

ядерных реакциях, вводятся непосредственно в масс-сепаратор (экспресс-информация).

Оси. Преимущество метода: высокий коэф. обогащения в 1 цикле; возможность одновременного разделения всех изотопов; универсальность, позволяющая переключать одну и ту же установку для разделения стабильных и радиоактивных изотопов. Недостатки: малые производительность и коэф. использования вещества; большие энергетич. и эксплуатацион. затраты.

Электромагн. методом осуществлено разделение практически всех стабильных изотопов. В СССР существует Государственный фонд стабильных изотопов.

Лит.: 1) Арцимович Л. А., Избр. труды, М., 1978; 2) Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю., Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях, М., 1972; 3) Proceedings of the 10-th International Conference on Electromagnetic isotope separators and techniques related to their applications, «Nucl. Instr. and Meth.», 1981, v. 186, № 1/2; 4) Незлин М. В., Динамика пучков в плазме, М., 1982; 5) Сысоев А. А., Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок, М., 1983.

**Ионный циклотронный резонанс.** В однородном магн. поле  $H$  ион с энергией  $\mathcal{E}_i$  и массой  $M$  движется по круговой орбите с циклотронной частотой  $\Omega$  и радиусом

$$r_H = \left( \frac{2\mathcal{E}_i}{M} \right)^{1/2} / \Omega.$$

Если при этом на смесь ионов действует переменное электрич. поле с частотой  $\omega$ , то энергию поглощают ионы, находящиеся в резонансе с полем:  $\Omega = \omega$ . При этом  $r_H$  возрастает, что позволяет отделить эти ионы от других (см. *Циклотронный резонанс*).

Для реализации метода требуется протяжённый столб плазмы диаметром  $2r_{H\max}$ . Для И. р. У при  $H=1$  Тл и  $kT=10$  эВ приемлемая плотность плазмы  $n \sim 10^{12} - 10^{13}$  ионов·см<sup>-3</sup>. Для И. р. К при  $n=10^{10} - 10^{11}$  ионов·см<sup>-3</sup> при обогащении  $^{41}\text{K}$   $\alpha \approx 10$  [1].

**Плазменное разделение.** Используется вращение плазмы под действием силы Лоренца или магн. сжатие плазмы бегущей высокочастотной волной. В плазменной центрифуге могут быть получены высокие центробежные ускорения (до  $10^8$  м/с<sup>2</sup>), но при очень высокой темп-ре (напр., 50 000 К). Для изотопов Кг, Аг, Не, U  $\alpha \approx 1,1 - 1,3$ .

**Оптические методы.** Основаны на изотопич. сдвиге спектральных линий поглощения электромагн. излучения. Если длина волны  $\lambda$  падающего на изотопную смесь атомов или молекул монохроматич. света совпадает с линией поглощения одного из изотопов, то свет поглощают только атомы этого изотопа, переходя в возбуж-

одного фотона (одноступенчатый фотолиз); пример — обогащение D и  $^{13}\text{C}$  при фотолизе формальдегида. При возбуждении на уровень (электронный или колебательный) ниже порога диссоциации необходим второй фотон с  $\lambda$ , достаточной для диссоциации (двухступенчатый фотолиз); примеры: обогащение  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$  и  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$ , при фотолизе  $\text{NH}_3$  и  $\text{BCl}_3$  под действием ИК-излучения  $\text{CO}_2$ -лазера и прошедшего через оптич. фильтр УФ-излучения искры или лампы-вспышки; фотолиз  $\text{UF}_6$  с помощью ИК-излучения ( $\lambda=16$  мкм) и УФ-лазеров [1]. Для многоатомных молекул возможна многофотонная диссоциация под действием только ИК-излучения; примеры: обогащение изотопами при воздействии излучения  $\text{CO}_2$ -лазера на  $\text{SF}_6$  ( $^{32}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ ),  $\text{CF}_3$  ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$ ),  $\text{BCl}_3$  ( $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$ ),  $\text{SiF}_4$  ( $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ),  $\text{CCl}_4$  ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{37}\text{Cl}$ ) и др. При возбуждении на электронный или колебат. уровень выше порога хим. реакции возможно ускорение реакции; примеры: обогащение  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$  в реакции  $\text{N}_2 + \text{O}_2$  и  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$  в реакции  $\text{BCl}_3 + \text{H}_2\text{S}$ .

Для И. р. с использованием ат. паров металла необходимы лазер на красителях и УФ-лазер. Первый (излучающий обычно в видимой части спектра) производит селективное возбуждение одного изотопа, второй — ионизацию возбуждённых атомов. Полученные ионы

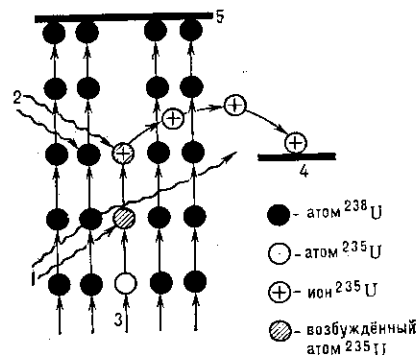


Рис. 6. Схема лазерного обогащения  $^{235}\text{U}$  фотоионизацией: 1 — излучение возбуждающего лазера; 2 — излучение ионизирующего лазера; 3 — поток атомных паров; 4 — коллектор ионов; 5 — конденсатор пара.

отклоняются электромагн. полем к коллектору. Нейтральные пары собирают на др. коллекторе. Процесс лазерной фотоионизации атомов применён для изучения И. р. Rb, Li, Ca, Nd, Sm, Eu, Cd, Dy, Er, Yb, U.

Достоинства лазерного И. р.: универсальность, возможность воздействия только на 1 изотоп (в США есть программа разработки лазерной технологии обогащения природного урана методом фотоионизации паров  $^{235}\text{U}$  (рис. 6)).

Лит.: Импульсные  $\text{CO}_2$ -лазеры и их применение для разделения изотопов, М., 1983; Басов Н. Г. и др., Новые методы разделения изотопов, «УФН», 1977, т. 121, с. 427; Карлов Н. В. и др., Селективная фотоионизация атомов и ее применение для разделения изотопов и спектроскопии, «УФН», 1979, т. 127, с. 593.

А. А. Сазыкин.

**ИЗОТОПЫ** (от греч. *isos* — равный, *isotopos* — место) — разновидности атомов одного и того же хим. элемента, атомные ядра к-рых имеют одинаковое число протонов ( $Z$ ) и разл. число нейтронов ( $N$ ). (И. — *нуклиды* одного элемента.) И. наз. также ядра таких атомов. И. занимают одно и то же место в периодич. системе элементов (отсюда назв.). По своим ядерным свойствам (спектр энергетич. уровней, способность вступать в те или иные ядерные реакции и др.) И., как правило, имеют мало общего между собой. В подавляющем большинстве случаев вещества, различающиеся только изотопным составом, обладают одинаковыми хим. и почти одинаковыми физ. свойствами, т. к. на структуру электронной оболочки атома влияет практически только заряд ядра. Поэтому выделение к.-л. И. из природной смеси, напр.  $^{235}\text{U}$  (0,7%) и  $^{238}\text{U}$  (99,25%) из природного урана, к-рый содержит гл. обр.  $^{238}\text{U}$  (99,25%), является сложной задачей, для решения к-рой используются небольшие различия в скоростях испарения, диффузии и др. методы (см. *Изотопов разделение*).

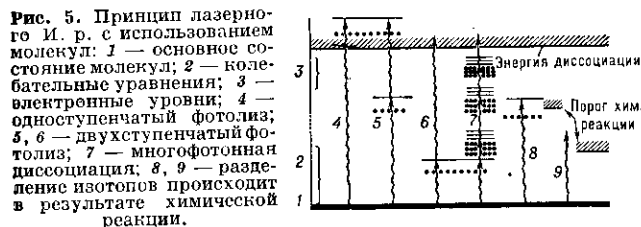


Рис. 5. Принцип лазерного И. р. с использованием молекул: 1 — основное состояние молекул; 2 — колебательные уровни; 3 — электронные уровни; 4 — одноступенчатый фотолиз; 5, 6 — двухступенчатый фотолиз; 7 — многофотонная диссоциация; 8, 9 — разделение изотопов происходит в результате химической реакции.

дешнее состояние. Возбуждённые атомы отделяют от невозбуждённых фотохим. и физ. методами (фотоионизация, фотолиз). Ввиду избирательности поглощения значение  $\alpha$  может быть высоким. Достигнутая в первичном акте селективность на практике может ухудшаться из-за обмена энергией возбуждения или зарядами при столкновении с др. изотопом, вторичных хим. реакций и др. Первые опыты К. Цубера (K. Zuber, 1935, фотохим. окисление) дали для обогащения  $^{200}\text{Hg}$  и  $^{202}\text{Hg}$   $\alpha \approx 4$ .

Для оптич. И. р. используются лазеры. Лазерное излучение можно применять для селективного возбуждения электронных уровней атомов или колебат. уровней молекул (рис. 5). Если электронный уровень выше порога диссоциации, для распада молекулы достаточно