

ВЫПУСК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ФОЛЬГУ

© 1998 г. В. Л. Ауслендер, И. Л. Черток

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11
Поступила в редакцию 28.01.98 г.

Рассмотрен ряд вопросов, связанных с разработкой предназначенных для мощных электронных ускорителей, применяемых в промышленных радиационных установках, систем выпуска электронного пучка через окно, перекрытое вакуумно-плотной фольгой. Дан расчет выпускных окон при охлаждении фольги двумя способами. Проведена сравнительная оценка ряда материалов, используемых для изготовления фольги. Дана оценка предельных параметров систем выпуска пучка.

ВВЕДЕНИЕ

Применение ускорителей электронов – мощных и удобных в эксплуатации источников радиации – для промышленных и опытно-промышленных целей дает весьма значительный экономический эффект, а в ряде случаев позволяет осуществить технологические процессы, не достижимые иными способами.

В радиационно-технологическом процессе вывод электронного пучка в атмосферу осуществляют через систему выпуска пучка. В наиболее распространенных конструкциях ускорителей пучок разворачивается в линию и выпускается через окно, перекрытое тонкой вакуумно-плотной фольгой, при этом облучаемый объект движется поперек окна. Распределение плотности тока пучка вдоль окна задается развертывающим устройством, а в поперечном направлении оно зависит в основном от рассеяния электронов на фольге выпускного окна и в воздухе, т.е. от материала и толщины фольги, расстояния от фольги до объекта облучения и энергии электронов. Типичное распределение плотности тока пучка в поперечном направлении приведено на рис. 1. Доза, получаемая объектом, движущимся вблизи выпускного окна, составляет (при энергии электронов 0.5–4 МэВ) $D \cong 3000j_i/V$, где D , Мрад – доза, j_i , А/см – линейная плотность тока пучка, V , м/с – скорость движения объекта.

Современные тенденции к увеличению средней мощности ускорителей (разработаны ускорители мощностью 100 кВт и более, проектируются на единицы мегаватт), что связано, в частности, с разработкой высокотемпературных радиационных процессов, требующих высокой мощности дозы, приводят к необходимости создания выпускных устройств для предельных плотностей тока пучка.

В данной работе рассматривается ряд вопросов, связанных с разработкой систем выпуска пучка через окно, перекрытое фольгой.

МАТЕРИАЛ ФОЛЬГИ

Наиболее ответственным элементом систем выпуска пучка является фольга, перекрывающая выпускное окно. От материала фольги зависит потеря энергии пучка, а следовательно, и коэффициент полезного действия системы, и максимальная плотность тока выпускаемого пучка. Это определяет габариты выпускного устройства при заданном токе пучка. Фольга должна обеспечи-

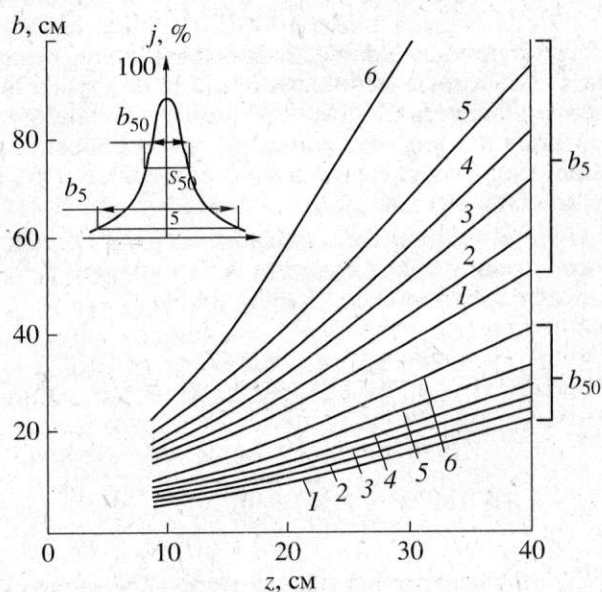


Рис. 1. Распределение плотности тока пучка поперек выпускного окна (Ti-фольга толщиной 0.05 мм). Энергия электронов: 1 – 1.8, 2 – 1.5, 3 – 1.2, 4 – 1.0, 5 – 0.8, 6 – 0.5 МэВ; z – расстояние от фольги.

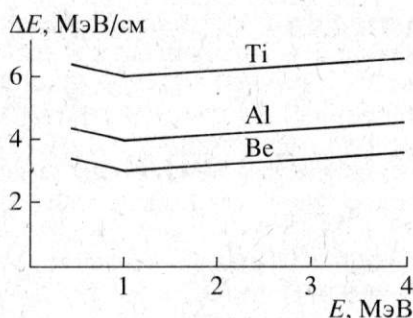


Рис. 2. Удельные потери энергии электрона.

вать возможность длительной (≥ 1000 ч) работы установки без нарушения вакуумной плотности. К материалу фольги предъявляют следующие основные требования:

- высокая радиационная стойкость – выдерживать дозу $> 10^6$ Мрад без существенных ухудшений механических свойств;

- минимальные потери энергии электронного пучка при проходе через фольгу;

- высокая прочность и температуростойкость, что определяет возможность применения тонкой фольги для снижения потерь энергии пучка при значительном перепаде температуры вдоль фольги;

- высокая теплопроводность (для эффективного охлаждения фольги);

- возможность промышленного производства вакуумно-плотной фольги необходимой толщины и площади.

В связи с требованием высокой радиационной стойкости применение в промышленных ускорителях пленок из полимерных материалов (типа лавсан), которые используются в некоторых лабораторных установках, невозможно. В наибольшей степени перечисленным выше требованиям удовлетворяют следующие материалы: Be, Al и его сплавы, а также Ti.

Потери энергии ΔE электроном при прохождении сквозь материал единичной толщины определяются известным соотношением [1]:

$$\Delta E, \text{ эВ/см} = \frac{2\pi e^4 z N}{m_0 V^2} \left[\ln \frac{m_0 V^2 T}{2\Gamma^2 (1 - \beta^2)} - (2\sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + (1 - \beta^2) + \frac{1}{8} (1 - \sqrt{1 - \beta^2})^2 \right],$$

где N – число атомов в 1 см^3 вещества, z – заряд ядра, m_0 и V – масса покоя и скорость электрона, Γ – средний потенциал возбуждения.

На графике (рис. 2) приведены зависимости потерь энергии пучка при прохождении через

различные материалы от энергии электронов. Из графика следует, что в диапазоне энергий электронов 0.5–4 МэВ потери энергии можно считать постоянными с точностью 4%.

Усредненные значения удельных потерь энергии электронного пучка при прохождении через различные материалы, а также основные теплофизические свойства этих материалов приведены в таблице. Потери энергии в алюминиевых сплавах были приняты равными потерям в чистом Al. Предельная рабочая температура фольги t_p определялась с учетом того, что фольга должна длительно работать в атмосфере, содержащей водяные пары, без следов окисления и без существенного снижения прочности. Характеристики материалов взяты в основном из работ [2, 3]. Предел прочности σ_b фольг из Ti и Al нами экспериментально проверен. Помимо характеристик материалов, в таблице приведены коэффициенты $K_1 = \frac{\lambda(t_p - t_0)}{\Delta E}$ и $K_2 = \frac{\sigma_b(t_p - t_0)}{\Delta E}$, характеризующие применимость фольг при различных способах охлаждения, при этом температура охлаждающей среды t_0 принята равной 30°C . Подробнее о коэффициентах K_1 и K_2 будет сказано ниже.

ОХЛАЖДЕНИЕ ФОЛЬГИ

Энергия, теряемая электронным пучком в фольге, идет в основном на ее нагрев. В зависимости от материала и толщины фольги, а также энергии электронов это составляет 2–6% общей мощности пучка. Фольгу необходимо охлаждать, что осуществляют следующими тремя способами: за счет теплопередачи по фольге к холодным кромкам окна, обдувом фольги струей воздуха или иного газа и за счет ее теплового излучения.

Требования к охлаждению фольги становятся особенно жесткими при выпуске пучка с большой плотностью тока. Ограничением при этом является максимальная рабочая температура материала фольги (см. таблицу).

Охлаждение теплопередачей к холодным кромкам окна

Поскольку потери энергии пучка и теплопроводность фольги пропорциональны ее толщине, то при охлаждении теплопередачей толщина фольги не влияет на ее нагрев и в общем случае можно записать

$$I_n \sim \frac{\lambda}{\Delta E} (t_p - t_0) = K_1,$$

где I_n – максимально допустимый ток пучка. Значения K_1 приведены в таблице, из которой видно,

что наилучшими материалами при этом способе охлаждения являются Ве и Al-сплавы.

Рассмотрим выпускные окна разной геометрии: круглое и прямоугольное, полагая, что через них проходит пучок электронов постоянной плотности, заполняющий все окно.

Для круглого окна радиусом R из уравнения теплопроводности нетрудно получить

$$I_n = \frac{4\pi\lambda}{\Delta E}(t_p - t_0) \text{ или } I_n = 4\pi K_1. \quad (1)$$

Таким образом, максимально допустимый ток пучка не зависит от радиуса окна, а определяется лишь материалом фольги. Для окна из Ве $I_n = 2.7$ мА, а для окна из алюминиевого сплава — 400 мкА (см. таблицу).

Рассмотрим выпускное окно в виде щели шириной b и длиной l при $l \gg b$, что позволит пренебречь охлаждением фольги торцевыми стенками окна.

Обозначим через q удельные потери в фольге единичной толщины и приведем результаты решения уравнения теплопроводности для разных распределений плотности тока пучка по выпускному окну.

1) Плотность тока пучка постоянна по всей площади окна:

$$q(y) = I_n \Delta E / bl = \text{const},$$

отсюда

$$I_n = 8K_1 l / b. \quad (2)$$

2) Пучок круглого сечения диаметром b с постоянной плотностью тока по сечению пучка, развертываемого вдоль выпускного окна:

$$q(y) = q_0 \frac{\sqrt{(b/2)^2 - y^2}}{(b/2)^2} \text{ при } q_0 = \frac{4I_n \Delta E}{\pi bl},$$

отсюда

$$I_n = 6.9K_1 l / b. \quad (3)$$

3) Нормальное распределение плотности тока поперек выпускного окна:

$$q(y) = q_0 \frac{1}{2\pi} e^{-y^2/2}, \text{ где } q_0 = 1.6 \frac{I_n \Delta E}{bl}.$$

Численное решение уравнения теплопроводности для случая, когда 95% тока пучка попадает на выпускное окно, дает выражение

$$I_n = 6.5K_1 l / b. \quad (4)$$

Характеристики материалов	Материалы			
	Ве	Al	Al-сплавы	Ti
ΔE , МэВ/см	3.5	4.5	4.5	6.4
σ_B , кг/мм ²	25	7-9	20	57-60
λ , Вт/(см · °С)	1.8	2	1.3	0.15
C , Дж/(г · °С)	2.1	0.98	0.95	0.54
ρ , г/см ³	1.85	2.7	2.8	4.5
t_p , °С	450	100	200	450
K_1	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$0.3 \cdot 10^{-4}$	$0.49 \cdot 10^{-4}$	$0.1 \cdot 10^{-4}$
K_2	$3 \cdot 10^{-3}$	$0.18 \cdot 10^{-3}$	$0.9 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$

4) Пучок круглого сечения с нормальным распределением плотности по сечению разворачивается вдоль выпускного окна:

$$q(y) = q_0 \frac{1}{2\pi} e^{-y^2/2} \frac{\sqrt{(b/2)^2 - y^2}}{(b/2)^2}, \text{ где } q_0 = 1.9 \frac{I_n \Delta E}{bl}.$$

Численное решение дает выражение

$$I_n = 5.6K_1 l / b. \quad (5)$$

Следовательно, допустимый ток пучка в этих случаях зависит как от материала фольги, так и от размеров окна. Из выражений (2)–(5) видно, что чем меньше ширина окна, тем больше допустимый ток на единицу его длины.

Охлаждение обдувом

При охлаждении фольги обдувом уравнение теплового баланса для единицы поверхности может быть записано следующим образом:

$$j \Delta E \delta = \alpha_m (t_p - t_0), \quad (6)$$

где j — плотность тока пучка, α_m — местный коэффициент теплопередачи, δ — толщина фольги.

Рассмотрим выпускное окно шириной b . В этом случае толщина фольги, определяемая из условия сохранения прочности (фольга должна выдерживать атмосферное давление), обратно пропорциональна пределу прочности материала на разрыв (σ_B , см. таблицу) и, учитывая (7), можно записать следующее соотношение:

$$j \sim \frac{\sigma_B (t_p - t_0)}{\Delta E} = K_2. \quad (7)$$

Значения K_2 приведены в таблице, согласно которой лучшим материалом при использовании поверхностного охлаждения является Ti, что и определяет широкое применение Ti-фольги для выпускных систем промышленных ускорителей.

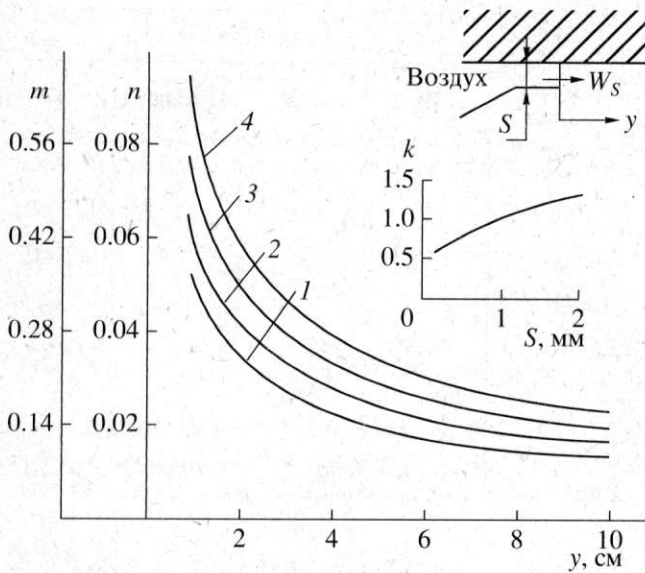


Рис. 3. Графики для расчета местного коэффициента теплопередачи α_m и допустимой плотности тока пучка при обдуве Тi-фольги толщиной 50 мкм через щелевые окна воздухом со скоростью $W_s = 60$ (1), 80 (2), 100 (3), 120 м/с (4). Вверху приведена схема обдува.

Исходя из (6), критерием работоспособности фольги выпускного окна является:

$$t = \frac{j\Delta E\delta}{\alpha_m} + t_0 \leq t_p, \quad (8)$$

где t – температура фольги, t_p – максимальная рабочая температура фольги. Следовательно, для оценки максимально допустимой плотности тока электронного пучка необходимо знать местный коэффициент теплопередачи α_m . Заметим, что при обдуве фольги воздухом через щелевое сопло коэффициент теплопередачи зависит от расстояния между местом обдува и выходным концом сопла и расчет необходимо вести при $j = \text{const}$ для наиболее опасной зоны окна, т.е. от наиболее удаленной от выходного конца сопла зоны.

Расчет местного коэффициента теплопередачи α_m при обдуве пластин воздушным потоком через щелевое сопло приведен в [4]. Если воспользоваться этими результатами, то с учетом известных параметров воздуха при $t_0 = 30^\circ\text{C}$ можно получить формулу

$$\alpha_m, \text{Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ\text{C}) = 18.8S^{0.4}W_s^{0.8}/y^{0.6}, \quad (9)$$

где S , мм – ширина сопла, W_s , м/с – скорость воздушного потока, y , см – расстояние от места обдува до среза сопла. Эта формула справедлива при $16 < y/S < 400$ и числе Рейнольдса $Re > 50$.

Для практического использования результатов расчета охлаждения фольги обдувом удобно ввести дополнительные коэффициенты m , n и k ,

которые представлены на рис. 3 в виде зависимостей $m(W_s, y)$, $n(W_s, y)$ и $k(S)$. При этом местный коэффициент теплопередачи выражается через эти коэффициенты как $\alpha_m, \text{Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ\text{C}) = nk$, а допустимая плотность тока пучка для Тi-фольги толщиной 50 мкм как $j, \text{мА}/\text{см}^2 = mk$.

Охлаждение окна его тепловым излучением

При температуре $300\text{--}500^\circ\text{C}$ коэффициент черноты Тi и Ве составляет $\sim 0.2\text{--}0.3$, следовательно, при рабочей температуре фольги 450°C и температуре окружающей среды 30°C мощность излучения будет равна $0.3\text{--}0.45 \text{Вт}/\text{см}^2$. Это позволяет при толщине фольги 50 мкм выпускать пучок плотностью $10\text{--}15 \text{мкА}$ через Тi-фольгу и $18\text{--}27 \text{мкА}$ через Ве-фольгу. Для фольг из Al и его сплавов, учитывая их меньшие значения коэффициента черноты и допустимой рабочей температуры, используемая плотность пучка существенно ниже.

В связи с весьма низкой допустимой плотностью тока пучка охлаждение фольги излучением не находит применения в современных мощных электронных ускорителях в качестве самостоятельного способа охлаждения, но может быть учтено при охлаждении фольги другими методами.

Применение рассматриваемых методов охлаждения

Рассмотрим возможности использования окон с фольгой, охлаждаемой теплопередачей к холодным кромкам. Через окно круглой формы при применении Ве-фольги можно выпустить пучок с током 2.7 мА (2.7 кВт при энергии электронов 1 МэВ), что явно недостаточно для современных мощных промышленных установок. Применение щелевого окна существенно расширяет возможности этого вида охлаждения. Так, при ширине Ве-окна 1.0 см можно выпустить пучок с линейной плотностью 1.7 мА/см. Если отношение длины окна к ширине равно 20 (большее отношение в промышленных установках, как правило, не используют из-за высоких требований, предъявляемых к качеству пучка и системе отклонения), то через такое окно независимо от его размеров может быть выпущен пучок с током 34 мА (34 кВт при энергии электронов 1 МэВ), следовательно, его можно применять в большинстве существующих промышленных ускорителей.

При применении фольги из другого материала и при ином распределении плотности тока в соответствии с коэффициентом K_1 и соотношениями (3)–(5) допустимая мощность пучка снижается.

Поверхностное охлаждение фольги обдувом струей воздуха позволяет увеличить как плотность тока пучка, так и его линейную плотность.

Лучшим материалом для фольги в этом случае, как уже отмечалось, является Ti.

На действующих в настоящее время ускорителях ИЛУ-6 и ЭЛВ устойчиво работают окна из Ti-фольги толщиной 50 мкм при плотности тока пучка ~ 0.1 мА/см² (ширина окна 7 см, скорость воздушного потока 80 м/с). Расчетная предельно допустимая плотность тока составляет ~ 0.15 мА/см². Коэффициент запаса 1.5 гарантирует защиту окна от случайных изменений рабочих параметров ускорителей.

В принципе при применении Ti-фольги можно достигнуть плотности тока пучка > 3 мА/см². Например, при $W_s = 120$ м/с, $S = 2$ мм, $y = 2$ см и $\delta = 2$ мкм, $j = 2.6$ мА/см²).

Допустимая линейная плотность тока пучка, если не учитывать зависимость местного коэффициента теплопередачи от ширины окна, не зависит от толщины фольги, так как изменение толщины фольги можно компенсировать соответствующим изменением ширины окна. Однако, поскольку средний коэффициент теплопередачи увеличивается при уменьшении ширины окна,

выгодно применять более тонкую фольгу и более узкое окно. Это приводит также и к повышению коэффициента полезного действия системы в целом за счет снижения потерь энергии пучка в фольге. Линейная плотность пучка при этом способе охлаждения может достигать 10 мА/см, например, при $W_s = 120$ м/с, $\delta = 2$ мкм, среднем значении $y = 4$ см и ширине окна 4 см допустимая линейная плотность пучка составляет 8 мА/см, что позволяет через окно длиной 80 см выпускать пучок с током 0.64 А, т.е. мощностью 640 кВт при энергии электронов 1 МэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная дозиметрия. / Под ред. Д. Хайна и Г. Брауналла. М.: Иностран. лит-ра, 1958.
2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. М.: Физматгиз, 1959.
3. Финлянд М.А., Семенова Е.И. Свойства редких элементов. М.: Металлургия, 1964.
4. Волчков Э.П., Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. // ПМТФ. № 2. 1965. С. 50.