

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПУЧКА ДЛЯ ПРОЕКТА ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ-РЕКУПЕРАТОРА

Я. В. Гетманов¹, Н. А. Винокуров, О. А. Шевченко, И. В. Давидюк

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

По мнению ведущих производителей микроэлектроники, использование литографии на базе лазера на свободных электронах (ЛСЭ) в ближайшем будущем может стать основной технологией массового производства со структурами до 5 нм. Одним из основных препятствий для этого является отсутствие работающего ЛСЭ с нужными параметрами. В ИЯФ СО РАН проведены оценки возможности создания такого ЛСЭ на базе сверхпроводящего ускорителя-рекуператора (УР). Средний ток УР ограничен продольными и поперечными неустойчивостями, вызванными взаимодействием электронного пучка с наведенными им полями в сверхпроводящих ускоряющих структурах. В работе приведены оценки пороговых токов и параметров УР, необходимых для работы ЛСЭ.

According to microelectronics production leaders the lithography based on the free electron laser (FEL) could become the main technology for the elements mass production with scale to 5 nm in the nearest future. One of the main problems is the absence of the working FEL with required parameters. The feasibility study of those FEL based on superconducting energy-recovery linac (ERL) was made in Budker INP. The ERL average current is limited by longitudinal and transverse instabilities, caused by interaction between electron beam and its induced fields in the superconducting cavities. The estimations of the threshold currents and ERL parameters were made.

PACS: 41.60.Cr

ВВЕДЕНИЕ

Возможность создания высокоомощного источника излучения для применения в литографии обсуждается последнее десятилетие [1, 2]. Таким источником может стать ЛСЭ, установленный на многооборотный УР. Высокая средняя мощность излучения, необходимая для промышленных технологий, требует высоких энергий и среднего тока электронного пучка. Такие параметры возможны только при использовании сверхпроводящих высокочастотных (ВЧ) резонаторов.

¹E-mail: y_getmanov@mail.ru

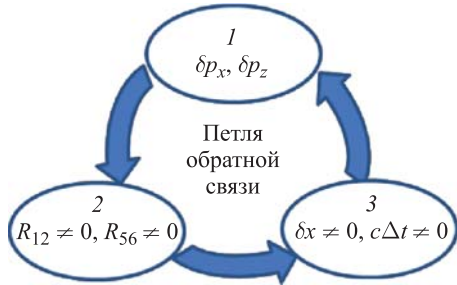


Рис. 1. Петля обратной связи пороговой неустойчивости

Одной из основных проблем создания ускорителя на основе сверхпроводящих ВЧ-резонаторов являются эффекты взаимодействия электронного пучка с долгоживущими модами ВЧ-поля. Эффекты неустойчивостей порогового тока пучка можно разделить на продольные и поперечные. Механизмы развития неустойчивостей принципиально не отличаются. В случае однооборотного УР он следующий (рис. 1): 1 — пучок электронов, пролетая через резонатор, получает дополнительное отклонение по импульсу от основной или возбужденной дипольной моды ВЧ-поля; 2 — полученное отклонение по импульсу преобразуется в отклонение по координате при условии отличных от нуля соответствующих элементов транспортной матрицы и, возвращаясь обратно в резонатор, замыкает петлю неустойчивости 3, усиливая возбужденную дипольную или отклоняя основную ВЧ-моду резонатора.

1. СХЕМА УСКОРИТЕЛЯ

Использование схемы многооборотного УР понижает общую стоимость установки. Опыт работы с многооборотным УР Новосибирского ЛСЭ [3] показал один из недостатков компоновки УР с одной ускоряющей структурой. Настройка электронно-оптической системы дорожек осложняется из-за одновременного движения по ним ускоряемого и замедляемого пучков с разным энергетическим разбросом вследствие излучения. Поэтому была предложена схема с разделенной ускоряющей структурой (рис. 2) [2, 4–6]. Важным преимуществом такой структуры является возможность независимой настройки оптики для ускоряемого и замедляемого пучков. Принцип работы следующий: электроны из инжектора 1 попадают в предускоритель 2, далее, ускорившись по два раза в линейных ускорителях 3, попадают в ондулятор 5, откуда в тормозящей фазе возвращаются обратно и, вернув энергию в основную систему и предускоритель, сбрасываются в поглотитель 7.

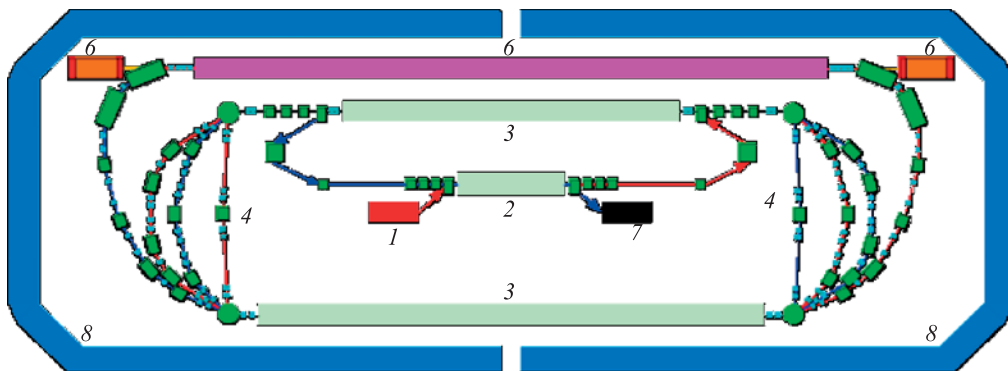


Рис. 2. Схема ускорителя-рекуператора: 1 — инжектор; 2 — предускоряющий линак; 3 — основные линаки; 4 — магнитная система; 5 — ондулятор; 6 — оптический резонатор; 7 — поглотитель; 8 — защитные стены зала

Длина волны первой гармоники излучения ондулятора 13 нм определяет максимальную энергию электронов в ускорителе 800 МэВ. Для увеличений значений пороговых токов неустойчивостей и эффективности фокусировки в линаках предполагается сделать наборы энергий в основных линаках равными 100 и 275 МэВ, а в предынжекторе 40 МэВ.

2. ПОПЕРЕЧНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Благодаря независимой электронно-оптической системе оба линейных ускорителя можно рассматривать независимо друг от друга, при этом из-за меньшей энергии в первом ожидается более низкий пороговый ток. ВЧ-система первого линака состоит из 10 девятичечных резонаторов с девятью дипольными модами. Таким образом, в определении порогового тока пучка участвуют 90 дипольных мод. Одним из возможных способов настройки необходимого порогового тока 100 мА является сдвиг частот дипольных мод расстройками резонаторов. Пороговый ток поперечной неустойчивости многооборотного УР (см. рис. 2) равен [7]

$$I_{th} = -2 \frac{m_0 c^3}{e} \frac{1}{\omega_m \left(\frac{R_s}{Q}\right)_m Q_m \sum_{k=1}^{2N-1} \sum_{n=k+1}^{2N} \sqrt{\frac{\beta_k \beta_n}{\gamma_k \gamma_n}} \sin(\Delta\psi_{nk}) \sin[\omega_m (T_k - T_n)]}, \quad (1)$$

где e и $m_0 c^2$ — заряд и энергия покоя электрона; $\rho = (R_s/Q)_m$, ω_m , Q_m — волновое сопротивление, частота и добротность моды m ; T_n и T_m — время оборота частицы при n и m пролетах резонатора; β_k и β_n — параметры Твисса; γ_k и γ_n — релятивистские факторы и ψ_{nk} — набег бетатронной фазы между пролетами k и n . Формула (1) является приближенной, в ее выводе не учитывается затухание возбуждаемых пучком колебаний за время прохождения пучка через УР. Кроме того, существует опасность взаимного перекрытия полос мод $\delta f \approx f/Q$, не учитываемая при одномодовой и однорезонаторной оценке пороговых значений (1), но существенно снижающая пороговый ток [8].

Так как набег бетатронных фаз между пролетами это интеграл бета-функций, то пороговый ток для резонаторов линейного ускорителя можно рассчитать, наложив условие симметрии бета-функций для ускорения и торможения. Для оптимизации электронного тока применяется метод уменьшения средних размеров пучка в резонаторе в программе «Elegant» [9]. Вторым шагом оптимизации пороговых значений тока неустойчивости является подбор соответствующих набегов бетатронных фаз в арках ускорителя (рис. 3).

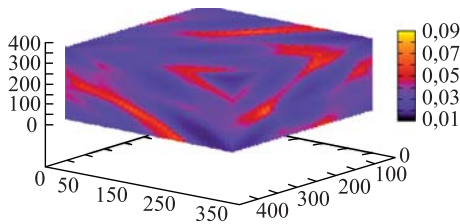


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Зависимость порогового тока от бетатронных фаз (оси X, Y, Z — набег бетатронных фаз на арках ускорителя, °, амплитуда тока обозначена цветом, А) ($Q = 5 \cdot 10^4$, $\rho = 100$ Ом)

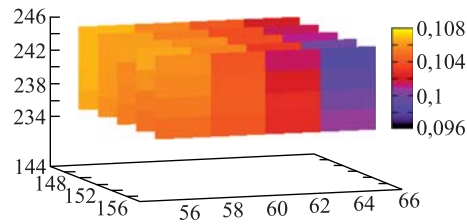


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Область устойчивости (амплитуда тока обозначена цветом, А; оси X, Y, Z — набор бетатронных фаз на арках ускорителя, °) ($Q = 5 \cdot 10^4$, $\rho = 100$ Ом)

Полученные параметры установки использовались для численного моделирования в программе VI [10]. Результат оптимизации представлен на рис. 4.

Для системы с более высокой добротностью резонаторов ($Q = 5 \cdot 10^4$, $\rho = 100$ Ом) использовался метод подстройки частот дипольных мод. С учетом ширины мод пороговые токи удалось поднять до 50 мА при ширине области устойчивости 5° .

3. ПРОДОЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Для работы источника излучения высокой мощности необходимо догруппировывать электронный пучок во время движения к ондулятору (см. рис. 1). Необходимые для этого ненулевые значения продольной дисперсии замыкают петлю неустойчивости пучок–резонатор (см. рис. 2). Устойчивость многооборотного УР с одним ускоряющим промежуток рассматривалась в [7].

Для анализа устойчивости используется однорезонаторное приближение. Взаимодействие электронного тока и ВЧ-резонатора удобно представлять в виде эквивалентного контура с сосредоточенными параметрами. Тогда токи электронного пучка и генератора представляются в виде источников тока. Для анализа этой системы используется теория возмущений стационарного состояния [11]. Ток пучков $I_{b1,2}$ зависит от всех напряжений линаков $U_{1,2}$ из-за фазового движения $I_\alpha(U_1, U_2) = I_\alpha(\text{Re}U_1, \text{Im}U_1, \text{Re}U_2, \text{Im}U_2)$. Уравнения преобразуются в систему однородных линейных уравнений $\lambda \delta \mathbf{U} = \mathbf{M} \delta \mathbf{U}$ с условием разрешимости $|\mathbf{M} - \lambda \mathbf{E}| = 0$, где \mathbf{M} — матрица проводимости:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \rho_1 \frac{\partial \text{Re} I_{b1}}{\partial \text{Re} U_1} - \frac{1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \text{Re} I_{b1}}{\partial \text{Im} U_1} - \frac{\xi_1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \text{Re} I_{b1}}{\partial \text{Re} U_2} & \rho_1 \frac{\partial \text{Re} I_{b1}}{\partial \text{Im} U_2} \\ \rho_1 \frac{\partial \text{Im} I_{b1}}{\partial \text{Re} U_1} + \frac{\xi_1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \text{Im} I_{b1}}{\partial \text{Im} U_1} - \frac{1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \text{Im} I_{b1}}{\partial \text{Re} U_2} & \rho_1 \frac{\partial \text{Im} I_{b1}}{\partial \text{Im} U_2} \\ \rho_2 \frac{\partial \text{Re} I_{b2}}{\partial \text{Re} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \text{Re} I_{b2}}{\partial \text{Im} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \text{Re} I_{b2}}{\partial \text{Re} U_2} - \frac{1}{Q_2} & \rho_2 \frac{\partial \text{Re} I_{b2}}{\partial \text{Im} U_2} - \frac{\xi_2}{Q_2} \\ \rho_2 \frac{\partial \text{Im} I_{b2}}{\partial \text{Re} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \text{Im} I_{b2}}{\partial \text{Im} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \text{Im} I_{b2}}{\partial \text{Re} U_2} + \frac{\xi_2}{Q_2} & \rho_2 \frac{\partial \text{Im} I_{b2}}{\partial \text{Im} U_2} - \frac{1}{Q_2} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

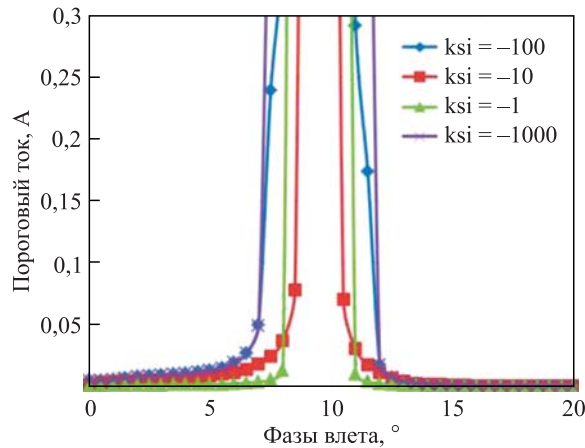


Рис. 5. Зависимость порогового тока от фазы влета при разных расстройках резонатора (теория) (все $R_{56} = 1$ м, кроме $R_{56 \text{ und}} = 2$ м)

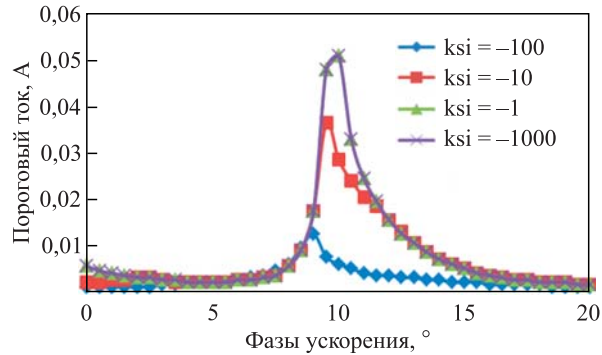


Рис. 6. Зависимость порогового тока от фазы влета при разных расстройках резонатора (теория) (все до ондулятора $R_{56} = 1$ м, $R_{56 \text{ und}} = 2$ м, после ондулятора $R_{56} = 0$)

Условие отрицательности действительной части собственных чисел $\mathbf{M} \operatorname{Re}(\lambda_i) < 0$ будет определять области устойчивости. Также необходимым условием работы ускорителя является рекуперация энергии и продольная фокусировка. Условия устойчивости матрицы \mathbf{M} выражаются критерием Лиенара–Шипара [12], описывающегося четырьмя неравенствами. Для различных расстроек резонаторов и одинаковых ускоряющих фаз были вычислены пороговые токи. В случае установки одного ондулятора на средней дорожке необходимость догруппировывать пучок после излучения не является критической. Поэтому были рассмотрены два случая с разными элементами R_{56} транспортной матрицы: 1) $R_{56} = 1$ м для всех дорожек, кроме дорожки с ондулятором, где $R_{56} = 2$ м (рис. 5); 2) $R_{56} = 1$ м для всех дорожек до ондулятора, $R_{56} = 2$ м на дорожке с ондулятором, $R_{56} = 0$ для всех дорожек после ондулятора (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате расчетов были получены максимальные допустимые значения добротностей несимметричных мод и рассмотрен механизм настройки частот и набегов бетатронных фаз. Получены области устойчивости набегов бетатронных фаз, обеспечивающие высокий средний ток 100 мА УР для взаимодействия электронного пучка с дипольными модами резонаторов.

В случае взаимодействия с основной модой были рассмотрены два варианта режимов настройки группировки пучка. Ненулевые значения R_{56} арок после дорожки с установленным ондулятором увеличивают область устойчивости и величину порогового тока пучка. Были определены диапазоны ускоряющих фаз и расстроек резонаторов, необходимых для получения среднего тока 100 мА.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulipanov G. N., Skrinsky A. N., Vinokurov N. A. Synchrotron Light Sources and Recent Development of Accelerator Technology // J. Synchrotron Rad. 1998. V. 5, No. 3. P. 176–178.
2. Sokol Y. et al. Compact 13.5-nm Free Electron Laser for Extreme Ultraviolet Lithography // PRST AB. 2011. V. 14. P. 040702.

3. *Shevchenko O. A. et al.* Commissioning Status and Further Development of the Novosibirsk Multiturn ERL // Proc. of ERL2013, Novosibirsk, Russia, 2013. P. 6–10.
4. *Douglas D.* Generic Energy-Recovering Bisected Asymmetric Linac (GERBAL) // Intern. Committee for Future Accelerators Beam Dynamics Newslet. (ICFA BD-NI). 2001. V. 26. P. 40–45.
5. *Getmanov Y. V. et al.* Full Spatial Coherent Multiturn ERL X-Ray Source (MARS) Based on Two Linacs // J. Phys.: Conf. Ser. Bristol: IOP Publ., 2013.
6. *Кулипанов Г. Н. и др.* Источник рентгеновского излучения на базе многооборотного ускорителя-рекуператора (МАРС) // Науч. вестн. НГТУ. 2013. С. 112–118.
7. *Vinokurov N. A. et al.* Critical Issues for High-Power FEL Based on Microtron Recuperator/Electron Out-Coupling Scheme // Proc. of SPIE Conf. 1997. V. 2988. P. 221–231.
8. *Hoffstaetter G., Bazarov I.* Beam-Breakup Instability Theory for Energy Recovery Linacs // PRST AB. 2004. V. 7. P. 054401.
9. *Borland M.* A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation, Advanced Photon Source LS-287. 2000.
10. *Bazarov I. V.* bi — Beam Instability BBU Code. <http://www.lepp.cornell.edu/~ib38/bbucode/src>.
11. *Гетманов Я. В., Винокуров Н. А., Шевченко О. А.* Продольная устойчивость в ускорителе-рекуператоре с двумя ускоряющими структурами // Науч. вестн. НГТУ. 2013. С. 119–127.
12. *Грантмахер Ф. Р.* Теория матриц. М.: Наука, 1966.