

# Микроондулятор для рентгеновского ЛСЭ

И.В. Бандуркин, П.В. Логинов, Н.Ю. Песков, А.В. Савилов, А.Э. Федотов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

**Аннотация:** в данной работе предложен и исследован вариант импульсного микроондулятора с периодом 1 мм на основе тонких проводящих пластин с разрезами. Такой микроондулятор, обладающий достаточной механической прочностью и устойчивостью к перегреву даже при ондуляторном параметре, близком к единице, представляется перспективным для использования в ЛСЭ рентгеновского диапазона. Проведены расчёт ондуляторного поля и оптимизация геометрических параметров системы, а также предложен способ плавного увеличения ондуляторного параметра вдоль траектории электронного пучка. На основании расчётов изготовлены опытные образцы пластин микроондулятора и проведена серия экспериментов по исследованию их устойчивости к омическому нагреву в рабочем режиме.

**Ключевые слова:** рентгеновский ЛСЭ, ондулятор

## 1. Введение

Актуальной проблемой современной физики является создание источников когерентного электромагнитного излучения в слабоосвоенных диапазонах частот. Одним из таких перспективных диапазонов считается рентгеновский диапазон, в котором может быть эффективно реализован механизм генерации ондуляторного излучения в конструкции лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Однако существующие в настоящий момент рентгеновские ЛСЭ требуют, как правило, больших и дорогостоящих ускорителей электронов [1,2], что создает интерес к исследованию возможности применения более компактных ускорителей [3,4]. Так, перспективной возможностью является использование плазменных ускорителей электронов [5, 6], которые за счет значительно большего, чем в классических системах, градиента ускорения позволяют обеспечить необходимую для генерации в рентгеновском диапазоне энергию электронного сгустка на гораздо меньшей длине. В силу значительной угловой расходимости электронного пучка из плазменного ускорителя и сопутствующего ей быстрого снижения яркости пучка вдоль рабочего пространства, представляется перспективным уменьшение длины взаимодействия до нескольких сантиметров за счет укорочения периода ондулятора с типичных значений  $\lambda_u = 25 - 50$  мм до  $\lambda_u = 1$  мм и одновременного увеличения инкремента ондуляторной неустойчивости до нескольких  $\text{мм}^{-1}$ .

В работе предложен вариант токового микроондулятора на основе тонких проводящих пластин с разрезами. Исследованы параметры микроондулятора, необходимые для генерации рентгеновского излучения, рассмотрена конструкция и численное моделирование предлагаемой системы, проведен анализ нагрева системы при прохождении импульса тока.

## 2. Рентгеновский ЛСЭ на основе плазменного ускорителя

При прохождении через ондулятор, сгусток электронов генерирует синхротронное ондуляторное излучение на длине волны, сосредоточенной вблизи резонансной:

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K_{eff}^2), \quad (1)$$

где  $\lambda_u$  – период ондулятора,  $\gamma$  – релятивистский Лоренц-фактор, который

определяется через среднюю энергию частиц  $E$  как  $\gamma \approx 1 + \frac{E(\text{кэВ})}{511\text{кэВ}}$ .

Параметр ондуляторности  $K_{eff}$ , пропорциональный поперечному импульсу электронов, для плоского ондулятора описывается выражением:

$$K_{eff} = \frac{eB\lambda_u}{2\pi m_e c} / \sqrt{2}, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $B$  – амплитуда ондуляторного поля,  $\lambda_u$  – период ондулятора,  $m_e$  – масса электрона,  $c$  – скорость света в вакууме. Из формулы (2) следует, что для обеспечения ондуляторного параметра  $K_{eff} \approx 1/\sqrt{2}$  при желаемом периоде ондулятора  $\lambda_u = 1$  мм, амплитуда создаваемого ондулятором на траектории пучка магнитного поля должна составлять  $B \approx 10$  Тл.

Такое значение амплитуды магнитного поля наряду с малостью периода, накладывает значительные ограничения на его конструкцию. Поле намагниченности ферромагнитных материалов насыщается при значениях  $B \approx 2$  Тл, что делает невозможным использование постоянных магнитов в конструкции ондулятора. В таких условиях наиболее перспективной представляется плоская конфигурация микроондулятора с прямой запиткой токовым импульсом. Отсутствие в такой системе ограничений по одной пространственной координате открывает перспективы для более эффективного отведения выделяющегося тепла.

### 3. Конструкция и расчет микроондулятора

Предложенная в работе конструкция представляет собой микроондулятор на основе двух медных пластин с периодическими прямоугольными вырезами (рисунок 1). Чтобы использовать его для генерации излучения, необходимо также обеспечить плавный вход пучка в пространство взаимодействия с постепенным нарастанием магнитного поля. Это связано с появлением дрейфовой скорости у сгустка электронов при их резкой инжекции в интенсивное магнитное поле. Для решения данной проблемы, предлагается модулировать глубину вырезов во входной части ондулятора, тем самым создавая линейный рост магнитного поля.

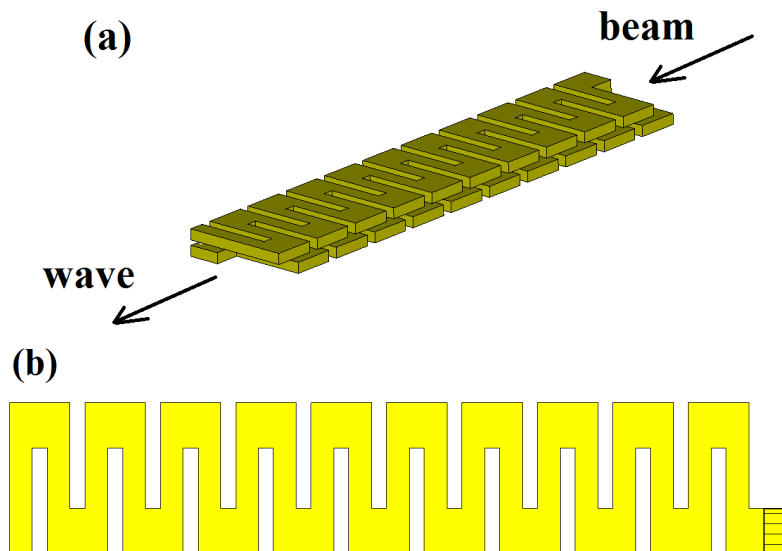
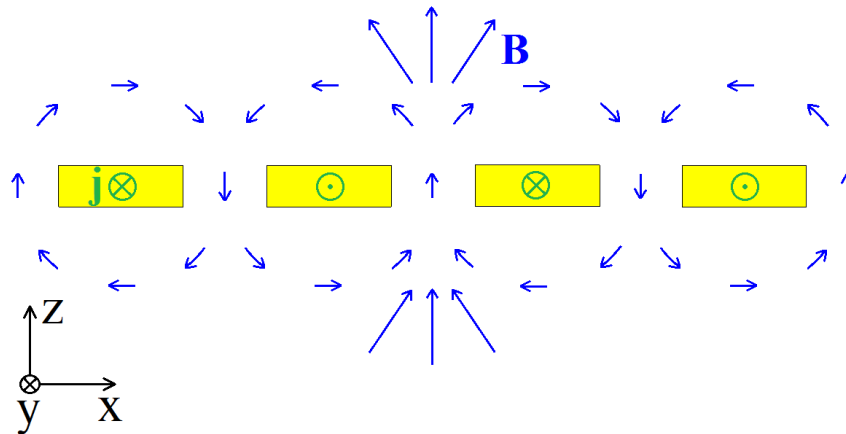


Рисунок 1. Схема предлагаемого микроондулятора (a) и одной пластины с вырезами (b).

Ондулятор запитывается источником импульсного тока, причем в данной конфигурации возможны два варианта подключения пластин. Вариант со встречными токами в верхней и нижней пластинах реализуется наиболее просто путем

последовательного включения пластин, однако в этом случае за счет разнонаправленного продольного тока в пластинах между ними может возникать нежелательная боковая компонента магнитного поля, приводящая к дрейфу пучка в сторону одной из пластин. При увеличении глубины вырезов влияние этой компоненты уменьшается, однако может быть все еще существенно на этапе ввода пучка в ондулятор. С другой стороны, параллельное включение пластин при той же величине ондуляторного поля требует либо вдвое большего суммарного тока от источника, либо более сложной конфигурации соединений, что также может привести к появлению нежелательных компонент магнитного поля на траектории частиц.

Сечение ондулятора плоскостью, перпендикулярной пластине и содержащей продольную ось, представляет собой систему разделенных протяженных проводников с током. В случае глубоких прорезей магнитное поле в канале для электронов слабо отличается от поля периодической системы однородных бесконечно длинных проводов. Ток по соседним проводникам течет в противоположных направлениях, что обеспечивает максимум ондуляторной компоненты магнитного поля в плоскостях между ними (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Схематическое изображение токов и магнитного поля ондулятора в приближении параллельных проводников

Если учесть, что ток, протекающий через ондулятор, имеет периодическую зависимость от координаты  $x$ , а проводник имеет конечную толщину вдоль оси  $z$ , используя экспоненциальную зависимость магнитного поля от вертикальной координаты, можно получить формулу для ондуляторной компоненты поля:

$$B_z = B_1 \sin(hx) \frac{1}{D} \int_0^D e^{-h(z+\delta)} d\delta = \frac{\mu_0 I}{\pi a} \frac{1 - e^{-Dh}}{Dh} \sin\left(\frac{\pi a}{\lambda_u}\right) \sinh x e^{-hz}, \quad (3)$$

где  $h = 2\pi/\lambda_u$ , а  $D$  – толщина проводников с током вдоль  $z$ .

Из (4) следует, что для двух пластин толщиной 0,2 мм, расположенных на расстоянии 0,2 мм друг от друга, и ширине токоведущих частей 0,3 мм, для достижения суммарной величины магнитного поля  $B_z = 10$  Тл, необходимо пропустить через каждую пластину ток  $I \approx 10$  кА.

Для численного моделирования предложенной системы был использован программный пакет CST Studio Suite. Было получено распределение магнитного поля в пространстве между пластинами ондулятора при геометрической конфигурации системы, указанной в Таблице 1. В результате численного моделирования было определено, что для обеспечения требуемого значения индукции магнитного поля порядка 10 Тл ток, текущий через ондулятор, должен составлять  $\sim 10$  кА, что совпадает с расчетными данными.

Таблица 1. Параметры ондулятора

Толщина пластин	0,2 мм
Зазор между пластинами	0,2 мм
Ширина центрального провода	0,3 мм
Период ондулятора	1 мм
Ток	10 кА

#### 4. Испытание устойчивости ондулятора к омическому нагреву

Протекание тока величиной  $\sim 10$  кА через проводник сечением 0,2 на 0,3 мм сопряжено с мгновенным выделением большого количества тепла, что может привести к разрушению токопроводящих пластин. Расчеты показали, что температура пластины возвращается к начальному значению за время  $\sim 500$  мкс, что заведомо больше интервалов между импульсами. Соответственно для вычисления омического нагрева стоит учитывать лишь нагрев за время прохождения одного импульса. При расчетах учитывалась зависимость сопротивления проводника от температуры и синусоидальная форма импульса, подаваемого на пластины. Результаты показывают (Рисунок 3), что для заданной геометрии и тока 10 кА длительность импульса не должна превышать 3,5 мкс.

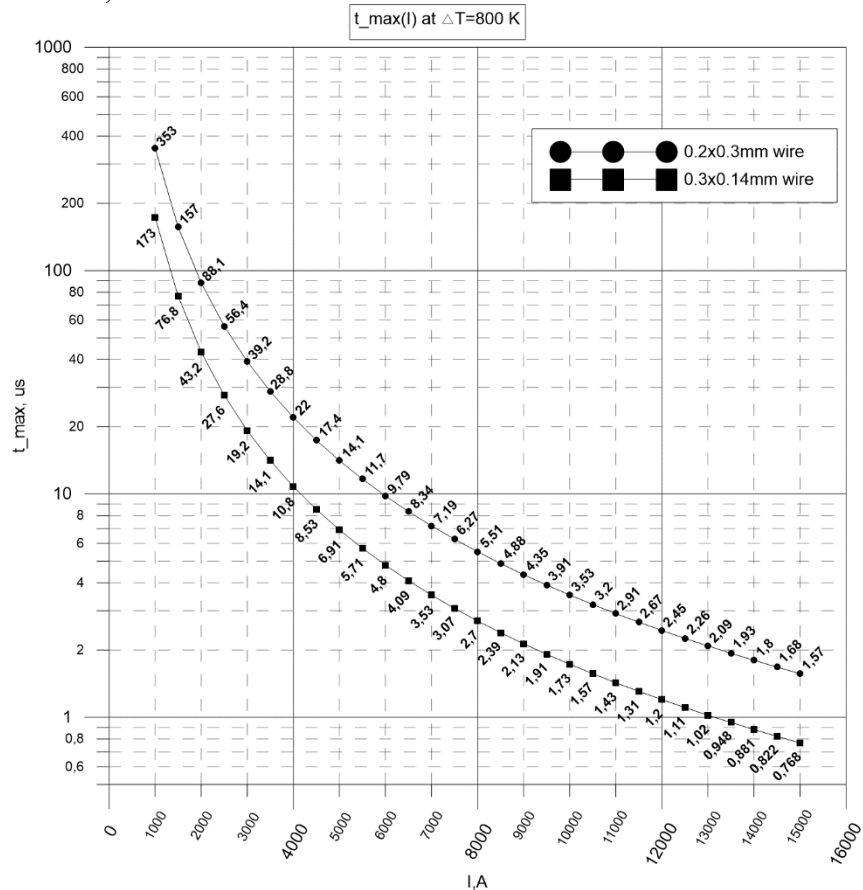


Рисунок 3. Зависимость максимальной допустимой длительности импульса от величины тока для двух разных геометрий микроондулятора при верхнем допустимом пороге температуры  $825^\circ\text{C}$ .

С целью проверки полученных данных на практике были изготовлены несколько макетов ондуляторных пластин. Первый вариант изготавливался электроэрозионным способом, и его конечные размеры несколько отличались от проектных – толщина пластины составляла 0,3 мм вместо предполагаемой величины 0,2 мм, а ширина прорезей достигала 0.35 мм, что в сумме на четверть уменьшило сечение

ондуляторных проводников. Кроме того, используемый источник тока на основе высоковольтного конденсатора емкостью 100 мкФ обеспечивал лишь относительно длинные импульсы  $\sim 50$  мкс, что соответствующим образом (рис. 3) уменьшало предельный ток через пластину. Пластина стабильно выдерживала импульсы тока величиной  $I = 3$  кА, а равномерное разрушение пластины вдоль ондуляторной части произошло при токе около 3,5 кА.

Для уменьшения длительности импульса емкость конденсатора в источнике тока была снижена до 20 мкФ, что позволило получить синусоидальный импульс длительностью 6,5 мкс. Пластина, используемая во втором эксперименте, была изготовлена фрезерным методом и точнее удовлетворяла проектным размерам (Таблица 1). Она стабильно выдерживала импульсы тока амплитудой до 8 кА. Результаты с высокой долей точности соответствуют теоретическим расчётам и дают уверенность в том, что предлагаемый микроондулятор способен выдержать необходимый ток 10 кА, длительностью 3,5 мкс.

Работа поддержана **Российским научным фондом (грант №21-72-30027)**.

#### Список литературы

1. Ackermann W. et al. Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window //Nature photonics. – 2007. – Т. 1. – №. 6. – С. 336-342.
2. Emma P. et al. First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser //nature photonics. – 2010. – Т. 4. – №. 9. – С. 641-647.
3. Ishikawa T. et al. A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region //nature photonics. – 2012. – Т. 6. – №. 8. – С. 540-544.
4. Nakajima K. Towards a table-top free-electron laser //Nature physics. – 2008. – Т. 4. – №. 2. – С. 92-93.
5. Faure J. et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams //Nature. – 2004. – Т. 431. – №. 7008. – С. 541-544.
6. Maier A. R. et al. Demonstration scheme for a laser-plasma-driven free-electron laser //Physical Review X. – 2012. – Т. 2. – №. 3. – С. 031019.