

# Планарный микроондулятор для терагерцового ЛСЭ с ленточным сильноточным релятивистским пучком

И.В. Бандуркин, Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, М.Н. Вилков, П.В. Логинов, Н.Ю. Песков, А.Э. Федотов.

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

**Аннотация:** в работе предложен и исследован вариант планарного импульсного микроондулятора с периодом 5 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 терагерцового диапазона. Проведены расчёт ондуляторного поля и оптимизация геометрических параметров системы, предложен ряд способов плавного увеличения ондуляторного параметра вдоль траектории электронного пучка. Рассмотрена проблема обеспечения поперечной неоднородности пучка из-за диокотронной неустойчивости и варианты ее решения.

**Ключевые слова:** терагерцовый ЛСЭ, ондулятор

## 1. Введение

Использование микроондуляторов с периодом менее 1 см [1-5] в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) позволяет существенно сократить требования к параметрам электронного пучка. В данной работе в качестве микроондулятора для терагерцового ЛСЭ предлагается использовать систему, предложенную в [5,6] и представляющую собой пару медных пластин, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга с обеих сторон электронного пучка и имеющих каждая систему периодических встречных разрезов. Ондуляторное поле в такой системе создается импульсным электрическим током, протекающим вдоль пластин по огибающей разрезы траектории.

При периоде ондулятора 5 мм для генерации излучения терагерцового диапазона достаточно энергии частиц в несколько сотен кэВ, что позволяет использовать сильноточный ленточный релятивистский электронный пучок (РЭП), формируемый ускорителем прямого действия со взрывоэмиссионным катодом [7,8]. Кроме того, использование ленточного РЭП представляется естественным для ЛСЭ с планарным ондулятором. Согласно расчетам [8], при токе пучка порядка 1 кА в такой системе может достигаться субгигаватный уровень мощности выходного излучения. При этом требуется обеспечить довольно большой ондуляторный параметр  $>0,5$ , что при периоде ондулятора 5 мм соответствует амплитуде ондуляторного поля не менее 1 Тл. В приближении большой по сравнению с периодом величины перекрытия встречных разрезов, верном для системы с ленточным РЭП, выражение для синхронной гармоник магнитного поля на оси имеет вид [5]:

$$B_u = 4 \frac{\mu_0 I}{\pi a} \frac{1 - e^{-Dh}}{Dh} \sin\left(\frac{ha}{2}\right) \sin hx e^{-\frac{hH}{2}}, \quad \left( \begin{array}{l} 1 \\ 1 \end{array} \right)$$

где  $a$  – ширина проводника,  $I$  – ток и  $h = 2\pi/\lambda_u$  – ондуляторное волновое число. Согласно (1), при размерах ондулятора, указанных в Таблице 1, амплитуда поля 1 Тл достигается при токе  $I \approx 10$  кА.

Таблица 1. Параметры терагерцового ЛСЭ

Толщина пластин	$D$	0,5 мм
Зазор между пластинами	$H$	2,5 мм
Ширина центрального провода	$a$	2 мм
Период ондулятора	$\lambda_u$	5 мм
Ток	$I$	10 кА
Ондуляторное поле	$B_u$	1 Тл
Ведущее поле	$B_0$	5 Тл
Энергия электронов	$E$	500 кэВ
Ток пучка	$I_b$	1 кА
Ширина пучка	$w$	20 мм
Частота излучения	$f$	0,313 ТГц

## 2. Конструкция и расчет микроондулятора

Существенную сложность при создании токового микроондулятора представляет собой обеспечение его механической прочности и устойчивости к омическому нагреву. Медная пластина толщиной 0,5 мм и шириной токоведущих частей 2 мм выдерживает 10 кА импульс тока довольно большой длительности около 1,5 мс. Однако следует обеспечить также устойчивость ондулятора к действию значительной силы Ампера, возникающей в отношении ондуляторных проводов как со стороны соседних проводов, так и со стороны ведущего магнитного поля порядка 5 Тл. Для обеспечения нужной жесткости предлагается использовать для изготовления ондулятора комбинированные пластины, представляющие собой каждая слой меди необходимой толщины, наращенный на стальную пластину толщиной 2 мм. Структура ондуляторного поля в такой двуслойной пластине практически не искажается, однако его амплитуда несколько снижается из-за оттока около 10% тока в сталь. Для дополнительного усиления конструкции предполагается, что пластины ондулятора будут крепиться к оснастке эпоксидной смолой, что накладывает дополнительные ограничения на максимальную температуру токоведущих частей и сокращает максимально допустимую длительность 10 кА импульса до 0,5 мс. Кроме того, можно использовать переменный в пространстве характер силы Ампера и еще увеличить жесткость системы, «зацепив» соседние ондуляторные провода друг за друга, наклонив разрезы в пластине (Рисунок 1). Расчеты показывают, что структура ондуляторного поля при этом изменяется не существенно.

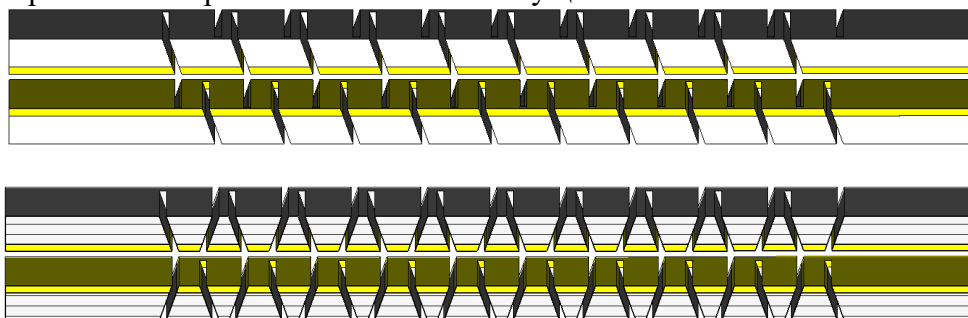
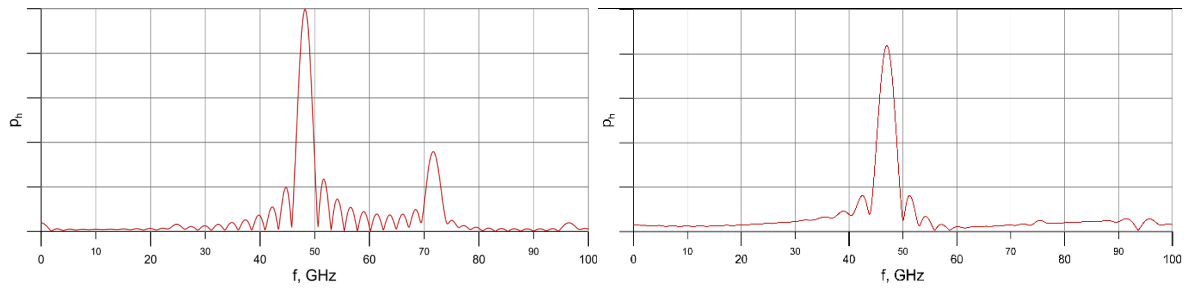


Рисунок 1. Внешний вид пластин ондулятора с разрезами под углом 20° сбоку (сверху) и в сечении (снизу).

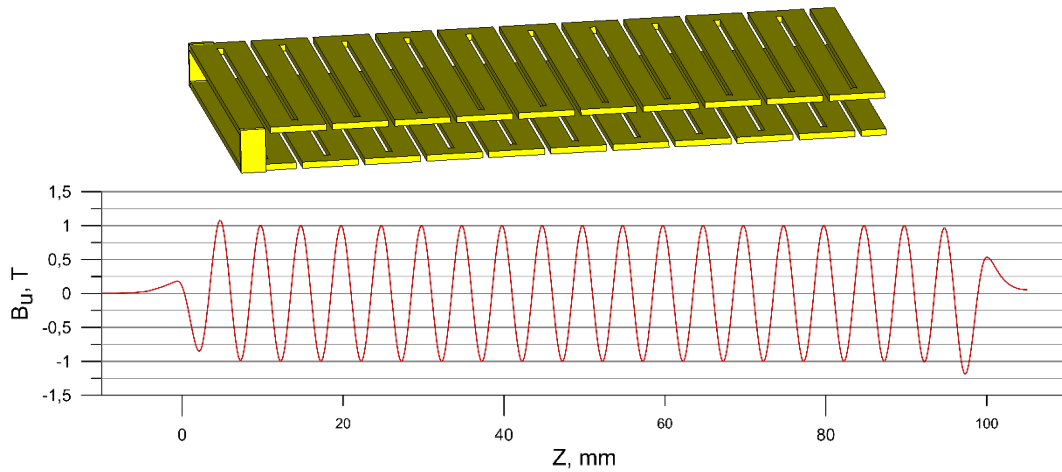
## 3. Обеспечение плавной раскачки ондуляторных колебаний

Чтобы предотвратить возникновение паразитных циклотронных колебаний частиц в ведущем магнитном поле (Рисунок 2), необходимо обеспечить плавный ввод пучка в область рабочего ондуляторного поля. В рамках обсуждаемой системы возможны несколько вариантов решения данной проблемы.



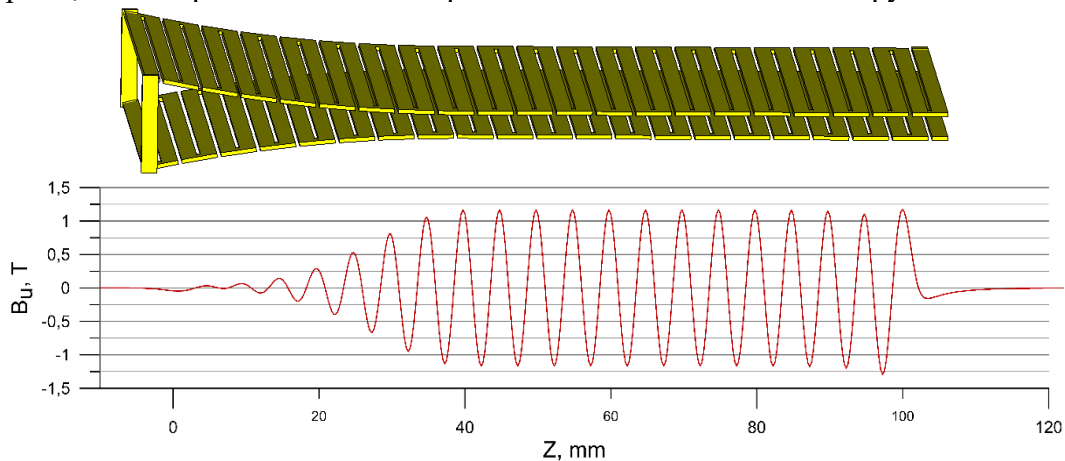
**Рисунок 2.** Спектр поперечного импульса электронов в ондуляторе. В отсутствие плавного входа (слева) помимо ондуляторной раскочки пучка на частоте  $\approx 48$  ГГц возникают синхротронные колебания ( $\approx 72$  ГГц). При наличии плавного входа (справа) они отсутствуют.

Простейший вариант предусматривает добавление дополнительной перемычки в области соединения пластин на входе в ондулятор (Рисунок 3), что позволяет получить более плавное нарастание поля на первом периоде колебаний ондуляторного поля.



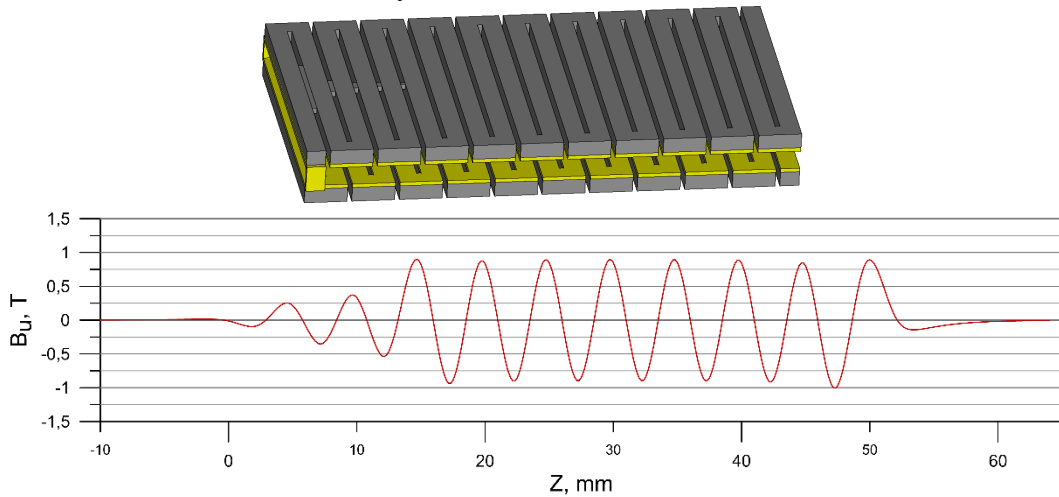
**Рисунок 3.** Внешний вид ондулятора с двумя перемычками на конце пластин (сверху) и его ондуляторное поле (снизу).

Более выраженного эффекта можно достичь при плавном увеличении зазора между пластинами ближе ко входу в ондулятор (Рисунок 4). Такая конструкция позволяет легко варьировать скорость нарастания поля путем изменения угла раскрыва, однако реализация ее на практике может быть весьма затруднительна.



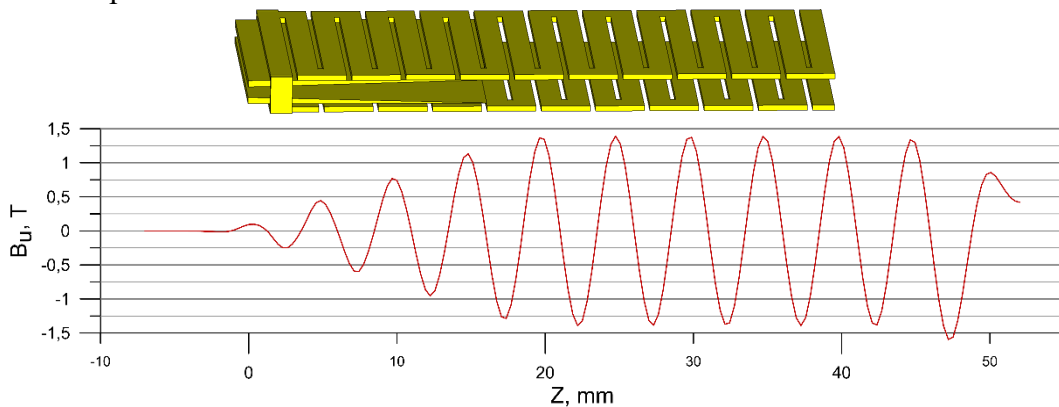
**Рисунок 4.** Внешний вид ондулятора с раскрывом пластин (сверху) и его ондуляторное поле (снизу).

Альтернативным методом может быть добавление перемычек разного сечения между первыми периодами пластин ондулятора (Рисунок 5). Такой подход требует довольно тонкой настройки, что может быть сопряжено с производственными трудностями, однако он позволяет получить любой вид нарастания амплитуды поля. Существенным ограничением такой конструкции может стать омический нагрев тонких перемычек. Теоретические расчеты показывают, что для создания нужного профиля поля площадь сечения наименьшей из перемычек должна составлять  $0,3 \text{ мм}^2$ , что ограничивает длительность импульса в 10 кА сотней микросекунд. Кроме того, нарушается однородность поля по широкой поперечной координате, что нежелательно при использовании ленточного пучка.



**Рисунок 5.** Внешний вид ондулятора с последовательными перемычками (сверху) и его ондуляторное поле (снизу).

Еще один способ реализации плавного входа основан на импульсном характере ондуляторного поля и заключается в добавлении в зазоре между пластинами проводящих клиньев, частично экранирующих поле в области пучка (Рисунок 6). Ввиду простоты производства эта конструкция в настоящее время представляется наиболее перспективной.

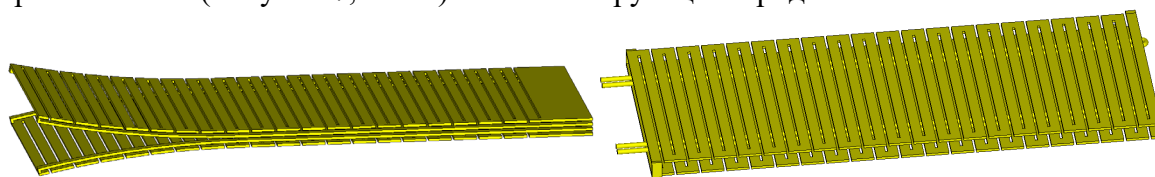


**Рисунок 6.** Внешний вид ондулятора с клиньями (сверху) и его ондуляторное поле (снизу).

#### 4. Обеспечение поперечной однородности пучка

Для наиболее эффективного взаимодействия в ЛСЭ необходимо, чтобы раскачка пучка была однородной по поперечным координатам, что, в свою очередь, требует поперечной однородности ондуляторного поля. Это условие нарушается вблизи краев вырезов, что может приводить при недостаточной ширине их перекрытия к отклонению края пучка по одной из перпендикулярных координат. В условиях

ограниченного поперечного размера соленоида, создающего магнитное поле, увеличение ширины ондуляторных пластин может оказаться невозможным. Одним из решений данной проблемы может быть пропускание тока по проводам, идущим вдоль краев пластин (Рисунок 7, слева) и компенсирующим продольный ток в этой области.



**Рисунок 7.** Внешний вид ондулятора с подведением тока вдоль краев (слева) и проводниками по краям пучка (справа)

Также следует упомянуть, что существенное влияние на движение электронов оказывает диокотронная неустойчивость, искривляющая поперечный профиль пучка за счет дрейфа частиц в комбинации ведущего магнитного поля и электрического поля собственного пространственного заряда пучка. Уменьшить ее влияние можно путем создания по краям пучка локального магнитного поля, направленного перпендикулярно пластинам и изгибающего силовые линии ведущего поля. Одним из практически осуществимых в условиях рассматриваемой системы способов генерации такого поля может быть использование системы из двух проводников, протянутых вдоль краев пучка (Рисунок 7, справа). Если в роли проводника выступает медная проволока диаметром 1 мм, расположенная на расстоянии 0,3 мм от краев пучка, то при ведущем поле в 5 Тл ток, который необходимо пропустить по такой проволоке, составляет 200 А, что вполне осуществимо для длительности импульса в десятки микросекунд.

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

#### Список литературы

1. Varfolomeev A. A. et al. Strong magnetic field microundulator with permanent magnets inserted into a solenoid //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1993. – Т. 331. – №. 1-3. – С. 745-747.
2. Balal N., Bratman V. L., Magory E. New varieties of helical undulators //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2020. – Т. 971. – С. 163895.
3. Rykovanov S. G. et al. Plasma undulator based on laser excitation of wakefields in a plasma channel //Physical Review Letters. – 2015. – Т. 114. – №. 14. – С. 145003.
4. Tantawi S. et al. Experimental demonstration of a tunable microwave undulator //Physical Review Letters. – 2014. – Т. 112. – №. 16. – С. 164802.
5. Bandurkin I. et al. Project of pulsed undulator with millimeter period for THz and X-ray sources //2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2023. – С. 1-2.
6. Ginzburg N. S. et al. Terahertz super-radiance from picosecond electron bunches moving through a micro-undulator //Physics of Plasmas. – 2024. – Т. 31. – №. 3.
7. Malkin A. M. et al. Development of high-power millimeter-wave surface-wave generators based on relativistic ribbon electron beams //Radiophysics and quantum electronics. – 2020. – Т. 63. – С. 458-468.
8. Zaslavsky V. Y. et al. Theoretical and experimental studies of W-band relativistic surface-wave oscillator of planar geometry //Physics of Plasmas. – 2023. – Т. 30. – №. 4.