

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СИЛЬНОТОЧНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ИПЭНМУ

*Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, Г.Э. Саруханян, А.Б. Батраков, В.Т. Уваров, Л.Н. Казбан,
В.Т. Лазурик**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;*

**Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина
E-mail: anaron@kipt.kharkov.ua*

Приведены результаты исследования эффективности преобразования энергии электронов в энергию тормозного излучения на сильноточных ускорителях РЭП ИПЭНМУ. Проведен анализ различных типов и конструкций конвертеров. Получены спектры тормозного излучения и коэффициенты преобразования, и проведено сравнение численных результатов с экспериментальными данными.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных прикладных применений сильноточных ускорителей релятивистских электронных пучков (РЭП) является их использование для получения мощных импульсов тормозного рентгеновского излучения (ТРИ). Исследования в этом направлении стимулируются необходимостью экспериментального моделирования радиационного воздействия на материалы и объекты в реакторной зоне, что крайне важно для изучения поведения и свойств существующих и разрабатываемых радиационно-стойких материалов для использования в ядерной энергетике.

Характеристики ТРИ определяются параметрами электронного пучка, конструкцией и материалом конвертера. Для сильноточного пучка характерен достаточно широкий энергетический разброс [1], поэтому актуальной задачей является исследование выхода ТРИ в зависимости от формы спектра электронного пучка. В результате термического воздействия мощного РЭП на материал конвертера происходит его коробление, растрескивание, частичное или полное проплавление либо разрушение, что требует полной замены данного узла и удлиняет время проведения экспериментальных исследований.

Целью данной работы является исследование зависимостей коэффициента преобразования энергии электронов в энергию тормозного излучения от вида спектра и параметров электронного пучка при различных толщинах и материалах конвертера.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ

Эксперименты по генерации ТРИ и облучению образцов проводились в Институте плазменной электроники и новых методов ускорения ННЦ ХФТИ на сильноточных релятивистских электронных ускорителях ТЕМП-А и ТЕМП-Б.

Ускоритель ТЕМП-А (Рис.1) имеет два выхода РЭП – наносекундный и микросекундный. В рабочем режиме облучение образцов γ -излучением на наносекундном стволе проводилось при следующих

параметрах РЭП: ток пучка $I_b = (4...7)$ кА, энергия электронов $E_b = (750...900)$ кэВ, длительность импульса $\tau \approx 20$ нс.



Рис.1. Ускоритель ТЕМП-А

Рабочие параметры микросекундного пучка: ток пучка $I_b = (2...3)$ кА, энергия электронов $E_b = (300...500)$ кэВ, длительность импульса $\tau \approx 5$ мкс.

Режим генерации ТРИ на микросекундном ускорителе ТЕМП-Б (Рис.2) исследовался при следующих параметрах электронного пучка: $I_b = (25...30)$ кА, энергия электронов $E_b = (0,5...1,0)$ МэВ, длительность импульса $\tau \approx 2,5$ мкс [2].



Рис.2. Ускоритель ТЕМП-Б

В качестве мишеней-конвертеров использовалась фольга из различных материалов (W, Ta, Mo) толщиной $\delta = (50...500)$ мкм.

Образцы облучаемых материалов, размещенные непосредственно за конвертером либо на специальной подложке, вводились в камеру взаимодействия вместе с конвертером через шлюзовую камеру, а размещенные в цилиндрической кассете, подводились к конвертеру в полой штоке катододержателя. Последнее решение позволило значительно ускорить смену образцов.

Измерение поглощенной дозы проводилось дозиметром термолюминесцентным универсальным ДТУ-01, который предназначен для измерения поглощенных доз рентгеновского и гамма-излучения с энергией выше 10 кэВ. При соответствующей градуировке возможно измерение доз заряженных частиц в широком интервале энергий и медленных нейтронов.

Предварительно откалиброванные и пронумерованные термолюминесцентные датчики располагались рядом с облучаемыми образцами и вводились вместе с ними в камеру взаимодействия ускорителя, что позволяло однозначно определять поглощенную дозу для каждого образца. После серии облучений часть образцов вместе с соответствующими датчиками извлекались из камеры взаимодействия, а остальные подвергались дальнейшему облучению.

Дозиметрический комплект может применяться для регистрации как непрерывного, так и импульсного излучения в различных областях дозиметрии, а диапазон измеряемых доз составляет ($10^{-4} \dots 10^2$) Гр.

Используя термолюминесцентную методику, были получены количественные характеристики скорости нарастания поглощенной дозы тормозного рентгеновского излучения за один выстрел на ускорителях РЭП ТЕМП-Б и ТЕМП-А $d\Phi_{\gamma}/dt \sim 2 \cdot 10^8$ Гр/с и 10^{10} Гр/с соответственно.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При проведении численных расчетов эффективности преобразования энергии РЭП в энергию тормозного излучения использовался специализированный программный модуль ModeXR, входящий в состав программного пакета RT-Office, который предназначен для моделирования радиационно-технологических процессов [3]. В серии расчетов исходными данными служили характерные параметры ускорителей ТЕМП-А и ТЕМП-Б. Относительно конвертеров предполагалось, что это однослойные конструкции из вольфрама, тантала, молибдена с варьируемой толщиной слоя в диапазоне от 0,001 до 0,035 см [2,4].

На Рис.3,а,б показаны графики рассчитанной эффективности преобразования энергии электронного пучка в энергию рентгеновского излучения для ускорителей ТЕМП-А и ТЕМП-Б в зависимости от толщины мишени. На Рис.3,в,г приведены расчетные спектры ТРИ для рабочих напряжений ускорителей ТЕМП-А и ТЕМП-Б вплоть до максимальных значений: 0,3 и 0,9 МэВ соответственно.

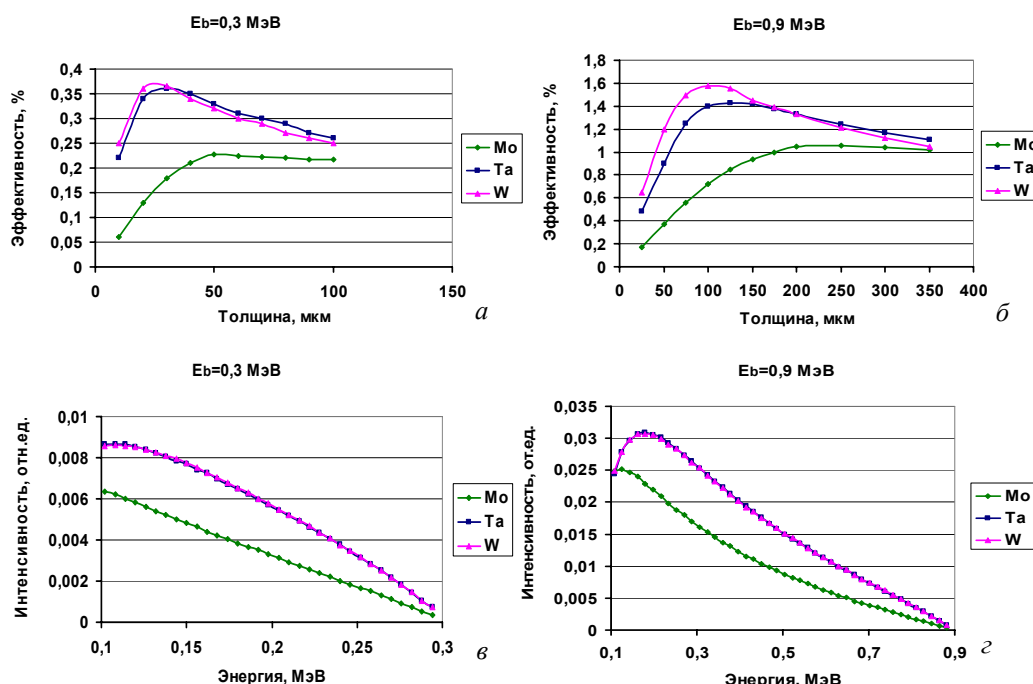


Рис.3. Зависимость эффективности преобразования энергии РЭП в энергию ТРИ от толщины мишени и спектры тормозного излучения: а, в – для ускорителя ТЕМП-А; б, г – для ТЕМП-Б

Из приведенных графиков видно, что эффективность преобразования энергии РЭП в энергию ТРИ имеет максимум в области малых толщин конвертера и отличается для различных материалов, однако, с увеличением толщины эффективности сравниваются.

Эти расчеты и имеющиеся экспериментальные данные о повреждении мишеней под воздействием сильноточных РЭП позволяют сделать оптимальный

выбор конструкции конвертера для имеющихся ускорителей с учетом конкретных задач.

3. ВЫБОР КОНВЕРТЕРА

При исследовании свойств перспективных сплавов на основе переходных металлов Ti, Cr, Hf, Ni для реакторов нового поколения эти материалы подвергаются воздействию импульсных пучков элек-

тронов и рентгеновскому облучению большой мощности. Эффективные поглощенные дозы при этом составляют единицы и десятки тысяч рад. На существующих сильноточных ускорителях РЭП такие дозы можно набрать за несколько десятков выстрелов, что существенно ускоряет время проведения исследований. Так, например, необходимая экспозиционная доза в 3200 рад на ускорителе ТЕМП-А (наносекундный ствол) набиралась за 15 выстрелов. Примерно столько же пусков требовалось на ускорителе ТЕМП-Б для набора дозы 40000 рад.

Таким образом, учитывая результаты расчета эффективности преобразования энергии электронов в γ -излучение, выбор конструкции конвертера сводится к выбору материала, который при минимальной толщине не разрушается при воздействии РЭП после ~ 20 пусков.

На Рис.4 показано состояние мишеней из различных материалов после облучения сильноточным РЭП ускорителя ТЕМП-А ($I \sim 2$ кА, $E \sim 0,35$ МэВ, $\tau \sim 5$ мкс). Видно, что мишень из W растрескивается, из Ta прогорает, а наибольшей стойкостью обладает Mo, у которого лишь оплавляется поверхность.



Рис.4. Состояние мишеней после облучения сильноточным РЭП ускорителя ТЕМП-А (микросекундный ствол):
 а – мишень из W ($\delta = 200$ мкм, 2 выстрела); б – мишень из Ta ($\delta = 50$ мкм, 3 выстрела);
 в – мишень из Mo ($\delta = 500$ мкм, 15 выстрелов)

Аналогичные повреждения мишеней происходят и при большей энергии сильноточного РЭП на ускорителе ТЕМП-Б. Так вольфрамовые мишени растрескиваются уже после первого облучения, мишени из тантала и молибдена проплавляются, однако, их можно использовать в качестве конвертеров при толщинах $\geq 0,5$ мм, причем, большей термической стойкостью под пучком обладает Ta. Конвертер из Ta предпочтительнее использовать и на ускорителе ТЕМП-А на наносекундном стволе (Рис.5).

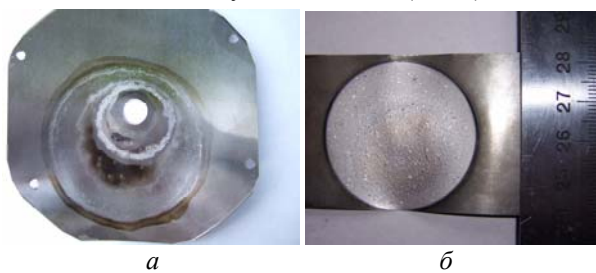


Рис.5. Конвертеры из Ta ($\delta = 500$ мкм):
 а – ТЕМП-Б (трубчатый пучок);
 б – ТЕМП-А (цилиндрический пучок)

Еще один возможный путь продления срока службы конвертеров заключается в их охлаждении. На ускорителе ТЕМП-А испытывались конвертеры, выполненные по принципу тепловой трубы, которая, как известно, является наиболее эффективной системой теплоотвода [5]. Для молибдена и тантала был получен положительный эффект, т.е. увеличилось число пусков до прожигания фольги. В то же время вольфрамовая фольга разрушилась после первого облучения, хотя в стационарном режиме при нагреве в пламени газовой горелки был обеспечен хороший теплоотвод, о чем свидетельствует отсутствие цветов побежалости на поверхности (Рис.6).



Рис.6. Состояние поверхности конвертера с охлаждением (W): а – после нагрева в пламени газовой горелки; б – после импульсного однократного облучения сильноточным РЭП

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что основным критерием для выбора конструкции конвертера являются его механические и теплофизические свойства, которые должны обеспечивать высокую стойкость и долговечность под воздействием экстремально высоких импульсных тепловых нагрузок, которым материал подвергается при облучении сильноточными релятивистскими электронными пучками.

В меньшей степени выбор материала конвертера зависит от его эффективности преобразовывать энергию электронного пучка в тормозное излучение. Это следует из сравнения результатов численного моделирования и эксперимента, которое показало, что для всего диапазона необходимых толщин конвертеров эффективность преобразования примерно одинакова.

Экспериментально установлено, что для сильноточных РЭП с энергией $E_b = (0,3 \dots 0,5)$ МэВ предпочтительней использовать конвертеры из молибденовых фольг, а для энергий $E_b = (0,8 \dots 1,0)$ МэВ – из танталовых. Фольги из вольфрама, хотя и обладают

наиболее высокой тугоплавкостью, при таких параметрах пучка быстро разрушаются, что делает нецелесообразным их использование в качестве конвертеров ТРИ в импульсных сильноточных электронных ускорителях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Р. Миллер. *Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц* / Перевод с англ. М.: «Мир», 1984.
2. А.Б. Батраков, Б.В. Середа, А.М. Егоров и др. Создание импульсного источника тормозного излучения на базе наносекундного и микросекундного ускорителей РЭП // *ВАНТ. Серия "Ядерно-физические исследования"* (43). 2004, № 2, с.206-207.
3. V.T. Lazurik, V.M. Lazurik, G.F. Popov, Yu.V. Rogov. RT-Office for Optimization of Industrial EB and X-Ray Processing // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»* (43). 2004, № 2, p.186-189.
4. В.Т. Уваров, Ю.В. Ткач, Н.П. Гадецкий и др. *Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к.п.д.*: Препринт ХФТИ 84-30. М.: «ЦНИИатоминформ». 1984, с.13.
5. Ю.Г. Залеский, Г.А. Кривоносов, И.Н. Онищенко, А.Г. Пономарев. Применение тепловых труб в ускорительной технике // *ВАНТ. Серия "Плазменная электроника и новые методы ускорения"* (7). 2010, № 4, с.360-364.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

RESEARCH OF DECELERATION RADIATION YIELD ON HIGH-CURRENT ACCELERATORS OF RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS OF IPENMA

Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, G.E. Sarukhanian, A.B. Batrakov, V.T. Uvarov, L.N. Kazban, V.T. Lazurik

The results of study of the efficiency of energy conversion electrons in the energy bremsstrahlung in high-current accelerators IPENMA are presented. The analysis of different types and designed the converters. The spectra of bremsstrahlung and conversion factors are obtained and comparison of numerical results with experimental data.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХОДУ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПОТУЖНОСТРУМОВИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ ІПЕНМП

Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов, Г.Е. Саруханян, А.Б. Батраков, В.Т. Уваров, Л.М. Казбан, В.Т. Лазурик

Наведено результати дослідження ефективності перетворення енергії електронів на енергію гальмівного випромінювання на потужнострумових прискорювачах РЕП ІПЕНМП. Проведено аналіз різних типів і конструкцій конвертерів. Отримано спектри гальмівного випромінювання і коефіцієнти перетворення, і проведено порівняння чисельних результатів з експериментальними даними.