

## СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ ЛИНЗАМИ

*Б. Ю. Богданович<sup>а,1</sup>, Г. О. Буянов<sup>а,2</sup>,  
А. В. Нестерович<sup>а,3</sup>, Ю. В. Помазан<sup>б,4</sup>*

<sup>а</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

<sup>б</sup> Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, Москва

Предложен метод получения тормозного излучения с помощью последовательности тонких конвертеров. Описаны преимущества данного метода, а также недостатки. Показано изменение пучка в ходе движения в данной системе, и приведены результаты оценочного расчета.

In this paper, we propose a method for obtaining bremsstrahlung using a sequence of thin converters. The advantages of this method, as well as disadvantages, are described. The change of the beam during the motion in this system is shown, and the results of the estimated calculation are also presented.

PACS: 11.10.Ef

### ВВЕДЕНИЕ

Данная работа направлена на совершенствование методов дистанционного радиационного контроля с линейными ускорителями, в частности, на решение задач обработки крупногабаритных объектов, удаленных объектов с помощью зондирующего пучка вторичного излучения линейного ускорителя электронов.

Общие принципы формирования пучков тормозного излучения (ТИ), генерируемых электронными пучками, изложены ранее [1]. Суть предложения сводится к использованию последовательности тонких конвертеров, в промежутках между которыми с помощью пар магнитов создается поле, изменяющее разброс поперечных скоростей электронов, при этом размеры пучка возрастают, а угловой разброс уменьшается. Это позволяет минимизировать угловой разброс фотонов генерируемого тормозного излучения в конвертерах.

---

<sup>1</sup>E-mail: bybogdanovich@mephi.ru

<sup>2</sup>E-mail: gobuyanov@mephi.ru

<sup>3</sup>E-mail: frontlines.07@gmail.com

<sup>4</sup>E-mail: yupom@yandex.ru

Первоначально данная идея прошла экспериментальную апробацию в варианте с параллельным переносом пучка (типа «лесенка» [1]), а затем в варианте с последовательностью магнитов осесимметричных линз. Общие принципы расчета и конструирования систем данного класса в варианте с однонаправленным магнитным полем на оси в соседних линзах изложены в работе [2]. К данному классу можно отнести и систему с чередующимся направлением магнитного поля на оси, реализованную практически. Установки подобного типа могут быть использованы при обнаружении азотосодержащих веществ, входящих, в частности, в состав опасных (взрывоопасных) предметов.

К недостаткам системы в последнем случае можно отнести общие закономерности деградации со временем параметров магнитного поля, локальную неоднородность магнитного поля в магнитных полюсных наконечниках оси и самих постоянных магнитах, относительно большую массу, что принципиально для систем с перенацеливанием пучка. В случае с электромагнитами проблемы снимаются только частично, зато возникают новые — энергопотребление, охлаждение, масса и др.

Электростатические линзы вместо магнитных могут быть значительно легче (в 2–3 раза), гораздо эффективнее с точки зрения минимизации aberrаций оптической системы, из-за этого КПД преобразования энергии пучка электронов в энергию ТИ в нужном угле расходимости гораздо выше (на порядок). Как показывает расчет [2], электростатическая система до энергии  $\sim 100$  МэВ предпочтительнее магнитной по всем показателям, включая габариты (по крайней мере не хуже в смысле размеров).

## ПРИНЦИП РАБОТЫ

Суть работы устройства показана на рис. 1–5. На рис. 1 изображена одна из ячеек системы. Проходя через первый конвертер, электроны в плоскости  $z^*$  генерируют поток ТИ, при этом их угловой разброс скачком увеличивается (поперечный размер

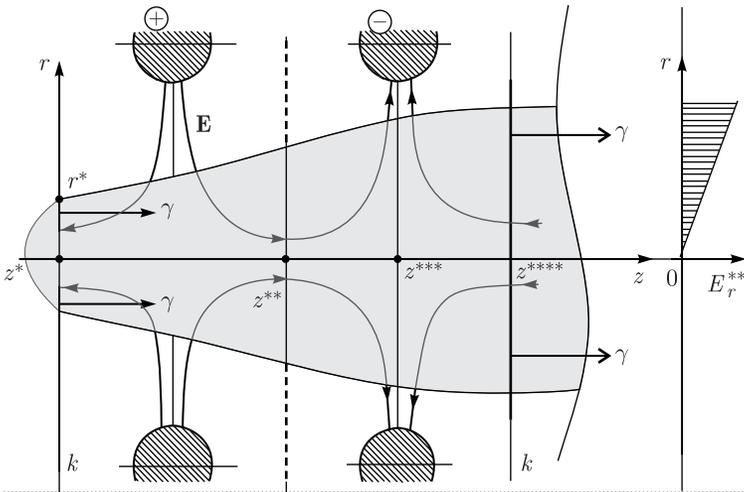


Рис. 1. Система формирования (принципиальная схема). Обозначения в тексте

в тонкой фольге измениться не может). Далее в пространстве ( $z^* - z^{**}$ ) в радиальном электрическом поле размер пучка возрастает, но затем (после  $z^{**}$ ) начинает уменьшаться в фокусирующем поле кольцевого электрода с отрицательным потенциалом (он может превышать потенциал первого электрода по амплитуде). Изменение радиальной составляющей напряженности электрического поля  $E_r$  вдоль оси (на некотором удалении от оси) показано на рис. 2. По мере движения ко второму конвертеру

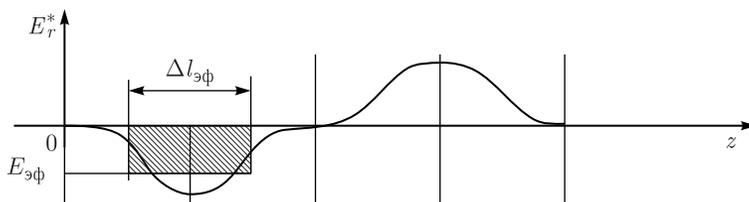


Рис. 2. Характерная зависимость радиальной составляющей напряженности электрического поля на некотором расстоянии от оси и аппроксимация, используемая в оценочных расчетах

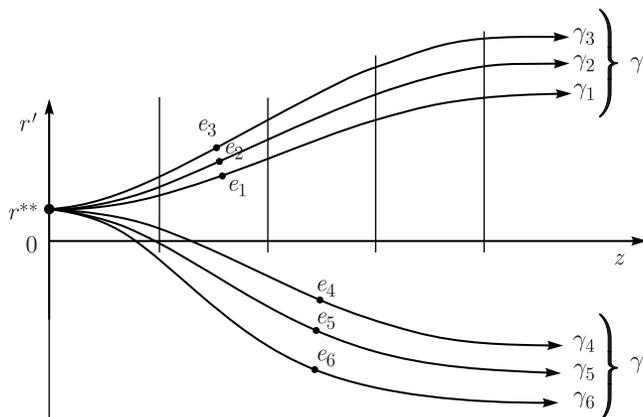


Рис. 3. Характерные траектории электронов (пояснения в тексте)

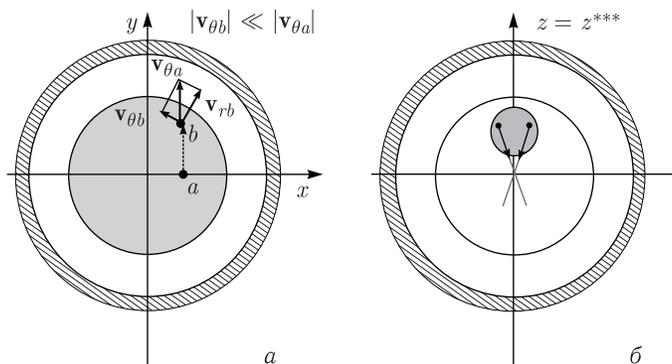
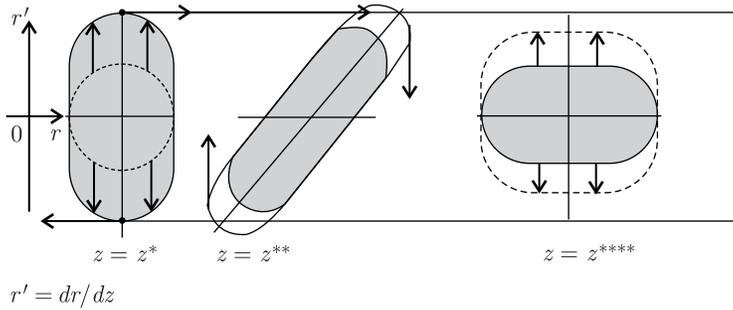


Рис. 4. Схема, поясняющая азимутальное «охлаждение» электронного потока

Рис. 5. Трансформация фазового объема пучка в плоскости  $(r, r')$ 

пучок «поджимается», фазовый объем приобретает форму, близкую к эллиптической (рис. 3, 5), т. е. угловой разброс (по оси  $r'$ ) в соответствии с законом о сохранении фазового объема в свободном пространстве уменьшается. На рис. 3 показаны характерные траектории для электронов как от оси  $e_1-e_3$ , так и к оси  $e_4-e_6$ .

Случай, когда траектория вылета электрона из конвертера имеет тангенциальную составляющую (по угловой координате  $\theta$ ), рассмотрен на рис. 4, а. Видно, что по мере движения от оси  $x$  электрон теряет азимутальную скорость  $v_\theta$ , тогда как появляется радиальная ( $v_r$ ). Начинает действовать механизм «охлаждения», рассмотренный выше. На рис. 4, б для убедительности показан механизм фокусировки (в данном случае «охлаждение» в азимутальном направлении) парциального пучка (части потока электронов внутри малой окружности). Закон сохранения фазового объема для бездиссипативных систем справедлив как для пучка в целом, так и для отдельных пучков, образующих общий поток.

Фокусировка в радиальном направлении обеспечивается на участке ( $z^{**}-z^{****}$ ) за счет увеличения амплитуды радиальной составляющей электрического поля (рис. 1, справа).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Может возникнуть вопрос, зачем нужны дефокусирующие линзы. Их наличие необходимо для формирования условий оптимизации электронно-оптических свойств системы в целом. Дело в том, что при малом поперечном размере пучка ( $\sim 1$  мм) и большой энергии ( $\geq 100$  МэВ) действие полей ослаблено вблизи оси, т. е. именно там, где локализован пучок электронов. Длина системы получается неоправданно большой ( $> 10$  м). В рассмотренном варианте при энергии до 100 МэВ длина не превышает  $\sim 3-3,5$  м при напряжении на электродах до 100 кВ. Поперечный размер пучка возрастает по длине от 2–4 до 20–30 мм, а поперечные габариты системы имеют приемлемую величину (до  $\sim 20-30$  см, включая высоковольтные вводы и вакуумную систему). За счет оптимизации напряжений на электродах и их формы коэффициент преобразования энергии пучка электронов в энергию фотонов может достигнуть максимальных значений при минимизации угла расходимости потока в целом на уровне  $\varphi \approx (2E_0)/E$ , где  $E_0$  — энергия покоя электрона (0,511 МэВ),  $E$  — полная энергия электронов на входе в систему. В зависимости от решаемой

задачи минимальная энергия электронов в самой системе может быть выбрана на уровне  $\langle E_{\text{вых}} \rangle \approx (0,2-0,3)E$ . Масса системы в 2,5–3 раза меньше, чем при применении магнитов.

Данная система может быть использована в сфере инспекции крупногабаритных объектов, а также в дистанционном радиационном контроле с линейными ускорителями электронов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданович Б. Ю., Нестерович А. В., Ворогушин М. Ф., Свистунов Ю. А.* Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями. Т. 1. Линейные ускорители для генерации тормозного излучения и нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 2009. 272 с.
2. *Bogdanovich B. Yu., Buyanov G. O., Nesterovich A. V.* Calculation of a System for Forming a Bremsstrahlung Beam in Discretely Falling Magnetic Field // *At. Energy*. 2022. V. 131, No. 6. P. 348–353.

Получено 10 февраля 2023 г.