

прозрачностью барьера, так называемым, оптимальным проколом в терминологии авторов [2].

Авторы выражают благодарность М.Э. Райху за обсуждение результатов экспериментов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] N e m i r o v s k y Y., R o z e n f e l d D., A d a r R., K o r n f e l d A. // J. Vac. Sci. Technol. 1989. V. A7. N 2. P. 528-535.
- [2] Р а й х М.Э., Р у з и н И.М. // ФТП. 1985. Т. 19. В.7. С. 1217-1225.
- [3] В у л ь А.Я., К и д а л о в С.В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 3. С. 451-456.
- [4] T a b a t a b a j a N., S t i l l m a n G.E., C h i n R., D a r k u s P.D. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. N 5. P. 415-417.
- [5] К а о Т.М., S i g m o n T.W., В u b u - l a c L.O. // J. Vac. Sci. Technol. 1987. V. 45. N 5. P. 3175-3178.
- [6] В u b u l a c L.O., T e n n a n t W.E. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 5. P. 355-357.
- [7] Г у с я т н и к о в В.Н., Р а й х М.Э., Р у з и н И.М. // Тематический сборник по материалам XII зимней школы ФТИ, Л., 1986. С. 161-194.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
18 января 1991 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 6

26 марта 1991 г.

10; 12

© 1991

НОВЫЙ ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД
РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

Б.С. А к ш а н о в, Н.А. Х и ж н я к

Длительное время для электромагнитного разделения изотопов применяли поперечные магнитные поля [1]. Соответствующие установки получались чрезмерно громоздкими, энергоемкими, а эффект разделения пучка ионов по массам (дисперсия) был мал. Поэтому в последние годы разрабатываются комбинированные устройства, в которых наряду с магнитными стационарными полями используются

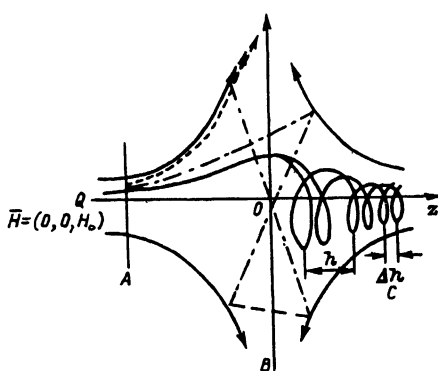


Рис. 1. Движение заряженных частиц в магнитных ловушках острой геометрии в зависимости от параметра $\eta = r_0 / R_1$: А - плоскость инжекции частиц, В - плоскость нулевого магнитного поля, С - пространство дрейфа частиц по спиральным траекториям. Траектории заряженных частиц: 1 - при $\eta > 1$ (пунктир), 2 - при $1 > \eta > 0.76$ (штрих-пунктир), 3 - при $\eta < 0.76$ (сплошная линия).

высокочастотные или импульсные поля (резонансные явления в плазме, импульсные лазерные поля и др. [2-4]). Однако подобные устройства сложны, дороги и далеки от совершенства, хотя широко рекламируются различными фирмами [5].

В промышленности для разделения тяжелых изотопов типа урана используется пока в основном старая техника, основывающаяся на газодиффузионных и центрофужных установках. Вместе с тем в США предполагается постепенная замена этих мощных, энергоемких и дорогостоящих установок на установки с лазерным разделением изотопов в парах атомарного урана (процесс „СИЛВА“) или молекулярного урана (процесс „СИЛМО“), либо на установки с ультрацентрифузионным разделением изотопов типа „РСИ“ [6]. Естественно, что такая замена потребует больших затрат и времени. Кроме того, в последние годы стало ясно, что необходимо развивать эффективные методы разделения радиоактивных изотопов для нового направления в атомной технике - трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов атомной промышленности. В этом случае выделение долгоживущих радиоактивных нуклидов из продуктов радиохимической обработки отходов атомной промышленности представляется совершенно необходимым этапом.

Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия плазменных потоков с магнитными полями сложной геометрии привели нас к разработке нового весьма эффективного электромагнитного метода разделения изотопов в относительно простых и недорогих устройствах. В отличие от всех известных способов нами существенно используется явление изменения характера траектории

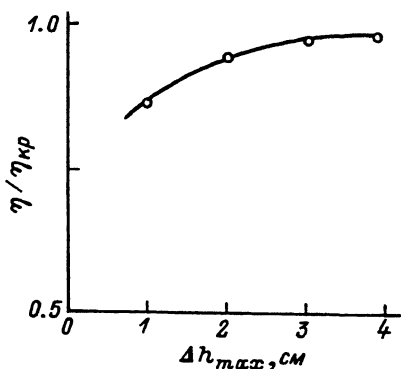


Рис. 2. Экспериментальная зависимость Δh разности шагов ионов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ от параметра η ($\Delta h = (2\pi r_0 / \eta \sqrt{1 - \eta^2}) (\Delta M / M)$).

заряженной частицы, проходящей через плоскость нулевого магнитного поля. В настоящей работе излагаются краткие результаты этих исследований.

Рассмотрим аксиально симметричное магнитное поле, образованное двумя соосными соленоидами со встречными магнитными полями (магнитная ловушка со встречными магнитными полями).

Выбираем ось системы в качестве оси OZ . Пусть инжектор заряженных частиц расположен в плоскости A (рис. 1). Частицы инжектируются параллельно силовым линиям магнитного поля, которое в этом сечении имеет только лишь Z -ю компоненту на расстоянии r_0 от оси. Пусть v обозначает скорость этих частиц. Тогда дальнейшее движение частицы существенно зависит от значения параметра $\eta = r_0 / R_1$, где $R_1 = \frac{Mv c}{eH_0}$ - лармовский радиус окружности, по которой частица двигалась бы в поперечном магнитном поле [6]:

При $\eta > 1$ частицы покидают ловушку, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля в кольцевую щель (плоскость $Z = 0$).

При $1 > \eta > 0.76$ частицы „захватываются“ в ловушку, совершая несколько колебаний между магнитными стенками, и все же покидают ловушку через кольцевую щель (плоскость $Z = 0$).

При $\eta < 0.76$ частицы переходят плоскость нулевого магнитного поля и двигаются дальше по спирали, охватывающей магнитную ось. Если первоначальный пучок состоял из изотопов с различными массами, то каждый изотоп движется по спиральной траектории со своим шагом, равным

$$h = 2\pi r_0 \frac{\sqrt{1 - \eta^2}}{\eta}. \quad (1)$$

Разность шагов Δh может быть достаточно велика даже после одного оборота спиралей и в случае разделения изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ в сравнительно малой установке с диаметром камеры взаимодействия 300 и длиной 500 мм может составлять несколько сантиметров.

Примечательно, что такая высокая дисперсия может иметь место даже для веществ, имеющих самую малую разность масс изотопов. Для получения наибольшей дисперсии в подобных установках необходимо выбирать величину магнитного поля таким образом, чтобы параметр n был максимален. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость разности шагов Δh изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ от отношения η .

Важным достоинством подобных установок является их универсальность. Так, например, установка определенных размеров, конфигурации магнитных полей и их величины в принципе пригодна для разделения изотопов любого вещества от самого легкого до самого тяжелого. Изменяется лишь величина скорости инжектируемых частиц.

Установки легко автоматизируются. Если связать энергию инжектируемых частиц с величиной магнитного поля так, чтобы сохранялось соотношение (1), автоматически будет поддерживаться высокая стабильность разделения изотопов.

При необходимости достижения более высокой дисперсии пространство дрейфа ионов со спиральным движением можно делать более протяженным. Тогда пространственная дисперсия изотопов будет увеличиваться в арифметической прогрессии с каждым оборотом спирали.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Арцимович Л.А. и др. // Атомная энергия. 1957. Т. 3. № 12. С. 483.
- [2] Bonnevier B. // Ark. Fys. 1966. V. 33. P. 255.
- [3] James B.W., Simpson S.W. // Plasma Phys. 1976. V. 18. P. 289.
- [4] Патент ФРГ № 2810781.
- [5] Патенты Великобритании № 2016795 и № 2053717.
- [6] Бюлл. иностранной коммерческой информации. 1985. № 24. С. 5757.
- [7] Синельников К.Д. и др. // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. Киев: АН УССР, 1965. В. 4. С. 388-403.

Харьковский
физико-технический
институт АН УССР

Поступило в Редакцию
25 декабря 1991 г.