z}}, \quad \Theta_{x,z} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{x,z}}{\beta_{x,z}}},$$

где $\varepsilon_{x,z}$ — эмиттанс (фазовый объем) электронного пучка, $\beta_{x,z}$ — локальное эффективное фокусное расстояние магнитной системы ($\beta_{x,z} \sim L$ при оптимальном размещении ондулятора), то наиболее важным условием повышения яркости является уменьшение эмиттанса электронного пучка с одновременным увеличением его энергии, что позволяет использовать длинные ондуляторы для генерации коротковолнового излучения (рис. 4).

На рисунке 5 приведена диаграмма, отображающая историю, современное состояние и планы увеличения яркости рентгеновских источников. Конечно, все началось с открытия В.К. Рентгеном в 1895 г. лучей, названных его именем, после чего были созданы первые рентгеновские трубки с яркостью $B_\lambda \sim 10^6$ фотонов в 1 с на $1 \text{ мм}^2 \text{ мрад}^2$ ($0,1\% \Delta\lambda/\lambda$). Примерно за шестьдесят лет их яркость эволюционным путем была увеличена при-

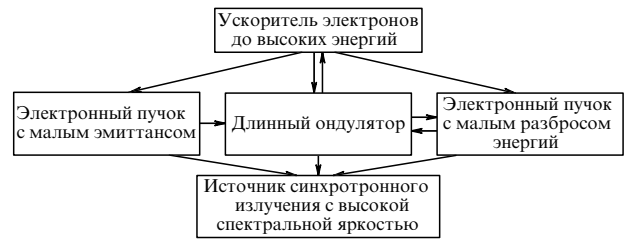


Рис. 4. Пути создания источников синхротронного излучения с высокой спектральной яркостью.

близительно на два порядка благодаря возрастанию мощности в электронном пучке при использовании вращающегося анода и микрофокусных рентгеновских трубок, позволяющих уменьшить размер электронного пучка на аноде.

Использование электронных синхротронов, а затем накопителей электронов в качестве источников рентгеновского синхротронного излучения позволило ускорительному сообществу начиная с 1980-х годов проводить целенаправленную работу (табл. 1) по революционному повышению яркости рентгеновских источников. Переход с синхротронов на накопители в 1970-е годы повысил яркость примерно в $10^2 - 10^3$ раз благодаря тому, что в накопителях больше средний ток и вследствие радиационного затухания меньше эмиттанс ($\varepsilon_x \sim 300 \text{ нм рад}$), а следовательно, и поперечные размеры электронного пучка.

Дальнейшее повышение яркости (примерно в 10–100 раз) осуществлялось за счет использования многопо-

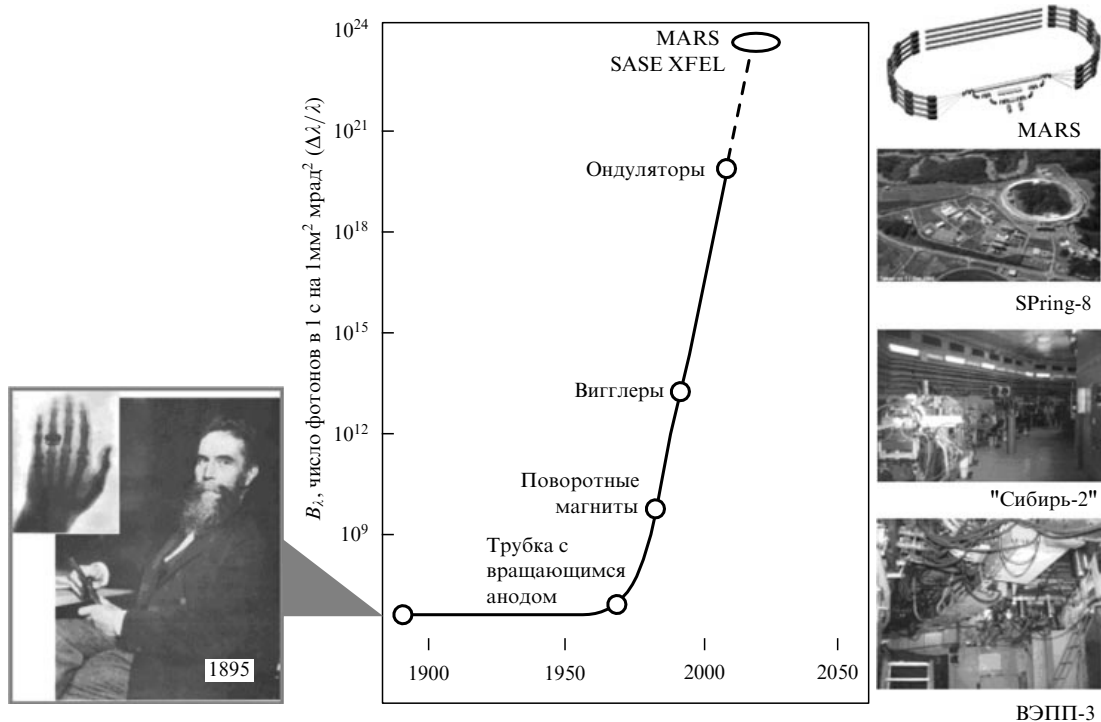


Рис. 5. Рост спектральной яркости источников рентгеновского излучения со времени открытия В.К. Рентгеном "X-лучей": история и перспективы. MARS — разрабатываемый источник СИ четвертого поколения; SASE XFEL (Self Amplified Spontaneous Emission X-ray Free Electron Laser) — создаваемый рентгеновский ЛСЭ, работающий в режиме SASE; ВЭПП-3 (Новосибирск), "Сибирь-2" (Москва) и SPring-8 (Super Photon ring) (Химеджи, Япония) — примеры трех поколений действующих источников СИ.

Таблица 1. Изменение параметров ускорителей-источников синхротронного излучения: история и прогноз

Год	Эмиттанс ϵ , нм рад	Разброс энергии в электронном пучке, σ_E/E	Число периодов ондулятора N_u	Тип источника СИ
1980	300	10^{-3}	10	Электронный накопитель
1990	30	10^{-3}	10^2	Электронный накопитель
2000	3	10^{-3}	10^3	Электронный накопитель
2015	10^{-2}	10^{-4}	10^4	Ускоритель-рекуператор (MARS)

люсных вигглеров. Создание в 1980-х годах специализированных накопителей — источников СИ второго поколения — позволило уменьшить эмиттанс электронных пучков до $\epsilon_x \sim 30$ нм рад, а значит, уменьшить площадь источника излучения и повысить яркость еще приблизительно на порядок. Источники СИ третьего поколения, созданные в 1990-х годах, имеющие еще меньший эмиттанс ($\epsilon_x \sim 3$ нм рад) и большую энергию ($E \sim 6-8$ ГэВ), используют в качестве источников рентгеновского излучения длинные ондуляторы с $N_u \sim 10^2-10^3$. Это позволило увеличить поток квантов по сравнению с потоком квантов из поворотных магнитов в N_u раз, а также, благодаря интерференции излучения из всех полюсов ондулятора, дополнительно уменьшить телесный угол в N_u раз, в результате чего повысить яркость ондулятора в N_u^2 раз ($\sim 10^4-10^6$ раз)!

Как видно из рис. 5, благодаря целенаправленной работе физиков-ускорительщиков яркость новых источников рентгеновского синхротронного излучения увеличивалась на три порядка в каждые десять лет, что позволило за последние тридцать лет повысить яркость рентгеновских источников в 10^9 раз!

Пропорционально яркости увеличивался и поток пространственно когерентных квантов, поскольку [14]

$$\dot{N}_{\text{coh}} \sim B_j \lambda^2.$$

Тем не менее в самых современных источниках: APS (Advanced Photon Source) (США), SPring-8 (Super Photon ring) (Япония) — поток когерентных квантов составляет только 10^{-3} от полного потока. Поэтому, несмотря на успешные эксперименты по рентгеновской голографии, этот метод не стал эффективным для структурных исследований реальных объектов (большинство из которых имеют некристаллическую структуру). Даже для исследования кристаллических структур очень часто важна, например, рентгеновская спекл-спектроскопия, для которой также необходимо пространственно когерентное освещение.

Реализация полностью пространственно когерентного источника станет возможной, если фазовый объем оптического источника будет меньше дифракционного предела:

$$A_{x,z} A_{x',z'} \leq \frac{\lambda}{4\pi}.$$

Для этого эмиттанс электронного пучка должен быть достаточно малым:

$$\epsilon_{x,z} = \sigma_{x,z} \theta_{x,z} < \frac{\lambda}{4\pi}$$

(что для рентгеновского излучения означает $\epsilon_{x,z} < 10^{-2}$ нм рад).

Эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка в накопителе электронов определяются равновесием между радиационным затуханием и диффузией, обусловленными квантовыми флуктуациями синхротронного излучения, а также внутривидовым рассеянием в случае пучков с большой плотностью. Дополнительный анализ (см., например, [15]) показал, что в накопителе невозможно получить эмиттанс электронного пучка менее 10^{-1} нм рад и энергетический разброс менее 10^{-3} , поэтому реализация полностью пространственно когерентного рентгеновского источника возможна в случае перехода от накопителей электронов к ускорителям с рекуперацией энергии. Это предложение, которое впервые было сделано нами в 1997 г. на конференции SRI-97 (6th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation) [16], сейчас является общепризнанным и активно развивается во многих мировых центрах [17].

В ускорителях-рекуператорах объединяются достоинства накопителей электронов (высокая реактивная мощность пучка; малые потери частиц высокой энергии в единицу времени и, соответственно, низкий уровень радиационного фона и отсутствие наведенной радиоактивности) и линейных ускорителей (нормализованные эмиттанс пучка электронов ϵ_n и энергетический разброс могут быть сохранены во время ускорения). Поэтому, имея хороший инжектор с $\epsilon_n < 100$ нм рад, благодаря адиабатическому затуханию при ускорении до больших энергий ($E > 5$ ГэВ, $\gamma > 10^4$), можно получить эмиттанс $\epsilon_{x,z} = \epsilon_n / \gamma \sim 10^{-2}$ нм рад и энергетический разброс $\sigma_E/E \sim 10^{-4}$. В ускорителях-рекуператорах время ускорения ($\tau_{\text{уск}} \sim 1-10$ мкс) существенно меньше (в 10^3-10^4 раз) характерного времени радиационного затухания в накопительных кольцах ($\tau_{\text{рад}} \sim 10$ мс), поэтому диффузионные процессы не могут негативно повлиять на эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка. На рисунке 6 показана разрабатываемая сейчас нами схема четырехоборотного ускорителя-рекуператора MARS (Multiturn Accelerator-Recuperator Source) [18]. В ускорителе-рекуператоре электроны, получаемые

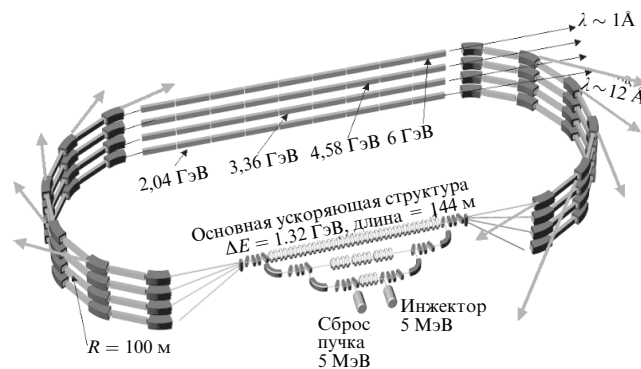


Рис. 6. Концептуальная схема источника синхротронного излучения четвертого поколения MARS.

Таблица 2. Сравнение параметров источника синхротронного излучения MARS ($I_e = 2,5$ МА) и SPring-8 ($I_e = 100$ МА), N_u — число периодов ондулятора

Источник СИ		Число ондуляторов	Спектральная яркость B_λ , число фотонов в 1 с на $1 \text{ мм}^2 \text{ мрад}^2$ ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$)	Поток F , число фотонов в 1 с ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$)
MARS	Ондулятор, $N_u \sim 10^2$	32	10^{22}	$4,6 \times 10^{13}$
	Ондулятор, $N_u \sim 10^3$	12	10^{23}	$4,6 \times 10^{14}$
	Ондулятор, $N_u \sim 10^4$	4	10^{24}	$4,6 \times 10^{15}$
SPring-8	Поворотный магнит	—	10^{16}	10^{13}
	Ондулятор, $N_u = 130$	34	3×10^{20}	2×10^{15}
	Ондулятор, $N_u = 780$	4	10^{21}	$1,2 \times 10^{16}$

в инжекторе с энергией ~ 5 МэВ, затем ускоряются в дополнительном двухкаскадном инжекторе, после чего четыре раза проходят через основную ускоряющую высокочастотную структуру, увеличивая свою энергию до 6 ГэВ. После ускорения электроны проходят в том же направлении те же самые высокочастотные структуры, но в замедляющей фазе, уменьшая свою энергию до 5 МэВ, а затем попадают в поглотитель. В ускорителе-рекуператоре одновременно на четырех дорожках непрерывно движутся ускоряемые и замедляемые электроны. Потребители синхротронного излучения будут воспринимать излучение из ондуляторов MARS подобно излучению из накопительного кольца с той лишь разницей, что каждый раз используются новые ("свежие") электроны с малым эмиттансом, $\varepsilon_{\min} \sim 10^{-2}$ нм рад, и энергетическим разбросом $\sigma_E/E \sim 10^{-4}$. В проекте MARS предполагается на четырех дорожках поставить четыре ондулятора длиной 150–200 м ($N \sim 10^4$) и несколько десятков ондуляторов длиной 5–20 м ($N = 10^2 - 10^3$) (табл. 2).

5. Ондуляторы и развитие лазеров на свободных электронах (ЛСЭ)

В работе В.Л. Гинзбурга [2], где впервые рассматривалось излучение релятивистских электронов в периодических структурах, оценивались также условия когерентного излучения одного короткого электронного сгустка в ондуляторе и, кроме того, был поставлен вопрос об использовании для этой цели микросгустков, расставленных на расстояниях, равных длине волны генерируемого излучения. И хотя в [2] не обсуждались возможные способы создания такой последовательности микросгустков, интересно отметить ее связь с современными работами по созданию ЛСЭ [19], в которых ключевым элементом является ондулятор. Последний позволяет, с

одной стороны, синхронизировать движение электронов и волны, а с другой — получить продольную модуляцию плотности электронного пучка с длиной волны излучения.

Принцип работы ЛСЭ показан на рис. 7. Электронный сгусток с энергией $E = \gamma mc^2$ пролетает через ондулятор, генерируя под нулевым углом ондуляторное излучение с длиной волны

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right),$$

где $K = eB\lambda_0/(2\pi mc)$ — параметр ондуляторности. При движении электронного сгустка вдоль ондулятора на начальном участке интенсивность ондуляторного излучения увеличивается пропорционально числу частиц в сгустке и пройденному им расстоянию в ондуляторе. Если ток электронного сгустка достаточно большой, а ондулятор длинный, то существенным становится действие излучения на электроны. Несмотря на то, что вдоль ондулятора распространяется плоская электромагнитная волна (вектор \mathbf{E} перпендикулярен оси ондулятора), благодаря синусоидальной траектории движения электронов вдоль ондулятора взаимодействие приводит к модуляции энергии электронов по продольной координате. Также благодаря синхронизму движения волны и электронов в ондуляторе (на каждом периоде ондулятора электронный сгусток отстает от электромагнитной волны точно на длину волны излучения) модуляция энергии становится достаточной, чтобы привести к модуляции плотности вдоль сгустка либо за счет зависимости скорости электронов от энергии в простейшем случае [19], либо за счет использования "оптического клистрона", изобретенного Н.А. Винокуровым и А.Н. Скринским [20]. В результате электронный сгусток оказывается "нарезанным" на микросгустки, отстоящие друг от друга на длину волны излучения. Если в сгустке длиной $l_{\text{сг}}$ имеется $N_e \sim 10^9 - 10^{10}$ электронов, то в каждом микросгустке находится $N_{\text{мкст}} = N_e \lambda / l_{\text{сг}} \sim 10^4 - 10^6$ электронов. Все микросгустки излучают когерентно, поэтому интенсивность излучения из ЛСЭ по сравнению с интенсивностью обычного некогерентного излучения из ондулятора увеличивается в $10^4 - 10^6$ раз.

Преимущества ЛСЭ перед другими типами лазеров заключаются в следующем:

— можно генерировать излучение с любой наперед заданной длиной волны, от 1 мм до 1 Å (диапазон 1 мм – 130 Å уже реализован [21]);

— возможна оперативная плавная перестройка длины волны монохроматического излучения посред-

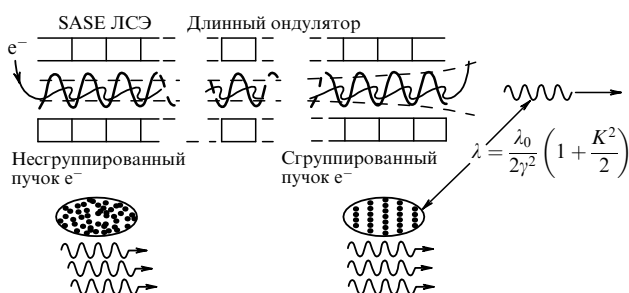


Рис. 7. Схема безрезонаторного ЛСЭ, работающего в режиме усиленной спонтанной эмиссии (SASE).

ством изменения магнитного поля в ондуляторах или энергии электронов из ускорителя;

— "рабочей средой" в ЛСЭ является релятивистский электронный пучок, способный генерировать излучение с высокой средней мощностью, до 10^6 Вт (мощность 10^4 Вт уже реализована [22]).

Основными недостатками ЛСЭ являются большой размер и высокая стоимость. Поэтому адекватными для ЛСЭ областями применения являются те, которые недоступны обычным лазерам.

Одной такой интересной областью является создание рентгеновских ЛСЭ ($\lambda = 1-20 \text{ \AA}$) с высокой средней яркостью ($B_\lambda \sim 10^{23}-10^{24}$ фотонов в 1 с на $1 \text{ мм}^2 \text{ мрад}^2$ ($10^{-3} \Delta\lambda/\lambda$)), с коротким жестко синхронизованным импульсом (10–100 фс) и фантастической пиковой мощностью (10–100 ГВт) [21, 23, 24]. Рентгеновские ЛСЭ создаются на базе линейных ускорителей, рассчитанных на энергию $E = 5-20 \text{ ГэВ}$, с большим импульсным током ($I_{\text{пик}} \sim 3-10 \text{ кА}$), $N_e \sim 10^{10}$, $l_{\text{ст}} \sim 100 \text{ мкм}$. Необходимо отметить, что впервые идея безрезонаторного ЛСЭ (см. рис. 7), работающего в режиме SASE (Self Amplified Spontaneous Emission — самоусиленная спонтанная эмиссия), была предложена в начале 1980-х годов в России Кондратенко А.М. и Салдиным Е.Л. [25], а затем при активном участии одного из авторов этой работы стала реализовываться в DESY (Германия) [21]. Кроме того, аналогичные установки создаются в Стэнфордском центре линейного ускорителя (SLAC) (США) [23] и SPring-8 (Япония) [24]. Начало работы рентгеновских ЛСЭ ожидается в 2010–2012 гг. Стоимость этих ЛСЭ — 0,5–1 млрд долларов.

Другая область адекватного использования ЛСЭ — создание мощных ($P = 10-100 \text{ кВт}$), обладающих хорошей монохроматичностью ($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-4}$), перестраиваемых в широкой области длин волн инфракрасных лазеров для технологических применений (фотохимические технологии, разделение изотопов, нанотехнологии, биомедицинские технологии и т.д.).

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН завершается создание мощного ЛСЭ на базе четырехдорожечного ускорителя-рекуператора (одновременно прототип MARS!) с максимальной энергией 50 МэВ [26]. Планируемый диапазон длин волн 240–5 мкм, ожидаемая мощность излучения от 1 кВт в длинноволновом диапазоне до 50 кВт в коротковолновом.

Три года назад начала работать первая очередь — терагерцевый ЛСЭ на базе однодорожечного ускорителя-рекуператора, схема которого представлена на рис. 8. Пучок электронов из инжектора с энергией 2 МэВ набирает энергию 12 МэВ в основной ускоряющей структуре и попадает в ондулятор, где отдает часть энергии на излучение. После этого пучок электронов, возвращаясь в основную ускоряющую структуру в замедляющей фазе, тормозится и теряет энергию, уменьшающуюся практически до значения энергии инжекции, а затем сбрасывается в поглотитель. В нашем терагерцевом ЛСЭ, как почти во всех существующих ЛСЭ (не считая вышеупомянутых SASE-ЛСЭ), используется оптический резонатор, внутри которого размещается ондулятор. Расстояние между зеркалами выбирается таким, чтобы световой пучок, накопленный в оптическом резонаторе, следовал синхронно с электронными сгустками. Это позволило нам получить генерацию в терагерцевой области при сравнительно малых значениях пикового тока ($I_{\text{пик}} \sim 10 \text{ А}$) и ондуляторах с суммарной длиной 8 м. Излучение из оптического резонатора выводится через отверстие диаметром 8 мм в одном из зеркал и далее через алмазное окно, отделяющее сверхвысокий вакуум в ЛСЭ от канала вывода излучения, заполненного сухим азотом при атмосферном давлении, попадает на расположенные в специальном зале экспериментальные станции, в которых новосибирские биологи, химики и физики проводят различные исследования [27].

Использование Новосибирского ЛСЭ в качестве терагерцевого источника излучения позволяет получить:

- плавно перестраиваемую длину волны в диапазоне 110–240 мкм с монохроматичностью лучше, чем 0,3 %;
- среднюю мощность до 400 Вт на основной гармонике и на уровне 10 Вт на второй и третьей гармониках (рис. 9);
- степень линейной поляризации не хуже 98 %;
- короткие импульсы излучения (менее 100 пс);
- большую пиковую мощность (0,5–1 МВт);
- полностью пространственно когерентный источник с длиной продольной когерентности $\sim 2 \text{ см}$ (без использования монохроматора).

Интерес к терагерцевому излучению обусловлен следующими его свойствами:

- излучение неионизирующее (энергия фотонов 0,04–0,004 эВ);

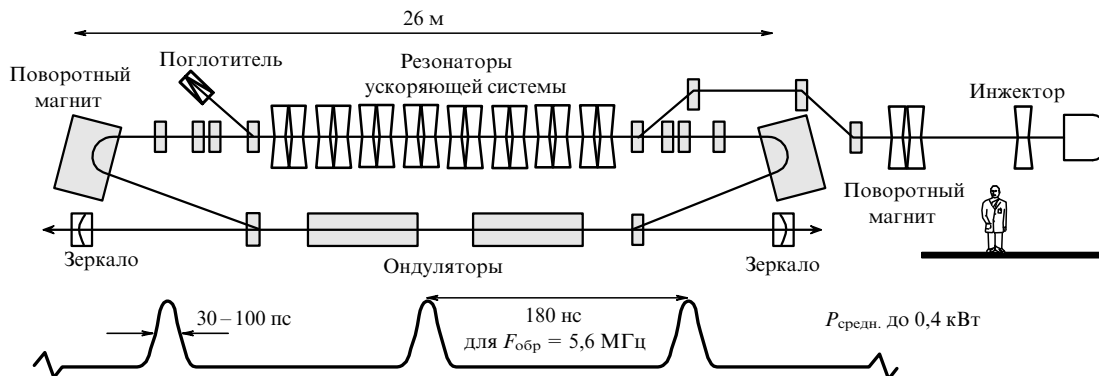


Рис. 8. Схема Новосибирского лазера на свободных электронах терагерцевого диапазона.

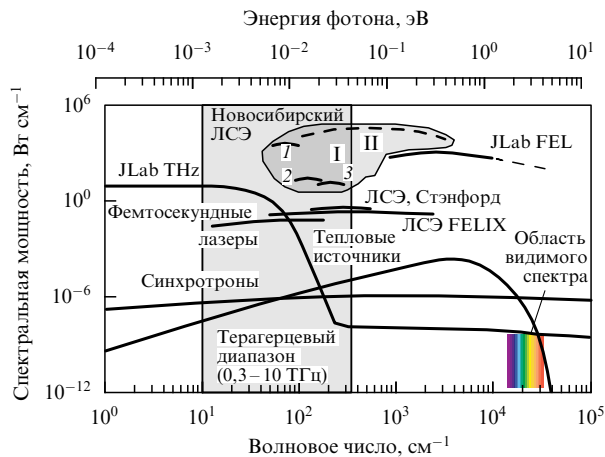


Рис. 9. Сравнение усредненной по времени спектральной мощности различных источников излучения: Новосибирский ЛСЭ (Россия): I — действующий терагерцевый, где 1, 2, 3 — номера гармоник излучения, II — создаваемый инфракрасный; JLab THz — источник когерентного СИ из поворотных магнитов; JLab FEL — ЛСЭ Джефферсоновской лаборатории (США); FELIX — инфракрасный ЛСЭ Института физики плазмы (Нидерланды).

— излучение относительно хорошо проходит через мутные среды и малодисперсные материалы благодаря резкому подавлению рэлеевского рассеяния ($1/\lambda^4$);

— частотный диапазон излучения охватывает область вращательных спектров молекул, колебаний биологически важных коллективных мод ДНК и белков, характерных частот межмолекулярного взаимодействия;

— терагерцевое излучение соответствует области энергий водородных связей и ван-дер-ваальсовых сил межмолекулярного взаимодействия;

— энергия фотонов терагерцевого излучения лежит в области энергетической щели сверхпроводников.

Я достаточно подробно рассказал о Новосибирском терагерцевом ЛСЭ не из-за того, что это одна из немногих созданных в последние годы российских экспериментальных установок мирового уровня, параметры которой сегодня на несколько порядков превышают параметры лучших зарубежных установок в этом спектральном диапазоне (см. рис. 9). Подробно я остановился на Новосибирском ЛСЭ только потому, что именно этот спектральный диапазон и обсуждал В.Л. Гинзбург в далеком 1947 г. в работе [2].

6. Заключение

В последние годы в мире создано большое семейство ондуляторов на базе различных технологий: обычные электромагнитные ондуляторы; ондуляторы на основе только постоянных магнитов; гибридные ондуляторы, в которых используется комбинация постоянных магнитов с магнитомягкими материалами; сверхпроводящие ондуляторы. Современные ондуляторы позволяют не только генерировать излучение любого спектра от терагерцевого до рентгеновского диапазона с различной поляризацией (линейной в любой плоскости, циркулярной левой или правой), но также за сравнительно малое время изменять длину волны и тип поляризации. Несмотря на жесткие требования к механическим и магнитным параметрам ондуляторов, уже сейчас

имеются ондуляторы длиной несколько десятков метров и числом периодов в несколько сотен. В стадии разработки находятся ондуляторы длиной 150–200 м. Учитывая большое число в мире источников СИ (~ 60) и ЛСЭ (~ 80), в которых требуются ондуляторы, производство последних стало заметной отраслью научного приборостроения. И каждый раз появление очередного усовершенствованного ондулятора "открывает дверь" экспериментаторам в новые области научных исследований, которые даже и не обсуждались в то время, когда В.Л. Гинзбург предлагал новый тип электромагнитного источника в ставшей сейчас знаменитой работе [2].

Автор благодарен Н.А. Винокурову за полезные замечания, сделанные при прочтении рукописи этой статьи.

Список литературы

1. Гинзбург В Л, Франк И М *ЖЭТФ* **16** 15 (1946)
2. Гинзбург В Л *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **11** (2) 165 (1947)
3. Schott G A *Electromagnetic Radiation and the Mechanical Reactions Arising from It* (Cambridge: Univ. Press, 1912)
4. Померанчук И Я *ЖЭТФ* **9** 915 (1939)
5. Иваненко Д Д, Померанчук И Я *ДАН СССР* **44** 343 (1944)
6. Арцимович Л А, Померанчук И Я *ЖЭТФ* **16** 379 (1946)
7. Векслер В И *ДАН СССР* **43** 329 (1944)
8. McMillan E M *Phys. Rev.* **68** 144 (1945)
9. Kerst D W et al. *Phys. Rev.* **102** 590 (1956)
10. Будкер Г И *УФН* **89** 533 (1966)
11. Motz H, Thon W, Whitehurst R N J. *Appl. Phys.* **24** 826 (1953)
12. Байер В Н, Катков В М, Страховенко В М *ЖЭТФ* **63** 2121 (1972)
13. Алферов Д Ф, Башмаков Ю А, Бессонов Е Г *ЖТФ* **42** 1921 (1972)
14. Кулипанов Г Н, Скринский А Н *УФН* **122** 369 (1977)
15. Kulipanov G N, Mezentsev N A, Skrinisky A N *Rev. Sci. Instrum.* **63** 289 (1992)
16. Kulipanov G N, Skrinisky A N, Vinokurov N A J. *Synchrotron Rad.* **5** 176 (1998); Preprint No. 97-103 (Novosibirsk: G I Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997)
17. Chattopadhyay S, Merminga L (Eds) *Energy Recovering Linacs 2005: Proc. of the 32nd Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovering Linacs, Newport News, USA, March 19–23, 2005* (Nucl. Instrum. Meth. A, Vol. 557, No. 1) (Amsterdam Elsevier, 2006)
18. Kulipanov G, Skrinisky A, Vinokurov N, in *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation, Daegu, Korea, 28 May–2 June, 2006* (Abstract 10060003, B2-006) (CD-ROM); *AIP Conf. Proc.* **879** 234 (2007)
19. Elias L R et al. *Phys. Rev. Lett.* **36** 717 (1976)
20. Винокуров Н А, Скринский А Н, Препринт № 77-59 (Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1977)
21. Brinkmann R, in *Proc. of the 28th Intern. Free electron Laser Conf., FEL-06, Aug. 27–Sept. 1, 2006, Berlin, Germany, MOBAU03*, p. 24; <http://www.bessy.de/fel2006/proceedings/PAPERS/MOBAU03.PDF>
22. Neil G R et al. *Nucl. Instrum. Meth. A* **557** 9 (2006)
23. "LCLS conceptual design report", SLAC-R-593 UC-414 (Stanford: Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, 2002); <http://www-ssl.slac.stanford.edu/lcls/cdr/>
24. Shintake T and SCSS Team, in *Proc. of the 28th Intern. Free Electron Laser Conf., FEL-06, Aug. 27–Sept. 1, 2006, Berlin, Germany, MOBAU05*, p. 33; <http://www.bessy.de/fel2006/proceedings/PAPERS/MOBAU05.PDF>

25. Kondratenko A M, Saldin E L *Particle Accel.* **10** 207 (1980); Preprint No. 79-43 (Novosibirsk: Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1979)
26. Bolotin V P et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **543** 81 (2005)
27. *The Joint 31st Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 14th Intern. Conf. on Terahertz Electronics: IRMMW – THz 2006, Sept. 18–22, 2006, Shanghai, China, Conf. Digest* (New York: IEEE) (in press)

V.L. Ginzburg's invention of undulators and their role in modern synchrotron radiation sources and free electron lasers

G.N. Kulipanov

G.I. Budker Institute of Nuclear Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

prosp. akademika Lavrent'eva 11, 630090 Novosibirsk, Russian Federation

Tel. (7-383) 339-44 98, 330-60 30

E-mail: G.N.Kulipanov@inp.nsk.su

Undulators — periodic magnetic structures that were originally introduced by V.L. Ginzburg in 1947 for electromagnetic radiation generation using relativistic electrons — are among the key elements of modern synchrotron radiation sources and free electron lasers (FELs). In this talk the history of three generations of storage-ring-based synchrotron X-ray sources using wigglers and undulators are briefly traced. Prospects for two types of next-generation space coherent X-ray sources are discussed, which use long undulators and energy recovery accelerators or, alternatively, employ linear accelerator FELs. The recently-developed Novosibirsk terahertz FEL facility, the world's currently most powerful terahertz source, is described. It was the generation of electromagnetic radiation in this range that V.L. Ginzburg discussed in his 1947 work.

PACS numbers: **07.85. – m**, 07.85.Qe, 41.60.Cr

Bibliography — 27 references

Received 12 February 2007

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **177** (4) 384–393 (2007)

Physics – Uspekhi **50** (4) (2007)