

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 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 λ_u – период ондулятора, γ – 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, λ_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.

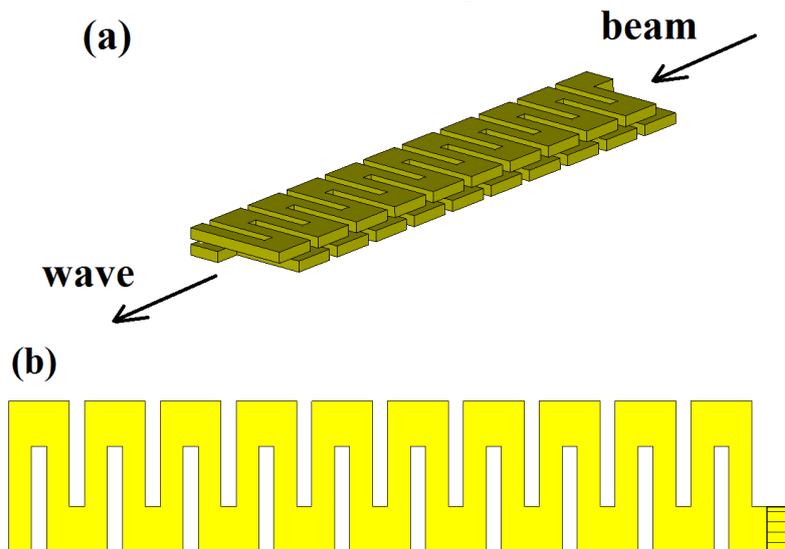


Рисунок 1. Схема предлагаемого микроондулятора (a) и одной пластины с вырезами (b).

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).

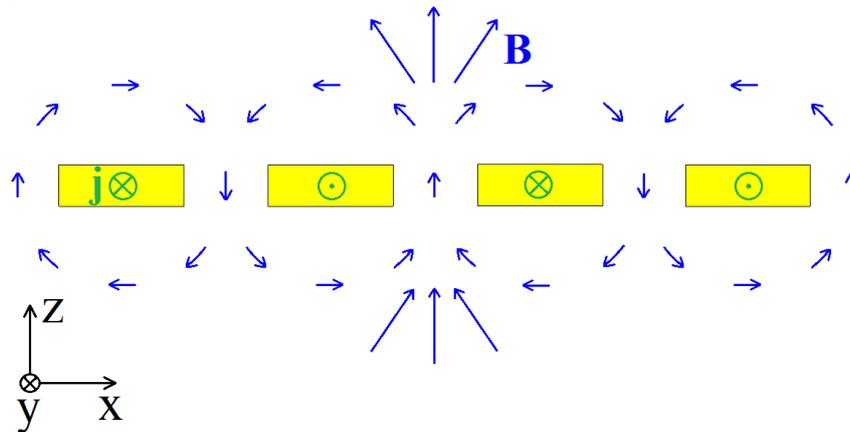


Рисунок 2. Схематическое изображение токов и магнитного поля ондулятора в приближении параллельных проводников

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 ~ 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 ~ 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 ~ 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.

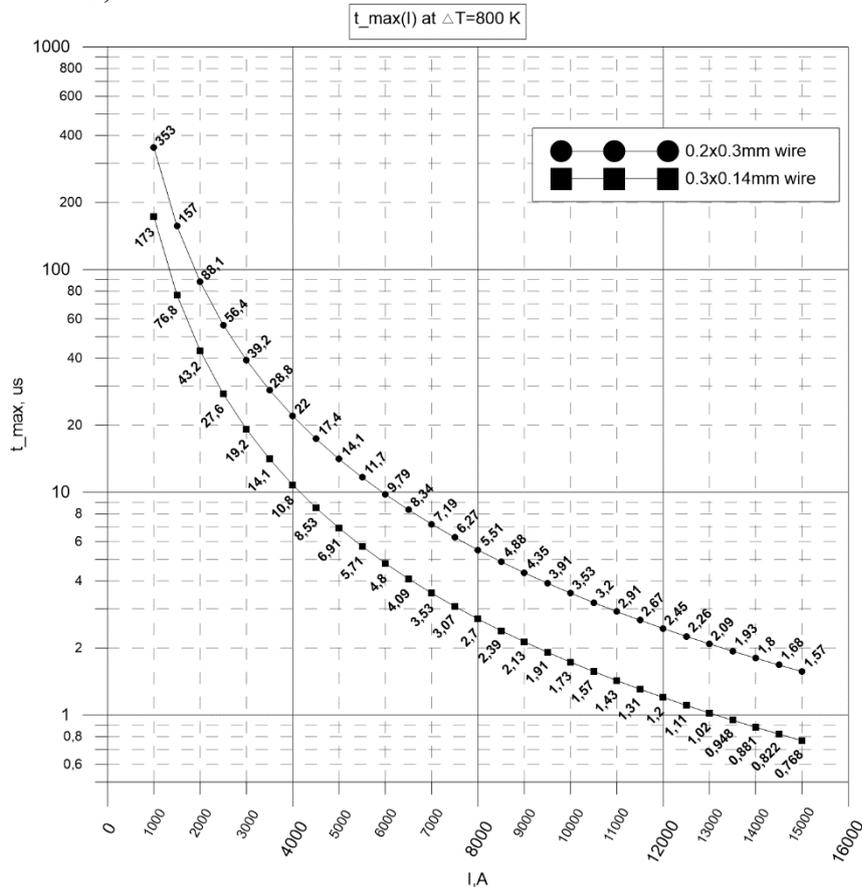


Рисунок 3. Зависимость максимальной допустимой длительности импульса от величины тока для двух разных геометрий микроондулятора при верхнем допустимом пороге температуры 825°C .

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 ~ 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.