

02

© 1991

## НОВЫЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД РЕЗОНАНСНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ АТОМОВ КОРОТКОЖИВУЩИХ ЯДЕР

Г.Д. Алхазов, А.Е. Барзах,  
В.П. Денисов, К.А. Мезилев,  
Ю.Н. Новиков, В.Н. Пантелеев,  
А.В. Попов, Э.П. Судентас,  
В.С. Летохов, В.И. Мишин,  
В.Н. Федосеев, С.В. Андреев,  
Д.А. Веденеев, А.Н. Зюзиков

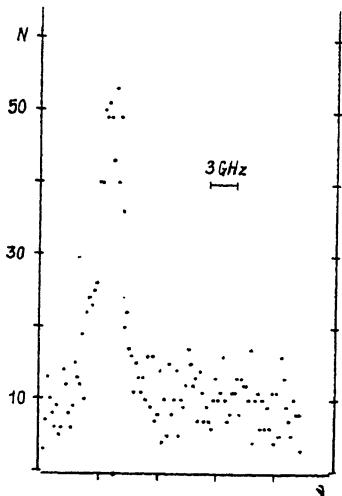
Оптическая атомная спектроскопия, использующая перестраиваемые лазеры на красителях, входит в настоящее время в арсенал основных средств исследования нестабильных ядер. В этом методе в одном эксперименте одновременно определяются такие важные характеристики ядра, как спин, магнитный дипольный момент, электрический квадрупольный момент и изотопическое изменение зарядового среднеквадратичного радиуса. Ввиду того, что нестабильные короткоживущие ядра, т.е. ядра, далеко отстоящие от полосы стабильности, производятся в ядерных реакциях в очень малых количествах, актуальной является задача повышения чувствительности метода. В данной работе мы представляем первые результаты, полученные в новом более эффективном варианте резонансной ионизационной спектроскопии, основанном на применении предложенного нами ранее селективного лазерного ионного источника [1, 2].

Суть метода состоит в следующем. Два или три сведенных вместе лазерных луча направляются в горячую металлическую полость ионного источника, в котором осуществляется резонансная ионизация атомов исследуемых нуклидов. Атомы ионизируются посредством их многоступенчатого возбуждения в автоионизационные состояния. На второй и третьей ступенях возбуждения используются широкополосные лазеры, настроенные на резонансные значения частот атомных переходов, причем частотный спектр излучения этих лазеров перекрывает сверхтонкую структуру переходов и возможные изотопические сдвиги, а на первой ступени используется узкополосный лазер, частота которого сканируется. При совпадении частоты лазера на первой ступени с резонансными значениями происходит ионизация атомов. Количество ионизованных атомов как функция частоты лазера на первой ступени и представляет собой измеряемый спектр сверхтонкой структуры. Анализируя измеренные резонансные значения частот, можно извлечь информацию о перечислявшихся выше ядерных характеристиках.

Высокая эффективность здесь достигается благодаря тому, что ионизируемые в ионном источнике атомы до того момента, как они покинут полость источника через отверстия ионного источника, несколько раз пересекают область облучения лазерами и в результате с большой вероятностью ионизируются. Ионизовавшиеся атомы в данном ионном источнике (и это является наиболее существенным обстоятельством) не соприкасаются со стенками и не нейтрализуются на них. Это происходит по следующей причине. Горячие металлические стенки источника эмиттируют в большом количестве электроны, в результате чего внутренний объем источника оказывается отрицательно заряженным, а у поверхности источника образуется двойной электрический слой, поле которого препятствует попаданию положительных ионов на стенки. Подходя к выходному отверстию, ионы попадают в поле вытягивающего электрода, которое вытягивает ионы из источника.

В данной работе измерялись изотопические сдвиги оптической линии с длиной волны  $\lambda = 555.6$  нм в атомах нейтронодефицитных нуклидов  $Yb$ . Исследуемые изотопы получались в танталовой мишени (12 г) в результате ядерных реакций, происходивших при взаимодействии с мишенью пучка протонов с энергией 1 ГэВ и интенсивностью  $10^{12}$  1/с. Для обеспечения быстрого выделения продуктов реакции мишень нагревалась до температуры 2300–2500 °С. Выделявшиеся из толщи мишени атомы  $Yb$  по соединительной трубке попадали в ионный источник, который представлял из себя ниобиевую трубку длиной 60 мм с диаметром 2 мм, нагревавшуюся до температуры 2000–2100 °С. В трубку ионного источника вводились два совмещенных луча лазеров с диаметром 0.5 мм. На первой ступени возбуждения использовался относительно узкополосный лазер с шириной полосы генерации  $\sim 1.7$  ГГц, а на второй и третьей ступенях возбуждения использовался один и тот же широкополосный лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 580.9$  нм и шириной полосы генерации около 30 ГГц. Перестраиваемые лазеры на красителях накачивались импульсными лазерами на парах меди с частотой повторения 10 кГц. Выходящие из ионного источника ионы изотопов  $Yb$  ускорялись до энергии 30 кэВ, разделялись по массам электромагнитным масс-сепаратором с массовым разрешением  $\sim 1000$  и детектировались в фокальной плоскости масс-сепаратора. Ионы нейтронодефицитных изотопов иттербия  $^{160-166}Yb$ , которые относительно недалеко отстоят от полосы стабильности и которые образуются в достаточно большом количестве, регистрировались с помощью электронного умножителя. Регистрировать таким способом ионы более нейтронодефицитных изотопов  $Yb$ , получавшихся в меньших количествах, было затруднительно из-за значительного фона других изобар, атомы которых производились в мишени в гораздо большем количестве и частично ионизовались за счет поверхностной ионизации на горячих стенках источника. В случае нуклидов  $^{154}Yb$ ,  $^{155}Yb$  и  $^{156}Yb$  данная проблема успешно решалась посредством регистрации  $\alpha$ -частиц, испускавшихся при  $\alpha$ -распаде этих изотопов. Для регист-

Число зарегистрированных  $\alpha$ -частиц как функция частоты лазера на первой ступени возбуждения атомов  $^{154}\text{Yb}$ .



рации  $\alpha$ -частиц использовался кремниевый поверхностно-барьерный детектор с энергетическим разрешением  $\Delta E \approx 30$  кэВ и телесным углом регистрации  $\alpha$ -частиц  $7\% \cdot 4\pi$ . Эффективность лазерного ионного источника в обсуждаемом эксперименте, согласно нашей оценке, была 1% или несколько выше.

Измеренные значения сдвигов (на линии с  $\lambda = 555.6$  нм) для атомов изотопов  $^{166}\text{Yb}$ ,  $^{164}\text{Yb}$ ,  $^{162}\text{Yb}$ ,  $^{160}\text{Yb}$ ,  $^{156}\text{Yb}$  и  $^{154}\text{Yb}$  по отношению к изотопу  $^{168}\text{Yb}$  составили соответственно следующие значения: 1560(120), 3590(100), 6150(110), 8670(110), 13650(160) и 16940(85) МГц. Здесь приведены только статистические ошибки измерений. Мы допускаем возможность систематических ошибок, связанных с погрешностями калибровки частотной шкалы, на уровне 100 МГц. В случае ядра  $^{155}\text{Yb}$  ( $I = 7/2$ ) определены также константы сверхтонкой структуры  $a = -960(90)$  МГц и  $b = 350(300)$  МГц. Эти величины соответствуют магнитному дипольному моменту  $\mu = -0.84(8)$  я.м. и квадрупольному электрическому моменту  $Q_S = -1.2(1.0)$  бн.

На рисунке представлен оптический спектр атомов  $^{154}\text{Yb}$  - самого короткоживущего из исследованных нами изотопов иттербия ( $T_{1/2} = 0.4(1)$  с). Отметим, что в традиционном варианте резонансной ионизационной спектроскопии [3] удавалось измерять изотопические сдвиги для ядер редкоземельных элементов при скорости их образования в мишени не менее  $10^5$  1/с. В данном же случае, согласно расчету, ядра  $^{154}\text{Yb}$  образовывались в мишени со скоростью  $2 \cdot 10^3$  1/с, причем представленный спектр был измерен за время всего лишь  $t = 12$  мин. При этом, как видно из приведенного на рисунке спектра, значимый результат при измерении изотопического сдвига можно было бы получить при значительно меньшей набранной статистике. Таким образом, можно говорить о том, что по сравнению с традиционным вариантом здесь чувствительность метода повышена более, чем на два порядка. Имея в виду, что еще имеются пути повышения эффективности лазерного ионного источника и эффективности регистрации ионов, а также то, что можно просто увеличить время набора статистики, мы полагаем, что в принципе данным методом возможно проведение измерений изотопических сдвигов для нуклидов, производимых в мишени в количестве всего лишь несколько ядер в секунду.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алхазов Г.Д., Берлович Э.Е., Пантеле-  
ев В.Н. // Письма в ЖТФ. 1988. Т.14. В. 12. С. 1109.
- [2] Alkhaзов G.D., Berlovich E.Ye.,  
Panteleev V.N. // NIM. 1989. V. A 280.  
P. 141.
- [3] Жерихин А.Н. и др. // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. С.1249.

Ленинградский институт  
ядерной физики  
им. Б.П. Константинова АН СССР

Поступило в Редакцию  
10 июня 1991 г.