

НАВЕДЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ НА УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЭНЕРГИЕЙ 10 МЭВ.

Тетерев Ю.Г., Белов А.Г. (ОИЯИ)

ОИЯИ. Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н.Флерова.

В настоящее время создан новый тип сильноточных ускорителей, мощность пучка которых достигает 100 кВт [1]. Для их практического использования наиболее удобным является диапазон энергий около 10 МэВ. При такой энергии не происходит активации конструкционных материалов ускорителя и мала вероятность загрязнения облучаемых материалов радионуклидами, возникающими при фотоядерных реакциях. Электроны такой энергии целесообразно использовать не только для непосредственного облучения ими продукции, но и для генерации тормозного излучения.

Оптимизация конструкции мишени. К мишени ускорителя, являющейся конвертором для генерации тормозного излучения, предъявляются два основных требования: достижение максимальной интенсивности тормозного излучения (каждый процент потери излучения по отношению к максимально возможной интенсивности введет к потере производительности) и полное поглощение в мишени первичных ускоренных электронов.

Для генерации тормозного излучения становится невыгодным использовать мишени, которые под воздействием пучка не активируются. Интенсивность тормозного излучения может быть увеличена более чем в 2 раза, если в качестве конвертора, например, вместо меди использовать тяжелые металлы: тантал или вольфрам. С эксплуатационной точки зрения использование вольфрама предпочтительней из-за его высокой химической стойкости даже под воздействием облучения. Как показала практика, охлаждаемая мишень из тантала прогорает на воздухе за 200-300 ч работы при плотности мощности пучка на мишени около 900 Вт/см^2 . В тех же условиях на мишени из вольфрама не заметно следов коррозии за несколько лет работы.

Оптимальная толщины мишени из вольфрама, т. е. толщина, при которой можно достичь максимального выхода тормозного излучения, равна 1,2 мм, что в единицах радиационной длины составляет 0,3 [2]. При дальнейшем увеличении ее толщины интенсивность тормозного излучения монотонно спадает. Однако для полного поглощения пучка электронов энергией 10 МэВ требуется толщина вольфрамовой мишени

2,5 мм. В соответствии с экспериментальными данными [2] увеличение толщины мишени до 2,5 мм приведет к снижению выхода тормозного излучения до 0,9 выхода при оптимальной толщине.

С помощью формул из работы [3] можно рассчитать необходимую толщину любого другого отличного от вольфрама материала, чтобы полностью поглотить электроны, имеющие энергию, оставшуюся после прохождения вольфрамовой мишени оптимальной толщины. В частности, для полного поглощения таких электронов необходимая толщина алюминия составляет $4,42 \text{ г/см}^2$, меди – $4,1 \text{ г/см}^2$. В единицах радиационной длины приведенные значения составляют 0,143 и 0,262, соответственно. Интенсивность тормозного излучения, вышедшего из мишени оптимальной толщины, снизится на те же самые 10%, если его пропустить через такой поглотитель из алюминия или меди [2], что является необходимой платой за возможность очистить тормозное излучение от пучка электронов. Замена той части вольфрамовой мишени, которая служит только поглотителем электронов с оставшейся энергией, другим материалом не влияет на интенсивность выходящего тормозного излучения, но приводит к другим позитивным эксплуатационным факторам. Например, в случае использования чисто вольфрамовой мишени, которая охлаждается по периферии, ее температура под воздействием пучка электронов с обычной плотностью мощности около 1 кВт/см^2 может достичь в центре $2000 - 2500^\circ\text{C}$ из-за низкой теплопроводности вольфрама и его малой толщины. Мишень в этом случае будет терять выделившуюся в ней энергию путем теплового излучения, что может испортить обрабатываемый объект и создать дополнительные трудности с охлаждением выводного окна. При использовании же алюминиевого или медного поглотителя в качестве подложки к тонкой вольфрамовой мишени оптимальной толщины ее температура не превысит 400°C , так как тепло с конвертора будет эффективно сниматься через подложку.

Наведенная активность конвертора. Как отмечалось, при энергии электронов около 10 МэВ мишень из вольфрама будет активироваться вследствие происходящих в ней фотоядерных реакций. Образовавшиеся в реакциях быстрые нейтроны могут активировать материал подложки. Активация возможна и в результате захвата нейтронов, замедлившихся в облучаемых водородосодержащих изделиях и бетонных стенах здания. Как показывает практика, наведенная активность конструкционных материалов ускорителей, в частности, мишеней является основным фактором, который определяет

индивидуальную дозу облучения персонала, обслуживающего данные установки.

Для количественной оценки наведенной активности мишени при энергии ускоренных электронов около 10 МэВ данных не достаточно. Данные работы [3] вызывают сомнение в достоверности. Сомнение, например, вызывает соотношение выходов изотопов вольфрама и тантала, которые образуются в результате (γ, n) - и (γ, p) - реакций, соответственно. Исходя из данных [3], излучение изотопов тантала, особенно ^{182}Ta , может стать доминирующим с точки зрения радиационной опасности. При распаде тантала с большим выходом испускаются γ -кванты с энергией существенно большей по сравнению с энергией γ -квантов вольфрама. Наиболее достоверные данные могут быть получены непосредственно из эксперимента.

Эксперимент был проведен с использованием микротрона ФЛЯР ОИЯИ МТ-25, настроенного на вывод ускоренных электронов энергией 10 МэВ. Ток пучка составлял 16 мкА. Пучок электронов через охлаждаемую водой диафрагму с отверстием диаметром 12 мм направлялся на свежую, еще необлученную вольфрамовую мишень толщиной 2,5, диаметром 40 мм, которая с помощью подложки из дюралюминия (сплав Д16) толщиной 18 мм ($4,86 \text{ г/см}^2$) и диаметром 40 мм плотно прижималась к охлаждаемому водой держателю мишени. На расстояниях 6 и 50 см от мишени примерно под углом 70° к направлению пучка электронов размещали активационные детекторы из In, Au, I, Mn и Cu в кадмиевом экране и без него для оценки плотности потока тепловых и эпитепловых нейтронов, рассеянных в зале ускорителя. Зал ускорителя, в котором размещен микротрон, имеет площадь $11 \times 5,5 \text{ м}^2$ и высоту 4 м. Стены выполнены из бетона толщиной 2 м. Расстояние от мишени до ближайшей стены составляло 1 м, до пола - 1,1 м.

После облучения активность вольфрамового конвертора, подложки из дюралюминия и активационных детекторов измеряли с помощью Ge(Li) спектрометра при различном времени охлаждения. Минимальное время охлаждения составляло 2 мин, максимальное 14 суток.

Активность изотопов, которые были обнаружены в конверторе и подложке, приведена в таблице 1 (колонка 3). Данные табл. 1 пересчитаны для бесконечного времени облучения и нулевого времени охлаждения. В расчете учитывали самопоглощение излучения в исследуемых объектах.

Обсуждение результатов. Данные, приведенные в табл.1 для активности изотопов вольфрама, образовавшихся в конверторе, могут быть использованы и для оценки выхода нейтронов. ^{185}W , ^{181}W и ^{179}W , как и нейтроны, образуются в результате (γ, n) -реакции. Для оценки можно принять, что вид зависимости сечения $\sigma_{\gamma, n}(E_\gamma)$ для всех изотопов вольфрама имеет подобную форму. Отличие заключается только в том, что эта зависимость для конкретного изотопа i простирается в сторону большей энергии, начиная от пороговой E_{ni} . Вносимая в общий нейтронный выход парциальная доля η_i конкретного изотопа вольфрама пропорциональна природному содержанию его материнского изотопа и относительному числу γ -квантов энергией выше E_{ni} . Относительное число γ -квантов может быть найдено путем интегрирования их спектра от энергии E_{ni} до максимальной E_0 . В расчетах можно принять, что интенсивность тормозного излучения из тонкой мишени приблизительно обратно пропорциональна квадрату энергии [3].

В Табл.2 приведены результаты расчета парциальной доли и общего выхода нейтронов. Общий выход нейтронов Y рассчитывали троекратно, исходя из результатов измерения активности Q_i трех наблюдаемых продуктов (γ, n) -реакции по формуле $Y = Q_i / \eta_i$. Из приведенных данных видно, что хотя для оценки взяты грубые приближения, результаты расчета общего выхода нейтронов близки. Среднее значение $Y = (4,6 \pm 1) 10^8 \text{ сек}^{-1}$ при токе электронов 16 мкА соответствует выходу $4,5 10^{-6}$ нейтронов/электрон и находится в согласии с расчетными данными [4].

С помощью активационных детекторов определена плотность потока тепловых и эпитепловых нейтронов, рассеянных в зале микротрона. Для тепловых нейтронов она составила $\sim 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Спектр эпитепловых нейтронов может быть описан формулой $\Phi(E) = \Phi_0 E^{-0,8}$, где $\Phi_0 = 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в единицах летаргии. Измеренная на расстоянии 6 см от мишени плотность потока эпитепловых нейтронов оказалась примерно в 5 раз выше.

Активность ^{187}W , образовавшегося в вольфрамовой мишени (см. табл.1), оказалась неожиданно большой, если исходить из результатов измерения плотности потока рассеянных нейтронов. Такая активность могла бы образоваться в поле нейтронов с плотностью потока в 50 раз большей. Причем если активность всех изотопов вольфрама была сосредоточена только в месте попадания пучка на мишень (область диаметром около 10 мм), то активность этого изотопа была примерно равномерно распределена по всей мишени, имеющей

диаметр 40 мм. Присутствие вблизи мишени наполненных водой охлаждающих трубок не может привести к такому большому увеличению плотности потока. Тем не менее был проведен эксперимент, в котором вольфрамовую мишень облучали электронами без охлаждения (все охлаждающие устройства мишени и диафрагмы были демонтированы и удалены). В пределах 10% - ой ошибки, связанной с разными условиями измерения тока на мишени, влияния воды в охлаждающих трубках на активность в эксперименте не отмечено. Столь большую активность ^{187}W , можно объяснить тем, что при энергии бомбардирующих электронов 10 МэВ спектр нейтронов, образующихся, в основном, вблизи порога реакции, низкоэнергетический, а следовательно, эффективное сечение захвата этих нейтронов ядрами вольфрама большое. Эти нейтроны также эффективно захватываются в материале подложки. Все изотопы, которые удалось обнаружить в подложке из дюралюминия, образуются только за счет захвата нейтронов. Их активность оказалась примерно в 40 раз выше рассчитанной на основании измерений плотности потока нейтронов, рассеянных в зале. Активации элементов, входящих в состав подложки, быстрыми нейтронами не обнаружено, из чего также можно сделать вывод, что при бомбардировке вольфрама электронами энергией 10 МэВ образующиеся нейтроны имеют низкоэнергетический спектр, и заметной активации за счет (n,p) или (n, α) реакций осуществиться не может.

В результате эксперимента выяснено, что при энергии электронов ниже 10 МэВ (γ , p) - реакция с образованием изотопов тантала если и идет, то с существенно более низким выходом по сравнению с (γ , n) - реакцией. Отношение выходов менее 10^{-5} , что примерно в 10^4 раз меньше по сравнению с данными работы [3]. Изотопов тантала в вольфрамовом конверторе не обнаружено, установлена только верхняя граница их активности.

В табл. 1 приведена активность, которая будут наблюдаться для обнаруженных в эксперименте изотопов в мишени ускорителя при мощности пучка 100 кВт. Здесь учитывалось, что вольфрамовый конвертор будет иметь в 2 раза меньшую толщину и вследствие этого и выход нейтронов на единицу тока будет также в 2 раза меньше.

Мощность дозы P_i , создаваемую наведенной активностью на расстоянии $h = 50$ см от середины протяженной мишени ускорителя мощностью 100 кВт, рассчитывали по выражению

$$P_i = 2 Q_i b^{-1} h^{-1} \arctg(b/2h) \sum K_{\gamma k} [1 - \exp(-\mu_k d)] / \mu_k d,$$

где $b = 1,25$ м – длина мишени; $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м – толщина вольфрамового конвертора; $K_{\gamma k}$ - ионизационная гамма-постоянная рентгеновского или γ -излучения изотопов γ -линии к энергией E_k ; μ_k - линейный коэффициент ослабления в вольфраме.

В табл.1 также приведена мощность дозы, создаваемая излучением изотопов, образовавшимися в подложке из дюралюминия. Она рассчитана по результатам измерения активности. Мощность дозы, создаваемая наведенной активностью медной подложки, рассчитана с использованием табличных значений сечений активации алюминия и меди и их соотношений. Как видно, предельный уровень мощности дозы для пребывания персонала категории А превысит только излучение ^{181}W , но это в основном рентгеновское излучение дочернего стабильного изотопа тантала. Даже подложка из дюралюминия его ослабит в 4 раза, подложка из меди - в 300 раз.

Вторым по значимости вклада в суммарную мощность дозы от вольфрамовой мишени является γ -излучение ^{187}W . Его вклад в случае использования вольфрама толщиной 1,2 мм составляет примерно половину предельного уровня. В случае же использования вольфрама толщиной 2,5 мм мощность дозы, создаваемая излучением ^{187}W , уже примерно в 2 раза превысит этот уровень. В 2 раза больше число активизируемых ядер и в 2 раза больше выход нейтронов. Но ослабить это излучение, имеющее относительно высокую энергию γ -квантов, уже гораздо сложнее.

В заключение авторы выражают благодарность Б.Н.Гикалу, Г.Г.Гульбекяну и К.Коншаку за постановку задачи и плодотворное обсуждение.

Тетерев Ю.Г., Белов А.Г. Наведенная активность вольфрамовой мишени на ускорителе электронов энергией 10 МэВ.

Проведены эксперименты по определению изотопного состава наведенной активности вольфрамовой мишени для электронного пучка энергией 10 МэВ. На основании результатов измерений проведен расчет мощности дозы от наведенной активности мишени для ускорителя мощностью пучка 100 кВт. Установлено, что значительный вклад в мощность дозы вносит излучение ^{187}W . Проведена оценка выхода нейтронов из мишени и плотностей потоков нейтронов, рассеянных в зале ускорителя. Таблицы 2, список литературы 4 названия.

Таблица 1

Изотопный состав наведенной активности и мощность дозы, создаваемая ее излучением на расстоянии 50 см от середины протяженной мишени

Изотоп	$T_{1/2}$	Активность на микротроне, Бк	Активность при мощности 100 кВт, Бк	Мощность дозы, Гр/ч
1	2	3	4	5

Вольфрамовый конвертор

^{187}W	23,72 ч	$3,7 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
$^{185\text{m}}\text{W}$	1,67 мин	$2,0 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
^{185}W	75,1 сут.	$1,5 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
^{181}W	121 сут.	$7,5 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
$^{179\text{m}}\text{W}$	6,4 мин	$7,4 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^7$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
^{179}W	37,5 мин	$3,0 \cdot 10^5$	$8,7 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
^{182}Ta	114 сут.	$>1 \cdot 10^3$	$>5 \cdot 10^5$	$>2,7 \cdot 10^{-7}$

Подложка из дюралюминия (сплава Д16) толщиной 18 мм
(Al; 3,8 – 4,9 % Cu; 0,3 – 0,9 % Mn; 1,2 – 1,8 % Mg)

^{66}Cu	5,1 мин	$2,2 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
^{64}Cu	12,8 ч	$6,7 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^{-7}$
^{56}Mn	2,58 ч	$6,5 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
^{28}Al	2,25 мин	$1,3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^{-6}$

Подложка из меди толщиной 5 мм

^{66}Cu	5,1 мин		$7 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^{-7}$
^{64}Cu	12,8 ч		$3 \cdot 10^7$	$7,8 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2. Результаты расчета парциальной доли и общего выхода нейтронов из вольфрамовой мишени естественного содержания

Исходный изотоп	Содержание, %	Продукт (γ,n)-реакции	Порог (γ,n)-реакции, МэВ	Парциальная доля, %	Выход, сек ⁻¹ 10 ⁸
^{186}W	28,6	^{185}W	7,19	30,14	5,1
^{184}W	30,67	^{183}W	7,41	28,95	
^{183}W	14,3	^{182}W	6,19	23,78	
^{182}W	26,3	^{181}W	8,06	17,06	4,3
^{180}W	0,13	^{179}W	8,41	0,066	4,5

Teterev Yu.G. and Belov A.G. Induced radioactivity of the tungsten target on a 10 MeV electron accelerator.

УДК 539.172.3; 621.384.60; 621.384.611.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pottier J. A new type of RF electron accelerator the RhoDotron. - Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res., 1989, v. B40/41, p.943-945.
2. Ковалев В.П. Вторичное излучение ускорителей электронов. М.: Атомиздат, 1979.
3. Swanson W.P. Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators. - IAEA technical reports series No. 188.
4. Seltzer S., Berger M. Photoneutron production in thick targets. - Phys. Rev., 1973, v. C7, No. 2, p.858-861.