

УДК 621.384.664

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

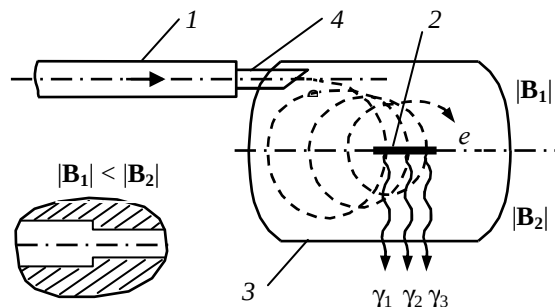
Богданович Б.Ю., Каминский В.И., Кудинов В.В., Нестерович А.В., Сеньюков В.А.
(НИЯУ МИФИ, г. Москва)

При прохождении ускоренных электронов в материале конверсионной мишени наблюдаются два конкурирующих процесса: образование фотонов тормозного излучения и их поглощение в мишени. Поэтому для разных материалов мишени и энергии электронов есть оптимальная толщина, при которой достигается максимальный выход тормозного излучения. Однако при использовании мишени оптимальной толщиной поглощается не вся энергия электронов.

В случае применения метода многократного прохождения пучком электронов тонкой мишени фактически отсутствует один из процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, а именно поглощение фотонов и их рассеяние в толстой мишени. Следовательно, энергию электронов можно использовать полностью, т.е. путь, пройденный электроном в мишени, будет соответствовать их полному пробегу, что, в свою очередь, приведет к увеличению выхода тормозного излучения, с одной стороны, и уменьшению угла рассеяния, с другой. Метод формирования узконаправленных потоков тормозного излучения в магнитном поле специальной конфигурации с использованием последовательности тонких мишеней за счет параллельного переноса траектории пучка с одновременным уменьшением теплового разброса описан в работе [1].

В настоящей работе предлагается использовать схему с многократным прохождением пучка ускоренных электронов через одну и ту же тонкую конверсионную мишень (фольгу), помещенную в магнитное поле (рис. 1).

Система работает следующим образом. Пучок ускоренных электронов направляется в зону локализации магнитного поля (вектор индукции $\mathbf{B}$ перпендикулярен плоскости). Совершив четверть оборота, электроны попадают в конверсионную мишень и создают поток тормозного излучения γ -квантов перпендикулярно плоскости мишени. После прохождения фольги энергия электронов, радиус траектории уменьшаются,

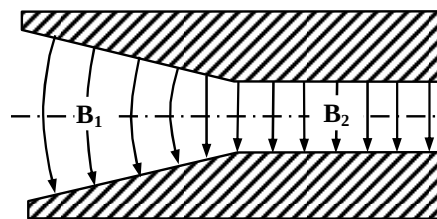


Р и с. 1. Схема конверсионной мишени с многократным прохождением пучка электронов: 1 — линейный ускоритель электронов; 2 — конверсионная мишень; 3 — магнит; 4 — магнитный экран

поэтому электроны могут попасть вновь на конверсионную мишень, минуя трубку магнитного экрана. Экран выполнен из магнитомягкого материала (АРМКО-железо). Трубка экранирует электроны от магнитного поля, что необходимо для их инжекции.

Для сохранения электронов от потери на магнитном экране в полюсных наконечниках устанавливали накладки так, чтобы индукция в верхней полуплоскости была меньше, чем в нижней. Это смещает траекторию от выхода ускорителя вправо. Технически данное условие реализуется разным межполюсным зазором (рис. 2).

Если расходящийся после прохождения конверсионной мишени поток электронов фокусируется автоматически при подлете к мишени через оборот (геометрическая фокусировка), то для вхождения в мишень каждый раз с минимальной угловой расходимостью необходима его фокусировка в вертикальной плоскости. Проще всего это осуществить за счет выполне-



Р и с. 2. Полюсные наконечники с накладками

ния склона на полюсном наконечнике с индукцией $\mathbf{B}_1$ (верхняя полуплоскость), т.е. профиль наконечников будет таким, как показано на рис. 2.

Были рассмотрены разные варианты реализации устройства. В частности, для фокусировки в точку должен быть создан поток сходящихся к ней γ -квантов, т.е. конверсионная мишень должна быть вогнутой, а полюсные наконечники повторять ее форму на границе двух областей с индукцией $\mathbf{B}_1$ и $\mathbf{B}_2$. Необходимая индукция $\mathbf{B}_1$ и $\mathbf{B}_2$ определяется с помощью расчетов траекторий электронов в магните.

Для исследования формирования потока тормозного излучения с использованием метода статистических испытаний рассчитаны характеристики поля тормозного излучения электронов энергией 2—8 МэВ для мишеней из алюминия, меди, олова и вольфрама разной толщины.

На рис. 3 видно, что мощность тормозного излучения существенно возрастает с энергией электронов и слабо зависит от материала конверсионной мишени.

Зависимость мощности дозы P тормозного излучения от энергии электронов E с током пучка 1 мА на расстоянии 1 м от мишени с атомным номером Z можно рассчитать с погрешностью не хуже 4% по формуле [2]

$$P = p_{oz}(Z)E^{d(Z)},$$

где $p_{oz}(Z) = 0,144 + 7,38 \cdot 10^{-3} Z$ — дозовый коэффициент выхода тормозного излучения, $d(Z) = 3,19 - 6,9 \cdot 10^{-3} Z$ — показатель степени, зависящие от атомного номера материала мишени. Мощность дозы тормозного излучения P имеет размерность Гр/(мин·мА), энергия электронов E — МэВ.

Зависимость флюенса тормозного излучения F от энергии электронов E с током пучка 1 мкА на расстоянии 1 м от мишени можно также представить с погрешностью не хуже 4% в виде

$$F = f_{oz}(Z)E^{g(Z)},$$

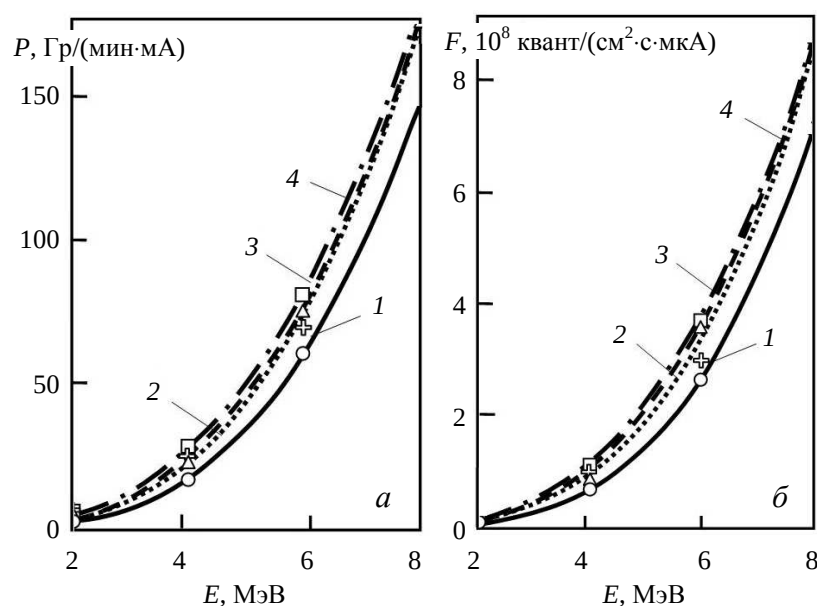
где $f_{oz}(Z) = 6 \cdot 10^5 + 1,97 \cdot 10^4 Z$ — потоковый коэффициент выхода тормозного излучения, $g(Z) = 3,29 - 5,25 \cdot 10^{-3} Z$ — показатель степени, зависящие от атомного номера материала мишени. Флюенс тормозного излучения F имеет размерность квант/(см²·с·мкА), энергия электронов E — МэВ.

Из результатов, представленных на рис. 3, следует, что максимальный выход тормозного излучения в направлении прямо—вперед для мишеней из меди, олова и вольфрама совпадает при энергии электронов до 4 МэВ.

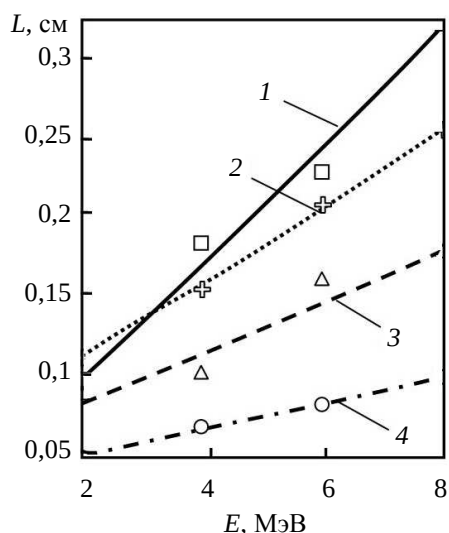
На рис. 4 видно, что оптимальная толщина мишени уменьшается с увеличением атомного номера ее материала. Зависимость оптимальной толщины мишени от энергии электронов ослабевает с увеличением атомного номера Z .

Анализ углового распределения тормозного излучения для фольги из алюминия и вольфрама различной толщины, приведенного на рис. 5, показывает, что с увеличением энергии электронов его полуширина уменьшается. При энергии электронов 6—8 МэВ полуширина углового распределения слабо зависит от эффективной толщины мишени.

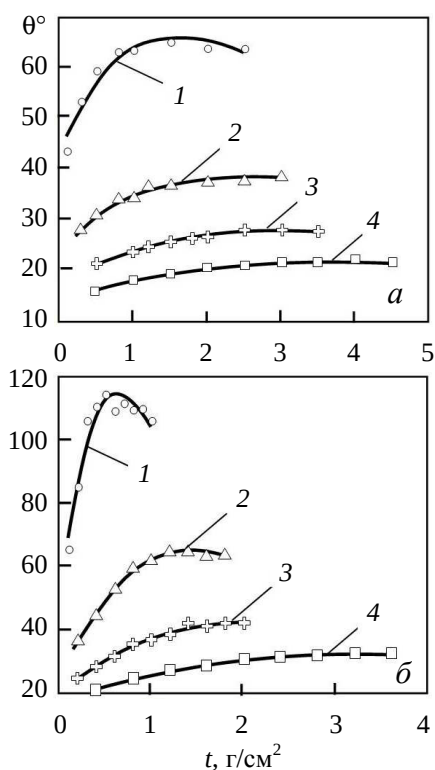
Из анализа рис. 3—5 следует, что использование в конверсионной ми-



Р и с. 3. Зависимость выхода тормозного излучения в единицах мощности дозы (а), плотности потока (б) в направлении прямо—вперед от энергии электронов на расстоянии 1 м от алюминиевой (1), медной (2), оловянной (3), вольфрамовой мишени (4) оптимальной толщины

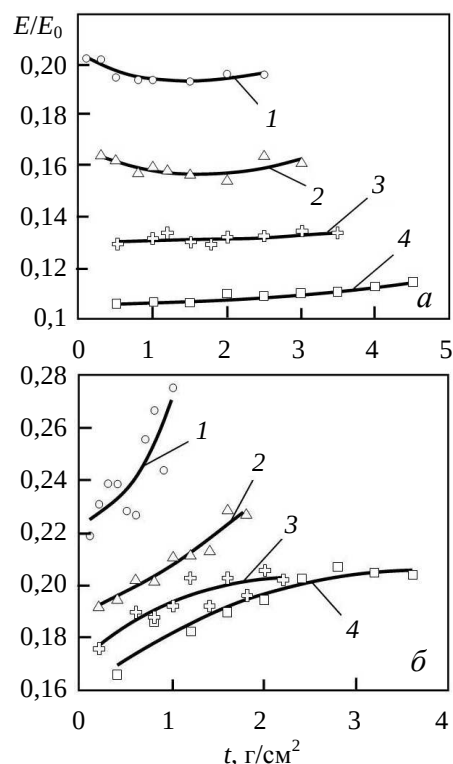


Р и с. 4. Зависимость оптимальной по мощности дозы толщины мишени из алюминия (1), меди (2), олова (3), вольфрама (4) в направлении прямо—вперед от энергии электронов



Р и с. 5. Зависимость полуширины углового распределения θ тормозного излучения электронов энергиями 2 (1), 4 (2), 6 (3), 8 МэВ (4) от толщины алюминиевой (а), вольфрамовой мишени (б)

шени материалов с малым атомным номером позволяет получить более узкие пучки тормозного излучения не в ущерб энергетическому выходу γ -квантов.

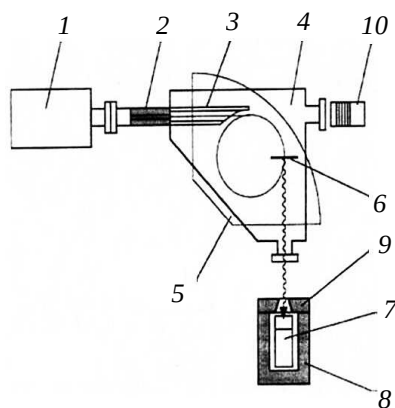


Р и с. 6. Зависимость нормированной средней энергии E/E_0 тормозного излучения электронов энергиями 2 (1), 4 (2), 6 (3), 8 МэВ (4) от толщины алюминиевой (а), вольфрамовой мишени (б) (угол регистрации 1°)

На рис. 6 видно, что при увеличении энергии падающих на мишень электронов с 2 до 8 МэВ отношение средней энергии тормозного излучения $E_{\text{ср}}$ к энергии электронов E_0 изменяется для алюминиевой мишени с 0,2 до 0,1, вольфрамовой мишени — с 0,27 до 0,16. Повышение средней энергии тормозного излучения с ростом атомного номера Z обусловлено повышением сечения процесса фотопоглощения.

Для апробации предложенных технических решений и проверки расчетных характеристик в Радиационно-ускорительном центре НИЯУ МИФИ создан экспериментальный стенд для моделирования генерации тормозного излучения (рис. 7). На стенде проведено экспериментальное исследование генерации тормозного излучения, образуемого при многократном взаимодействии ускоренного электронного пучка с тонкой мишенью.

В качестве источника электронов использован линейный резонансный ускоритель со следующими параметрами: энергия электронов 3—6 МэВ, средний ток электронов до 60 мкА, длительность импульса тока 0,5—2 мкс.



Р и с. 7. Схема экспериментального стенда для измерения тормозного излучения при многократном прохождении пучка ускоренных электронов через тонкую мишень: 1 — ускоритель; 2 — алюминиевый коллиматор; 3 — магнитный экран; 4 — корпус; 5 — магнит; 6 — мишень; 7 — детектор; 8 — экран детектора; 9 — свинцовый коллиматор; 10 — цилиндр Фарадея

Пучок электронов, выходящий из ускорителя, имеет большую угловую расходимость, поэтому для формирования направленного пучка используется коллиматор длиной 30 мм, диаметром отверстия 8 мм. В качестве материала коллиматора используется алюминий. Такой выбор связан с тем, что алюминий обладает малым выходом тормозного излучения, что, в свою очередь, позволяет обеспечить минимальный уровень фонового излучения, возникающего в результате взаимодействия электронов с материалом коллиматора.

Пучок электронов, сформированный коллиматором, поступает в железный электропровод, выполняющий функцию магнитного экрана. Из электропровода электроны попадают в поле магнита. Регулируя индукцию магнитного поля, можно плавно переводить электроны на круговую орбиту. Размеры области, где обеспечивается однородность магнитного поля, допускают движение электронов энергией 4,5 МэВ по круговой орбите диаметром около 0,12 м. При этом максимальная магнитная индукция в области кругового движения пучка электронов, измеренная в медианной плоскости, равна 0,283 Тл.

Тормозное излучение регистрировали под углом 90° по отношению к направлению движения пучка в ускорителе, так как в этом направлении наблюдается минимальный уровень фона. Поэтому мишенный узел располагается на расстоянии, которое равно четверти длины окруж-

ности, описывающей орбиту электрона от места попадания пучка в область с магнитным полем.

Конверсионная мишень состояла из тонкой алюминиевой фольги размером 50×20 мм, закрепленной на керамической стойке и изолированной от камеры. Это позволяло в ходе эксперимента контролировать ток пучка электронов, падающих на мишень. Толщина алюминиевой фольги составляла 100 мкм, или $1,1 \cdot 10^3$ радиационной длины. Энергию электронов определяли измерением их поглощения в многопластинчатом цилиндре Фарадея. Она составила 4,5 МэВ, что соответствует номинальной выходной энергии пучка в выбранном режиме эксплуатации.

Дозиметрические измерения показали, что метод многократного прохождения электронами тонкой конверсионной мишени увеличивает выход тормозного излучения примерно в 2 раза по сравнению с толстой мишенью оптимальной толщины при однократном прохождении. Это свидетельствует о перспективности рассмотренного метода генерации интенсивных потоков тормозного излучения.

Предложенный метод увеличения интенсивности тормозного излучения может быть использован в различных радиационных комплексах, таких, как интроскопические установки анализа структуры крупногабаритных изделий, установки радиационной модификации физико-химических свойств материалов, продуктов, изделий и др. Применение метода должно способствовать повышению технико-экономических показателей указанных комплексов.

Работа выполнена в рамках проекта 2011-1.2.1-220-010-140 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bogdanovich B., Kudinov V., Nesterovich A. e.a.** Bremsstrahlung intensity and average energy increase, it's divergence reduction in the target of new type. — *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1997, v. 42, № 3, p. 1388—1391.
2. **Berger M.** Monte Carlo calculation of the penetration and diffusion of fast charged particles. — *Meth. in Comp. Phys.* NY, 1963, v. 1, p. 135—215.

Поступила в Редакцию 19.04.13