

Характеристики электронного пучка и поля тормозного излучения при использовании сверхтонких мишеней в бетатроне

В.И. Беспалов, В.В. Кашковский, Е.А. Богомазова
Томский политехнический университет, Россия

В.Л. Чахлов

НИИ интроскопии Томского политехнического университета, Россия

Исследован способ генерации тормозного излучения, когда ускоренный электронный пучок при сбросе многократно проходит через очень тонкую мишень. Результаты получены методом статистического моделирования движения электронного пучка в ускорительной камере бетатрона на энергию 6 МэВ с учетом изменения во времени вихревого электромагнитного поля. Представлены данные о динамике электронных орбит и характеристиках поля тормозного излучения в зависимости от положения мишени, ее вещества, толщины и поперечных размеров.

В традиционном способе получения тормозного излучения (ТИ) на электронных ускорителях (например, бетатронах) используется мишень оптимальной толщины. Оптимальная толщина мишени выбирается так, чтобы получить наибольший выход интенсивности ТИ из мишени в переднюю полусферу (0° – 90°) относительно направления первичного электронного пучка. Величина оптимальной толщины зависит от энергии электронов и материала мишени, но для тяжелых веществ, из которых, как правило, изготавливают мишени, она примерно равна $1/3 R_0$, где R_0 — полный пробег электронов в приближении непрерывного замедления. Угловое распределение фотонов из такой мишени достаточно широкое, а спектральное распределение характеризуется значительным поглощением низкоэнергетической части спектра в самой мишени [1]. Следует отметить, что “оптимальная” мишень дает большой выход ТИ и в заднюю полусферу (90° – 180°), что создает дополнительные трудности при защите от излучения ускорителя.

В литературе имеются работы, например [2, 3], в которых для генерации ТИ предлагается использовать тонкие мишени с многократным прохождением через них ускоренных электронов. Это позволяет сформировать пучок ТИ с параметрами, отличными от пучка из стандартных “толстых” мишеней, — уменьшить его угловую расходимость, повысить выход фотонов в рентгеновской области спектра ТИ, уменьшить размеры фокусного пятна.

В работе методом статистического моделирования исследован этот способ генерации ТИ в индукционном ускорителе электронов — бетатроне. Для получения достоверных результатов при таком моделировании необходимо точно рассчитывать траектории электронов в ускорительной камере с учетом изменения во времени вихревого электромагнитного поля и процесса прохождения электронов через мишень с генерацией ТИ. Подобная задача была решена путем объединения двух разработанных ранее программ:

- программы для моделирования траекторий электронов в ускорительной камере бетатрона с учетом изменения во времени его вихревого электромагнитного поля [4];
- одной из программ пакета программ ЕРНСА [5], которая предназначена для расчетов характеристик поля ТИ от плоских мишеней.

В работе [4] обсуждается программа, которая позволяет проследить динамику частиц пучка от момента вылета электронов из инжектора и захвата его на равновесную орбиту до момента вывода пучка или смещения его на мишень, установленную в камере ускорителя. В основу этой программы положено численное решение точных уравнений движения, предложенных

в [6]. Полученные в соответствии с этими уравнениями результаты моделирования динамики частиц пучка в момент вывода хорошо согласуются с экспериментальными данными [2].

Моделирование динамики частиц в данной работе проводили, используя экспериментально снятое распределение магнитного поля в плоскости равновесной орбиты бетатрона МБ-6 с энергией ускоренных электронов 6 МэВ (см. [4]). Основные характеристики бетатрона следующие: радиус равновесной орбиты ускорителя равен 6 см; показатель спадания магнитного поля на равновесной орбите — 0.66. Все результаты получены для способа смещения электронного пучка на мишень с помощью круговой обмотки с ослабляющим полем протяженностью 360° по азимуту.

Процесс смещения электронов на мишень исследовали на заключительном этапе ускорения электронов, когда можно считать, что вихревое электрическое поле бетатрона равно нулю и, соответственно, энергия электронов уже не изменяется. В качестве возмущающего поля обмотки смещения использовали поле, спадающее по радиусу так же, как и основное управляющее поле. Реальные размеры ускорительной камеры бетатрона МБ-6 таковы, что по вертикали амплитуда колебаний частиц пучка была ограничена величиной ± 1.5 см, а в плоскости равновесной орбиты пучок мог существовать в диапазоне радиусов от 3.9 до 10.5 см. Мишень в виде сверхтонкого диска располагали внутри камеры на определенном радиусе. В качестве материала мишени в основном применяли золото; толщина мишени изменялась в диапазоне от 1 мкм до 1 мм, а радиус — от 1 до 6 мм.

Процесс моделирования смещения пучка на мишень основывался на том, что к концу ускорения электроны пучка находятся на равновесной орбите и совершают около нее малые бетатронные колебания. Разыгрываются случайные начальные фазовые координаты электрона и затем строится его траектория в ускорительной камере. При этом отслеживается длина пути, пройденного электроном, и, соответственно, изменение величины возмущающего поля обмотки смещения.

Если электрон попал в мишень, то осуществляется переход в программу, рассчитывающую его прохождение через мишень и характеристики поля ТИ – спектры фотонов для различных направлений как за барьерами в направлении первичного электронного пучка, так и в обратном направлении. Соответствующее интегрирование этих дваждыдифференциальных распределений дает множество других характеристик поля ТИ, например мощность тканевой поглощенной дозы в определенном направлении.

Параметры электрона при вылете из мишени (энергия, направление движения) затем становятся начальными для продолжения его траектории в ускорительной камере бетатрона. Если они противоречат условиям дальнейшего движения электрона в ускорительной камере, то фиксируется факт гибели электрона на ее стенке. При каждом попадании в мишень энергия электрона уменьшается и меняется направление движения, а это приводит к увеличению размаха связанных между собой амплитуд радиальных и вертикальных колебаний частиц пучка около синусоидально меняющейся во времени мгновенной равновесной орбиты. Пучок разбухает в пространстве, одновременно изменяется частота обращения электронов по орбите.

Исследования взаимодействия пучка с мишенями различной толщины показывают, что для толстой оптимальной мишени (примерно 500 мкм) наблюдается фактически однократное пересечение мишени на самом краю, в области малых радиусов с относительно большими потерями энергии. По мере уменьшения ее толщины увеличивается число пересечений, при этом места пересечений все более равномерно покрывают поверхность мишени.

Характерная картина многократного пересечения золотой мишени толщиной 1 мкм электронами пучка приведена на рис. 1. Радиус мишени 5 мм, она расположена на радиусе 6,8 см; время увеличения тока в обмотке смещения до максимального значения $\sim 6,3$ мкс. Хорошо видно, что точки пересечения электронов с мишенью достаточно равномерно покрывают ее площадь, а размах радиальных колебаний значительно больше, чем вертикальных.

На рис. 2 показана зависимость среднего числа пересечений золотой мишени от ее толщины. С увеличением толщины мишени число пересечений очень быстро уменьшается, что обусловлено как потерями энергии электронов в мишени, так и их рассеянием. Отметим, что ток в обмотке смещения изменяется по синусоидальному закону от 0 до максимального значения за время, в течение которого электроны совершают определенное число оборотов по равновесной орбите (примерно 6.3 мкс для 5000 оборотов).

При использовании толстой мишени электроны “гибнут” за счет большого сброса энергии в мишени. Для определения основной причины ухода электронов из пучка при использовании тонкой мишени были проведены соответствующие расчеты с “выключением” многократного рассеяния электронов при прохождении через мишень. Результаты этих расчетов, а также анализ энергетического и углового распределений выходящих из мишени электронов указывают на то, что основная причина ухода электронов из пучка при многократных пересечениях тонкой мишени — это накапливающийся угловой разброс электронов за счет многократного рассеяния в мишени.

На рис. 3 приведена зависимость числа пересечений мишени толщиной 1 мкм от атомного номера ее вещества. Видно, что с уменьшением атомного номера вещества среднее число пересечений значительно возрастает и для алюминиевой мишени равно ~ 840 . При этом средние потери энергии в ней около 350 кэВ, что значительно выше, чем в золотой мишени (примерно 90 кэВ). Это также указывает на то, что для тонких мишеней основная причина потерь электронов — их угловой разброс.



Рис. 1: Координаты точек попадания электронов в мишень.

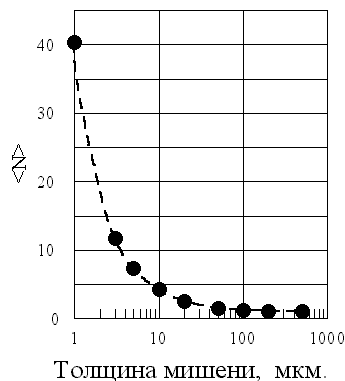


Рис. 2: Среднее число пересечений золотой мишени.

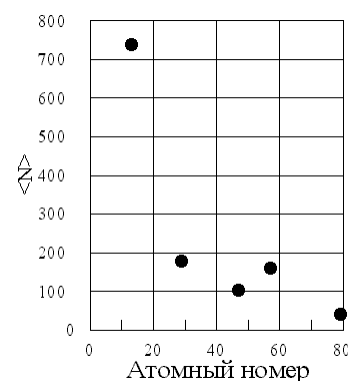


Рис. 3: Зависимость среднего числа пересечений мишени от вещества мишени.

На рис. 4 показана зависимость от толщины мишени мощности тканевой поглощенной дозы ТИ в направлении первичного электронного пучка на расстоянии 1 м от мишени при токе пучка 1 мА, (без учета ослабления ТИ стенкой ускорительной камеры). Как следует из рис. 4, тонкая мишень может обеспечить мощность дозы ТИ не меньшую, чем обычная “оптимальная” мишень. Это происходит как за счет большого числа пересечений мишени электронным пучком, так и за счет меньшего поглощения рождающихся в ней фотонов.

На рис. 5 показан спектральный состав тормозного излучения для тонкой и толстой мишеней. Из него следует, что в тонкой мишени (3 мкм) практически нет поглощения мягких фотонов, в то же время в толстой фотоны с энергией менее 200–300 кэВ испытывают значительное поглощение. Как показывают расчеты, средняя энергия фотонов ТИ из тонкой мишени (1 мкм) в направлении первичного пучка примерно в 2 раза ниже, чем из мишени оптимальной толщины (500 мкм) — соответственно 0,66 и 1,26 МэВ.

Были проведены расчеты зависимости среднего числа пересечений золотой мишени от ее радиуса, которые показали, что, начиная с радиуса примерно 2,5 мм, число пересечений мише-

ни в пределах статистической погрешности расчетов остается постоянным. С учетом результатов рис. 2 это указывает на то, что для энергии 6 МэВ и рассматриваемых условий сброса электронов на золотую мишень толщиной 1 мкм требуется примерно 40 пересечений, чтобы “накопился” угловой разброс, достаточный для ухода электронов из пучка. При меньших радиусах мишени электроны не успевают сделать эти 40 пересечений до своей гибели на стенке ускорительной камеры.

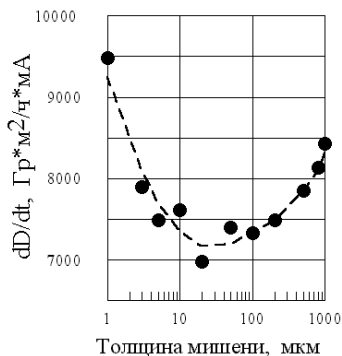


Рис. 4: Зависимость мощности тканевой поглощенной дозы ТИ от толщины мишени.

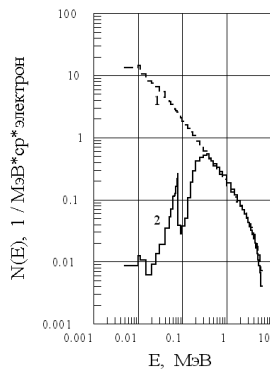


Рис. 5: Спектры ТИ в направлении первичного пучка из золотых мишеней толщиной 3 мкм (1) и 1000 мкм (2).

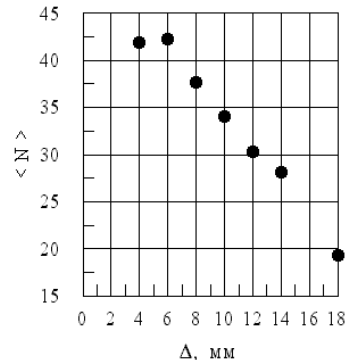


Рис. 6: Зависимость среднего числа пересечений мишени толщиной 1 мкм и радиусом 2 мм от расстояния ее центра Δ до радиуса равновесной орбиты.

На рис. 6 показана зависимость среднего числа пересечений мишени от расстояния ее центра до радиуса равновесной орбиты. С увеличением этого расстояния число пересечений заметно уменьшается. Оптимальное расположение мишени — недалеко от радиуса равновесной орбиты. Следует отметить, что при маленьком радиусе мишени (2 мм и менее) ее пересечения происходят на переднем и заднем фронтах импульса тока в обмотке смещения, если она находится вблизи радиуса равновесной орбиты. Если мишень расположена далеко от этого радиуса, пересечения происходят только на переднем фронте.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что основная причина ухода электронов из пучка при многократных пересечениях очень тонкой мишени — это их рассеяние в веществе мишени. При этом тонкая мишень может обеспечить мощность дозы ТИ не меньшую, чем обычная мишень оптимальной толщины. Это происходит как за счет большого числа пересечений мишени электронным пучком, так и за счет меньшего поглощения рождающихся в ней фотонов.

Список литературы

- [1] Беспалов В.И., Чахлов В.Л., Штейн М.М. // Дефектоскопия. 1987. №8, с. 16-24.
- [2] Касьянов В.А., Михальчук А.А., Пушин В.С. и др. // ПТЭ. 1998. №1, с. 41-42.
- [3] Волков Ю.М., Коломенский Г.А., Лаковичев Е.Ф. и др. // ПТЭ. 1986. №4, с. 31-33.
- [4] Кашковский В.В. – В сб.: Международная юбилейная научно-практическая конференция “Проблемы физико-технического образования и атомной промышленности”. Сборник докладов. – Томск: Изд. ТГУ, 2000, с. 33-37.
- [5] Беспалов В.И. Изв. Вузов. Физика. (Приложение). 2000. №4, с. 159-165.
- [6] Кашковский В.В. // Изв. Вузов. Физика. 1998. №3, с. 29-35.