

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P11-2000-33

М.Г.Айрапетян, Э.А.Айрян, Г.Г.Гульбемян,
О.Сэллэш, А.В.Федоров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫХОДА ИОНОВ
ИЗ МИШЕНИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
РАДИОАКТИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ

2000

1. Введение

Источники радиоактивных ионов должны отвечать общим требованиям производства ионов, однако они являются специфическими с точки зрения материала, подаваемого в разрядную камеру, который представляет собой продукт ядерных реакций первичного пучка с материалом мишени. Важными моментами являются:

- получение достаточно эффективной и быстрой транспортировки данного изотопа от места возникновения до зарядной камеры относительно периода полураспада, поскольку этот изотоп производится в небольшом количестве и интенсивности пучков в большинстве своем не превышают единиц нА;
- сепарация изотопа от остальных продуктов реакции. И первое, и второе достигается с помощью правильного выбора материалов и конструкций системы "мишень - ионный источник" (рис. 1);
- время выхода изотопа из мишени может достигать больших значений, что сильно понижает эффективность системы. С этой точки зрения критическим явлением будет диффузия внутри твердой или жидкой мишени.

Мы пытаемся оценить характеристики этих процессов с помощью физико-математического моделирования.

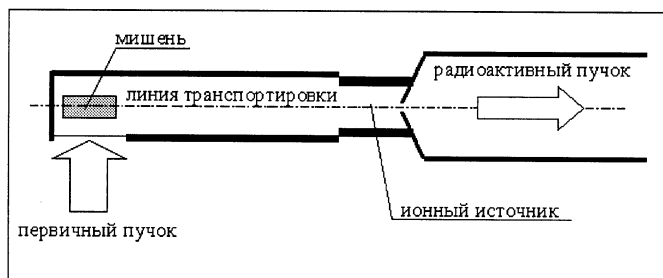


Рис. 1. Упрощенная схема системы для производства пучков радиоактивных ионов

В работе описаны основные принципы моделирования времени, в течение которого частицы находятся в объеме мишени, а также приведены результаты расчетов на простой модели мишени в виде двух коаксиальных дисков. В дальнейшем предполагается развитие модели с целью ее приближения к реальным условиям, из чего может быть получена более реалистичная оценка явлений, критически действующих на производство радиоактивных пучков, а также упрощение проектирования новых и модернизации старых источников радиоактивных пучков.

2. Моделирование времени движения частицы в мишени

Движение частицы в объеме мишени изучалось путем последовательного моделирования многократных отражений частиц от внутренних поверхностей образующих мишень дисков в условиях вакуума (диффузия). Предполагалось, что частицы не

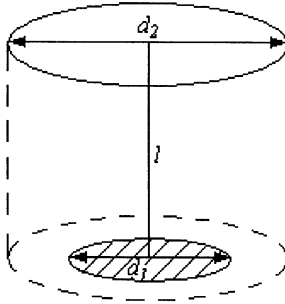


Рис. 2. Схематическое представление мишени

взаимодействуют друг с другом и их плотность в междисковом пространстве такова, что реально имеет место только столкновение частиц с поверхностью диска, но не друг с другом. Взаимодействие частицы с поверхностным слоем дисков описывалось введением параметра - время задержки - τ_{delay} , характеризующего время, в течение которого частица, попавшая на поверхность, не меняет своих координат. При этом на начальном этапе предполагалось, что скорость частицы до и после взаимодействия с диском не меняется по абсолютной величине. Также предполагалось, что все частицы образуются на поверхности одного и того же диска (нижний - заштрихованный, см. рис. 2) с одинаковой начальной скоростью:

$$v_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, m - масса частицы. В последующем предполагается рассмотреть распределение скорости v по максвелловскому закону:

$$P(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2. \quad (2)$$

Плотность вероятности по углу рассеяния в плоскости, перпендикулярной плоскости дисков, определялась законом косинусов:

$$P(\theta) = 2\cos(\theta)\sin(\theta). \quad (3)$$

В плоскости дисков распределение по углу рассеяния было выбрано равномерным.

Выбор таких распределений позволяет смоделировать диффузионный перенос вещества под действием разности концентраций ионов внутри мишени и вне ее.

В случае, когда длина свободного пробега частицы становится сравнима с линейными размерами объема, в котором она находится, для пропускной способности цилиндрической мишени через боковое сечение в единицу времени получено [1]

$$U = C \left(\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{d}{2l}\right) \right) l^2 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (4)$$

где C - коэффициент пропорциональности, M - молярная масса вещества в мишени, T - абсолютная температура (К), d - диаметр нижнего и верхнего дисков мишени (здесь предполагается, что диаметры верхнего и нижнего диска равны), l - расстояние между дисками мишени (все в м), а пропускная способность мишени U измеряется в м³/с.

Время нахождения частиц в объеме мишени обычно определяется как отношение

$$t = \frac{V}{U}, \quad (5)$$

где V - есть объем мишени, равный объему цилиндра с диаметром основания, равным диаметру большего диска, и высотой, равной расстоянию между дисками. Частица считается покинувшей мишень, если она выходит за боковую поверхность этого цилиндра или покидает его со стороны основания за границей нижнего диска (см. рис. 2).

При моделировании диффузионного движения частиц в объеме с правильным сечением время генерации событий может быть заметно сокращено по сравнению с общим случаем произвольного сечения [2]. В данном случае алгоритм моделирования времени нахождения частиц в объеме цилиндрической мишени совпадает с алгоритмом определения времени диффузии частиц по ионопроводу с круглым сечением. Алгоритм подробно описан в предыдущей работе [3].

3. Обсуждение результатов

Время t (с) нахождения частиц в цилиндрической мишени оценивалось на примере ядра ⁶Не при T=293 К. Было разыграно 50000 событий. В случае, когда $t > \tau_{1/2}$, где $\tau_{1/2}$ - период полураспада ядра, считалось, что частица распалась, и она потеряна. Для более реалистичного описания, считалось, что доля N_{lost} от числа влетевших частиц также теряется в силу разных причин. Оценивалось время $t_{N_{lost}}$ прохождения мишени $1 - N_{lost}$ долей от числа влетевших частиц.

Были получены следующие результаты.

Рассматривалась зависимость между координатами образования ядра на нижнем диске и координатами на вылете из мишени: а) частицы образовывались в центре мишени; б) частицы образовывались в произвольном месте на поверхности нижнего

диска. Корреляций обнаружено не было. Частицы вылетали, равномерно распределенные по площади бокового сечения мишени.

Рассматривалась зависимость времени пролета t от диаметров дисков d_1, d_2 и расстояния между ними l (см. рис. 3).

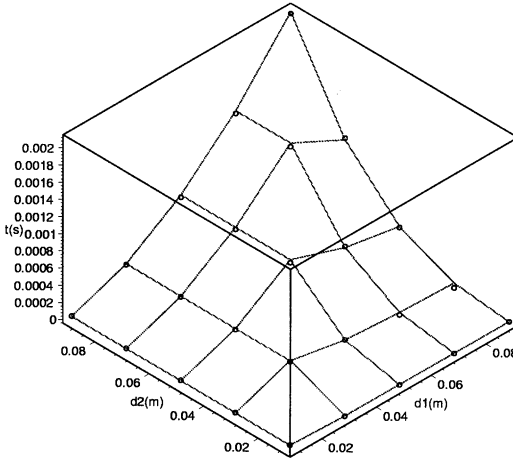


Рис. 3. Зависимость времени выхода из мишени атома ${}^6\text{He}$ от диаметров дисков d_1, d_2 для $l = 0,001\text{м}$ и при 30%-й потере числа частиц; \circ - результаты моделирования, сплошная линия - аппроксимация функциями (6)

Полученные значения аппроксимировались следующей функцией:

$$t_{N_{lost}}(d_1, d_2, l) = a_{N_{lost}} \sqrt{\frac{M}{T}} [\ln(b_{N_{lost}} \frac{d_1}{l})]^{-1} \times f(d_1, d_2), \quad (6)$$

где

$$f(d_1, d_2) = \frac{d_2^3}{d_1}, \quad \text{при } d_2 < d_1,$$

и

$$f(d_1, d_2) = d_1^2, \quad \text{при } d_2 \geq d_1.$$

Значения коэффициентов $a_{N_{lost}}$ и $b_{N_{lost}}$ при разных потерях частиц приведены в таблице 1.

Особенность рассматриваемого движения заключается в несимметричности полученного выражения относительно диаметров дисков d_1, d_2 , что объясняется фиксированным выбором того диска (нижнего), с которого происходит "испарение" ядер.

Еще раз отметим, что этот результат не зависит от того, фиксировались ли координаты образования частиц в мишени или нет.

$N_{lost}, \%$	30	40	50
a	0.3978	0.2873	0.1989
b	11.0546	7.9396	5.0870

Таблица 1. Значения параметров $a_{N_{lost}}$ $b_{N_{lost}}$ в зависимости от времени выхода из мишени $t_{N_{lost}}$ (6) при различных значениях потерь частиц N_{lost}

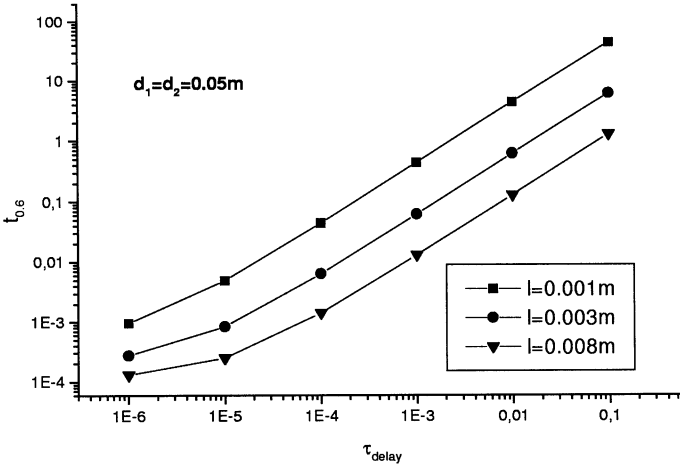


Рис. 4. Зависимость времени выхода из мишени ядер ${}^6\text{He}$ от времени задержки τ_{delay} (с)

Рассматривалась зависимость времени выхода из мишени $t_{N_{lost}}$ от времени жизни на поверхности дисков τ_{delay} (см. рис. 4).

Данные фитировались линейной функцией $Y = a_0 + a_1 X$. Значения коэффициентов a_0 и a_1 для $d_1 = d_2 = 0,05\text{m}$ и при различных l приведены в таблице 2.

Видно, что начиная с некоторого порогового значения τ_{delay} , зависящего от размеров мишени, время пролета t заметно возрастает, приводя к потерям в мишени от распадов частиц.

4. Заключение

Была смоделирована зависимость времени диффузионного выхода частиц из цилиндрической мишени в зависимости от геометрических размеров мишени и времени задержки на поверхности образующих ее дисков. Отмечена несимметричность вре-

$l, \text{ м}$	$N_{lost} = 30\%$		$N_{lost} = 40\%$		$N_{lost} = 50\%$	
	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0
0.001	587.	$6.77 \cdot 10^{-4}$	442.	$5.15 \cdot 10^{-4}$	343.	$3.90 \cdot 10^{-4}$
0.005	27.	$1.95 \cdot 10^{-4}$	24.	$1.52 \cdot 10^{-4}$	19.	$1.17 \cdot 10^{-4}$
0.01	10.	$1.34 \cdot 10^{-4}$	9.	$1.06 \cdot 10^{-4}$	6.	$0.85 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2. Значения параметров a_0 и a_1 в зависимости времени выхода из мишени $t_{N_{lost}}$ от времени задержки τ_{delay} функцией $Y = a_0 + a_1X$ при $d_1 = d_2 = 0,05\text{м}$ и различных l и N_{lost}

мени выхода из мишени относительно диаметров дисков, образующих ее, что связано с фиксацией диска, на поверхности которого образуются исследуемые ядра. Построена простая аналитическая формула, аппроксимирующая эту зависимость. Также показано отсутствие корреляций между координатами образующихся в мишени частиц и координатами на выходе из нее.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 99-01-01101.

Литература

- [1] А.И.Пипко, В.Я.Плисковский, Е.А.Печко, "Конструирование и расчет вакуумных систем", Энергия, Москва, 1970.
- [2] Б.Д.Ершов, Н.Г.Попов, Г.Л.Саксатинский, "Методы анализа молекулярных потоков", - НИИЭФА, обзор ОА-31, Ленинград, 1979.
- [3] М.Г.Айрапетян, Э.А.Айрян, Г.Г.Гульбекян и др., "Математическое моделирование времени диффузии радиоактивных ядер через трубопровод круглого сечения от производящей мишени к ионному источнику", Препринт ОИЯИ Р11-99-102, Дубна, 1999.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 февраля 2000 года.

Айрапетян М.Г. и др.

P11-2000-33

Моделирование времени выхода ионов из мишени
при производстве радиоактивных пучков ионов

Описан алгоритм и приведены результаты моделирования времени выхода ионов из мишени в зависимости от относительных размеров ионообразующих дисков и расстояния между ними.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации и Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Hayrapetyan M.G. et al.

P11-2000-33

Modeling of the Time of Ion Output from the Target
in Radioactive Beams Production

The time of radioactive nucleus be situated in cylindrical target depending on target dimensions is investigated. An algorithm of modeling and results of computer simulation are described.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation and at the Flerov Laboratory of Nuclear Reaction, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 15.03.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,85

Тираж 320. Заказ 51909. Цена 1 р. 02 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области