

12;15

## Внешняя фокусировка наносекундного импульсного рентгеновского излучения

© А.А. Бегилов, Г.Н. Фурсей, М.А. Поляков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
E-mail: g.fursey@gmail.com

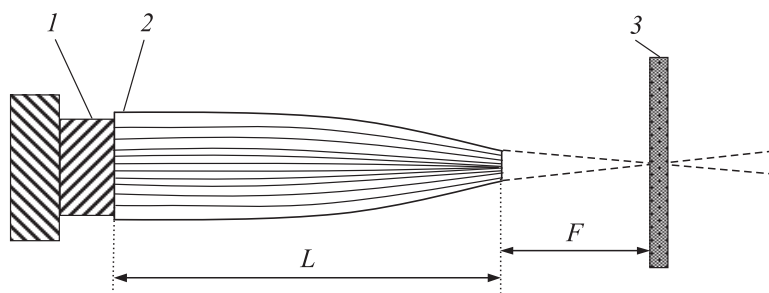
Поступило в Редакцию 14 апреля 2015 г.

Прямыми экспериментами показана возможность эффективной фокусировки мощного импульсного рентгеновского излучения, генерируемого под действием наносекундных импульсов взрывной электронной эмиссии из углеродных нанокластеров. В экспериментах использовалась поликапиллярная рентгеновская оптика. Показана возможность уменьшения рентгеновского пятна в фокусе поликапиллярной линзы вплоть до двадцати крат по отношению к начальному размеру пятна.

Основным затруднением, влияющим на качество рентгеновского изображения в импульсных рентгеновских аппаратах, является сравнительно большой размер рентгеновского пятна (1–2 mm) [1]. В импульсных рентгеновских трубках, работающих на основе взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ), из нанокластеров углерода (графенов, нанотрубок, полиакрилонитрильных нитей), уменьшение пятна внутри объема трубки с использованием электростатической и магнитной фокусировки оказывается сложным вследствие малых расстояний катод–анод.

Наиболее привлекательной является непосредственная фокусировка рентгеновского излучения на выходе из рентгеновской трубки. Такая возможность в принципе открывается при использовании поликапиллярной рентгеновской оптики, предложенной Кумаховым М.Г. [2–6].

Линза Кумахова представляет собой сложную многоканальную систему стеклянных капилляров. Изогнутые капилляры позволяют менять направление рентгеновских лучей под нужным углом и таким образом фокусировать рентгеновское излучение. Такие системы предназначены [1,7] для транспортировки и управления рентгеновским, гамма- и нейтронным излучением, фокусировки, монохроматизации, а также фильтрации энергии.



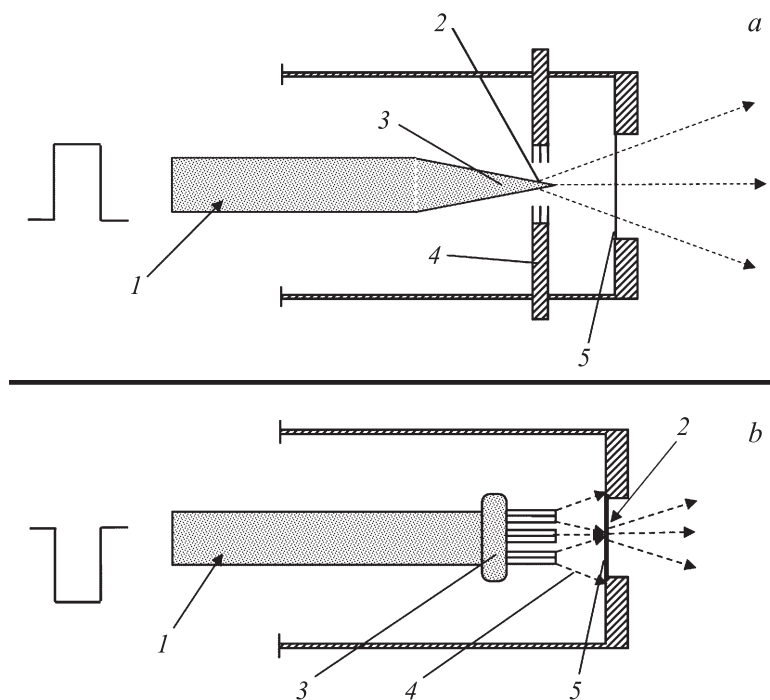
**Рис. 1.** Принцип внешней фокусировки рентгеновского излучения: 1 — головная часть рентгеновской трубки; 2 — поликапиллярная полулинза; 3 — визуализатор (пластина Digora PCT image plate). Длина фокуса  $F = 160$  mm. Длина полулинзы  $L = 268$  mm. Диаметр входного отверстия полулинзы 11.3 mm. Диаметр выходного отверстия полулинзы 6 mm. Внутренний диаметр каналов 0.5 mm.

Рентгеновский луч, проходя через разные среды, практически не отклоняется от своего первоначального направления, так как коэффициент его преломления близок к единице ( $n < 1$ ). Проходя через поликапиллярную линзу, рентгеновский луч за счет полного внешнего отражения многократно отражается от внутренних стенок узкого канала капилляра и выходит в заданном направлении. Используя многоканальную систему тонких изогнутых под определенным углом капилляров, оказывается возможным направить излучение по определенной траектории и на выходе собрать его в области фокуса.

Как показано в ряде последних работ, линза Кумахова принципиально позволяет фокусировать стационарное рентгеновское излучение в пятно диаметром менее  $6 \mu\text{m}$  [4]. Электронные токи в стационарных рентгеновских трубках обычно составляют  $10^{-4} - 10^{-3}$  А.

В настоящем исследовании делается попытка применить эту оптику к мощным импульсным рентгеновским источникам, работающим на основе ВЭЭ в наносекундном диапазоне длительностей импульсов с токами до сотен ампер [8].

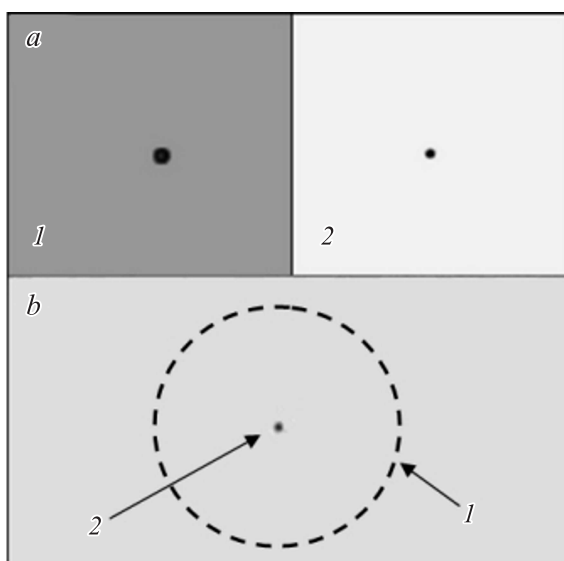
Высокая отражательная способность имеет место при скользящих углах падения. Существует максимальный предельный угол, при котором имеет место отражение, называемый критическим углом отражения  $\theta_c$  [8]. Для фокусировки нами использовалась стеклянная



**Рис. 2.** Схемы используемых импульсных рентгеновских трубок. *a* — импульсная рентгеновская трубка с острым антикатодом: 1 — высоковольтный ввод, 2 — рентгеновское пятно, 3 — анод (вольфрамовый стержень), 4 — катод (полиакрилонитрильные нити), 5 — выходное окно трубки (бериллиевое (Be)); *b* — прострельная импульсная рентгеновская трубка: 1 — высоковольтный ввод, 2 — рентгеновское пятно, 3 — многоострый катод (углеродные нити), 4 — электронный пучок, 5 — выходное окно трубки, оно же анод.

поликпиллярная полулинза с диаметром каналов 0.5 mm. Полулинза представляет собой поликпиллярную систему с односторонним фокусом (рис. 1).

Прямое наблюдение в режиме фокусировки осуществлялось с помощью визуализатора — специальной фосфорной пластины Digora PCT image plate. Изображение с фосфорной пластины оцифровывалось с помощью сканера DIGORA PCT и отображалось на экране компьютера.



**Рис. 3.** *a* — рентгеновское пятно для рентгеновской трубки с острым антикатодом: 1 — исходное пятно (1.2 mm), 2 — сфокусированное пятно (0.6 mm); *b* — пятно для проточной рентгеновской трубки: 1 — диаметр исходного пятна (11 mm), 2 — сфокусированное пятно (0.5 mm).

Продвигая визуализатор с определенным шагом вдоль оптической оси поликапиллярной полулинзы, было установлено, что рентгеновский пучок, выходящий из полулинзы (рис. 1), является сходящимся и имеет область наивысшей интенсивности в фокусе полулинзы.

Было проведено два эксперимента по определению размера сфокусированного пятна. Размер пятна определялся с помощью лох-камеры (она же камера-обскура). Ток в рентгеновской трубке в промежутке катод–антикатод в зависимости от напряжения достигал от нескольких десятков до 200 А. Импульсное напряжение на трубке варьировалось от 20 до 150 кV. В качестве источника высокого напряжения использовался наносекундный генератор с длительностью высоковольтного импульса 10 ns.

В экспериментах использовались два типа рентгеновских импульсных трубок: трубка с острым антикатодом и проточная рентге-

новская трубка (рис. 2). В первом эксперименте было достигнуто сжатие рентгеновского пятна в 2 раза. Рентгеновская трубка с прострельным антикатодом, или „прострельная трубка“, представляет собой рентгеновскую трубку, в которой в качестве мишени для электронов использовалось выходное окно из бериллия, на которое с внутренней стороны нанесен микронный слой вольфрама, являющийся антикатодом.

Размер рентгеновского пятна на окне составлял 11 mm. В точке фокуса полулинзы было получено пятно диаметром 0.5 mm. Результаты измерений приведены на рис. 3.

Дополнительная оценка эффективности фокусировки осуществлялась с помощью проведения сравнительной дозиметрии интенсивности излучения на фиксированном расстоянии. Было проведено два предварительных сравнительных измерения дозы: непосредственно с применением полулинзы (в точке фокуса) и без нее на том же расстоянии от источника излучения. Как показали эксперименты, измеренная в этой точке доза оказывается в 3 раза выше, чем без использования фокусировки, несмотря на потери, которые имеют место при прохождении рентгеновского пучка через капилляры полулинзы.

Достигнутая степень фокусировки не является максимально возможной, так как обусловлена не самой оптимальной конструкцией полулинзы и внутренним диаметром ее капилляров.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при соответствующих усовершенствованиях внешняя фокусировка мощных импульсных рентгеновских источников наносекундного диапазона является перспективной и может применяться во многих областях науки и техники (в радиационной терапии, рентгеновской радиографии, дефектоскопии и других областях).

Авторы выражают сердечную благодарность М.Г. Кумахову за оказанную в работе помощь и предоставление материалов для экспериментов.

## Список литературы

- [1] Фурсей Г.Н., Пеликс Е.А. // Практическая силовая электроника. 2011. № 44(4). С. 47–51.
- [2] Кумахов М.А. Устройство для формирования направленного пучка рентгеновского излучения. Патент № 2348996, 10.03.2009 г.
- [3] Kumakhov M.A. // Proc. SPIE. 2001. V. 4765. P. 170–182.

- 
- [4] *Arkadiev V.A., Gruev D.I., Kumakhov M.A.* // Opt. Beams. 1993. P. 27–32.
- [5] *Borisov G.I., Kumakhov M.A.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 529. N 1–3. P. 129–133.
- [6] *Кумахов М.А.* Устройства для управления рентгеновским излучением и гамма-квантов / Авт. свид-во СССР 1322888, 1984.
- [7] *Болотоков А.А., Зайцев Д.В., Лютцау А.В., Щербаков А.С.* // Аналитика. 2012. № 4. С. 14–23.
- [8] *Фурсей Г.Н., Дмитриев И.А., Скурятник Я.Б., Бегидов А.А., Кумахов А.А.* // Практическая силовая электроника. 2012. № 2(46). P. 50–55.