

## ЛАЗЕРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ $^{40}\text{K}$ МЕТОДОМ ИЗОТОПИЧЕСКИ-СЕЛЕКТИВНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ПУЧКЕ УСКОРЕННЫХ АТОМОВ

Ю.А.Кудрявцев, В.С.Летохов, В.В.Петрунин

Осуществлено детектирование изотопа  $^{40}\text{K}$  методом двухступенчатой лазерной фотоионизации в ускоренном атомном пучке при коллинеарном возбуждении. Получена селективность ионизации, равная  $10^5$ .

1. Развитие лазерных методов детектирования одиночных атомов <sup>1</sup> позволило поставить задачу прямого определения ультранизких концентраций изотопов без использования явления радиоактивного распада. Сегодня такая задача решается при использовании ускорителей на несколько МЭВ в качестве высокочувствительных масс-спектрометров <sup>2</sup>. Лазерные методы потенциально могут быть значительно проще и дешевле <sup>3</sup>. Однако селективность лазерного возбуждения редких долгоживущих изотопов в присутствии основных стабильных изотопов ограничена малым изотопическим сдвигом для наиболее интересных изотопов. Для преодоления этой трудности был предложен метод многоступенчатого возбуждения и ионизации атомов, предварительно ускоренных в заданном потенциале  $U$  <sup>4</sup>. При таком ускорении изотопы с различными массами приобретают различную скорость и, следовательно, возникает кинематический изотопический сдвиг для любой спектральной линии любого изотопа:

$$\frac{\Delta\nu_{12}}{\nu_0} = \frac{1}{c} \sqrt{2eU} \left( \frac{1}{\sqrt{M_1}} - \frac{1}{\sqrt{M_2}} \right), \quad (1)$$

где  $M_1, M_2$  – массы двух изотопов. Величина такого искусственного сдвига при  $U=10$  кВ <sup>5</sup> примерно на порядок больше обычного массового изотопического сдвига. Кроме того, при электростатическом ускорении атомов (в виде ионов с последующей перезарядкой в нейтральные атомы) происходит группировка продольных скоростей, что приводит к сильному сжатию доплеровски-уширенных спектральных линий при коллинеарном возбуждении. Это обеспечивает взаимодействие всех ускоренных атомов редкого изотопа с монохроматическим лазерным излучением.

В настоящей статье приведены результаты первых успешных экспериментов по детектированию таким методом относительно редкого изотопа  $^{40}\text{K}$ , имеющего очень малый массовый изотопический сдвиг. За счет использования изотопически-селективного возбуждения только на одной ступени двухступенчатого возбуждения в ридберговское состояние, достигнута селективность ионизации  $10^5$ .

2. Атом калия имеет два стабильных изотопа  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$  с относительной концентрацией 93,2 и 6,8%, соответственно, и радиоактивный изотоп  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$  лет) с относительной концентрацией 0,012%.

На рис. 1 показаны рассчитанные спектры поглощения тепловых (справа) и ускоренных до энергии 4 кэВ (слева) изотопов калия на первой и второй ступенях возбуждения. Так как возбуждение лазерным излучением осуществлялось навстречу движению атомов, то спектры поглощения ускоренных атомов смещены относительно тепловых в "красную" сторону. Спектры тепловых атомов показаны с учетом сверхтонкого расщепления основного  $4S_{1/2}$  и первого возбужденного  $4P_{3/2}$  состояний, а спектры ускоренных атомов (в принятом масштабе) – только с учетом сверхтонкого расщепления основного уровня. При ускорении атомов до 4кэВ величина изотопического сдвига на второй ступени увеличивается в 20 раз – от 220 МГц <sup>6</sup> до 4,1 ГГц (рис. 1), а доплеровская ширина линии поглощения уменьшается в  $2\sqrt{eU/kT}$  раз и равна  $\Delta\nu_D = 5,9$  МГц при температуре источника  $T = 1073$  К. В эксперименте атомы всех трех изотопов излучением широкополосного лазера первой ступени ( $\lambda_1 = 765$  нм,  $\Delta\nu_1 = 0,8$  см<sup>-1</sup>), переводились из основного  $4S_{1/2}$  состояния в первое возбужденное состояние

$4P_{3/2}$ . Далее атомы одного выбранного изотопа излучением узкополосного лазера второй ступени ( $\lambda_2 = 460 \text{ нм}$ ,  $\Delta\nu_2 = 0,015 \text{ см}^{-1}$ ) возбуждались в ридберговское состояние  $21D$ , откуда происходила их ионизация в постоянном электрическом поле.

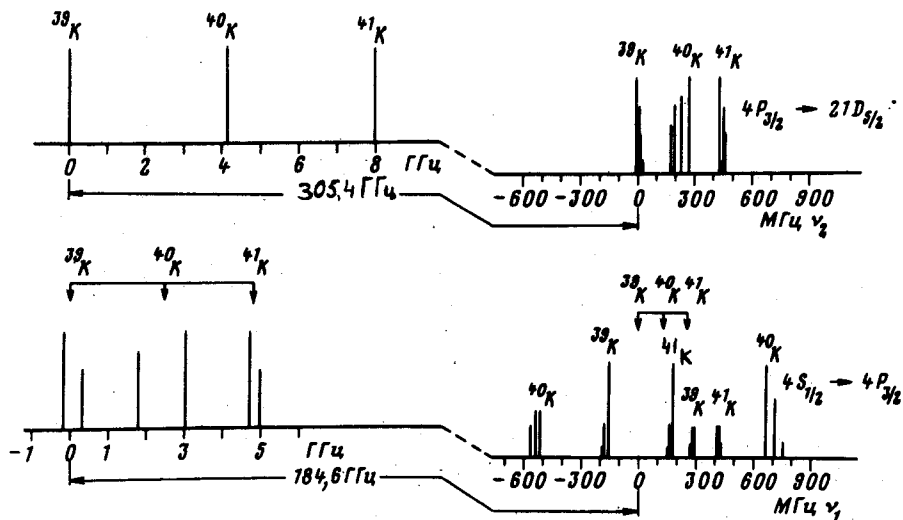


Рис. 1

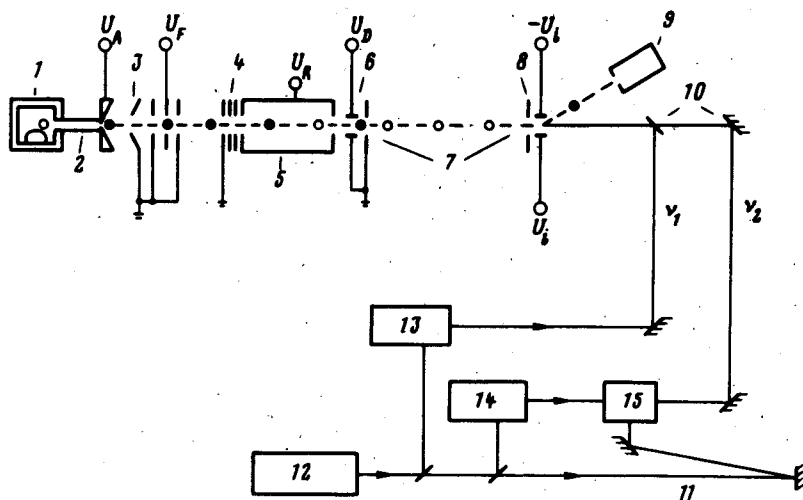


Рис. 2

Рис. 1. Рассчитанный спектр поглощения тепловых (справа) и ускоренных до энергии 4 кэВ (слева) изотопов калия на переходах  $4S_{1/2} \rightarrow 4P_{3/2}$  и  $4P_{3/2} \rightarrow 21D$ . Константы сверхтонкого расщепления взяты из <sup>7</sup>. Стрелками указаны центры тяжести переходов

Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 - атомизатор, 2 - ионизатор, 3 - вытягивающий электрод, 4 - система замедления ионов, 5 - перезарядная ячейка, 6 - фильтрующий конденсатор, 7 - бесполево́я область, 8 - полевой ионизатор, 9 - ВЭУ, 10 - зеркала, 11 - оптическая линия задержки, 12 - эксимерный ХеСл-лазер, 13 - лазер первой ступени, 14, 15 - генератор и усилитель лазера второй ступени

3. Пучок ускоренных атомов калия создавался путем резонансной перезарядки ускоренных ионов калия. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. После автоматизации металлического калия в атомизаторе 1 происходила ионизация калия на поверхности, нагретой до температуры  $800^\circ\text{C}$  танталовой фольги ионизатора 2. Образовавшиеся ионы ускорялись в электрическом поле  $U_A$  ускорителя 3, из которых одиночной линзой формировался параллельный пучок. Далее ионы попадали в перезарядную ячейку с парами калия длиной 10 см, в которой поддерживалась температура  $160^\circ\text{C}$ . При этом 80% ионов преобразо-

вывалось в атомы, неперезарядившиеся ионы убирались в фильтрующем конденсаторе 6. Эффективная величина тока атомов в пучке составляла 3 нА при диаметре пучка 3 мм. Далее атомы проходили через бесполевою область 7, в которой осуществлялось двухступенчатое изотопически-селективное возбуждение быстрых атомов в ридберговское состояние. Ридберговские атомы ионизовались в полевом ионизаторе 8 и отклонялись на вторичный электронный умножитель 9, сигнал, с которого, обрабатывался стробируемым вольтметром и записывался самописцем. Для точной настройки в резонанс с линиями поглощения различных изотопов удобнее изменять не частоту лазерного излучения, а энергию атомов. С этой целью перед перезарядной ячейкой установлена система замедления 4, на которую подается замедляющее положительное напряжение  $U_R = 0 \div 320$  В. При энергии атомов калия 3,8 кэВ, изменению энергии на 1 эВ соответствует изменение резонансной частоты на второй ступени на 40 МГц. При сканировании замедляющего напряжения в резонансе последовательно оказываются различные изотопы калия.

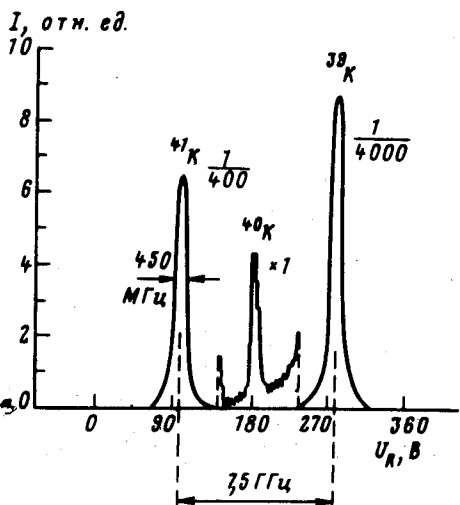


Рис. 3. Зависимость выхода фотоионов при ионизации атомов калия от величины замедляющего напряжения

Излучение лазеров  $\nu_1$  и  $\nu_2$  с помощью зеркал 10 направлялись навстречу атомному пучку. Ширина спектра излучения лазера первой ступени 13 в 5 раз больше спектральной ширины необходимой для возбуждения всех изотопов калия. Лазер второй ступени состоял из генератора 14 и усилителя 15, причем накачка усилителя осуществлялась с задержкой 12 нс относительно момента прихода излучения в усилитель из генератора. Оба лазера накачивались излучением эксимерного ХеСl-лазера 12, работающего с частотой 20 Гц.

4. Спектр ионизации изотопов калия, ускоренных до энергии 3,8 кэВ, показан на рис. 3. Большему замедляющему напряжению соответствует пик более легкого изотопа  $^{39}\text{K}$ . Отношение интенсивностей пиков  $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$  равно отношению естественных концентраций изотопов. Ширина наблюдаемых линий в спектре ионизации равна 450 МГц и обусловлена эффективной шириной лазерной линии второй ступени. Расстояние между линиями  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$ , равное 7,5 ГГц (185 В), соответствует расчетной величине (рис. 1). Селективность ионизации, определяемая как отношение сигнала от изотопа  $^{39}\text{K}$  к фоновому сигналу, равна  $10^5$ .

Таким образом, лазерная фотоионизация ускоренных атомов при коллинеарном возбуждении позволяет получить высокую изотопическую селективность ионизации на одной ступени возбуждения. Существование дополнительного изотопического сдвига для любой спектральной линии даст возможность реализовать идею перемножения селективностей при многоступенчатом возбуждении<sup>8</sup>. Следует отметить, что коллинеарная фотоионизация может быть использована на выходе масс-сепаратора для радикального увеличения разрешающей способности.

## Литература

1. Балыкин В.И., Беков Г.И., Летохов В.С., Мишин В.И. УФН, 1980, 132, 293.
2. Litherland A.E., Beukens R.P., Kilius L.R., Rucklidge J.C., Gove H.E., Elmore D., Purser K.H. Nucl. Instr. and Meth., 1981, 186, 463.
3. Letokhov V.S. Comm. Atom. Molec. Phys., 1981, 10, 257.
4. Kudriavtsev Yu.A., Letokhov V.S. Appl. Phys., 1982, B29, 219.
5. Anton K.-R., Kaufman S.L., Klempt W., Muzzi G., Neugart R., Otten E.W., Schinzler B. Phys. Rev. Lett., 1978, 40, 642.
6. Pendrill L.R., Niemax K.J. Phys. B: At. Mol. Phys., 1982, 15, L 147.
7. Arimondo E., Inguscio M., Violino P. Rev. Mod. Phys., 1977, 49, 31.
8. Letokhov V.S., Mishin V.I. Opt. Comm., 1979, 29, 168.

Институт спектроскопии  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
12 мая 1985 г.