

## ЛАЗЕРНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ ФОТОИОНИЗАЦИОННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СЛЕДОВ РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА $^{221}\text{Fr}$ В ОБРАЗЦЕ

С.В.Андреев, В.С.Летохов, В.И.Мишин

Измерено сверхтонкое расщепление линии  $D_2$  изотопа  $^{221}\text{Fr}$  ( $T_{1/2} = 4,8$  мин). Уточнена величина потенциала ионизации атома франция  $E_i < 4,154$  эВ. Эксперименты проводились при потоке  $\text{Fr}$  из образца равном  $8 \cdot 10^2$  изотоп/с. Предельная чувствительность детектирования  $\text{Fr}$  в образце составляла  $10^4$  атомов.

1. В настоящее время метод лазерной резонансной фотоионизации атомов является одним из наиболее чувствительных методов детектирования частиц <sup>1</sup>. Высокая чувствительность этого метода позволяет исследовать СТС и изотопические сдвиги атомных линий при потоках атомов  $10^4 - 10^5 \text{ с}^{-1}$ , что соответствует их среднему числу в области наблюдения около 1 – 10 атомов <sup>2</sup>. Большой интерес вызывает регистрация в образцах и исследование атомов редких радиоактивных элементов <sup>1</sup>). Одним из таких элементов является  $\text{Fr}$ . Период полураспада наиболее долгоживущего изотопа  $^{223}\text{Fr}$  равен 22 мин, поэтому в естественных образцах он содержится в чрезвычайно малых количествах как продукт радиоактивного распада атомов  $\text{U}$ . Это привело к тому, что первые спектральные исследования  $\text{Fr}$  удалось провести только в конце 70-х годов с помощью ускорителя при потоках  $\sim 10^8$  атомов/с <sup>4</sup>. В настоящее время измерены длины волн переходов из основного состояния в четыре низлежащих <sup>5</sup>.

В данной статье представлены результаты спектральных исследований и детектирования атомов  $\text{Fr}$  при потоках в  $10^5$  раз меньших, чем в <sup>4</sup>, что открывает принципиально новые возможности в атомной спектроскопии радиоактивных элементов, позволяя работать с активностью, меньшей  $10^{-6}$  кюри, в стандартных лабораторных условиях.

2. Эксперимент проводился на образце, содержащем  $\sim 10^9$  атомов  $^{225}\text{Ra}$ , имплантированных на глубину  $\sim 100 \text{ \AA}$  в танталовую фольгу размером  $10 \times 20$  мм и толщиной 10 мкм. Образец приготавливался путем сбора ядер отдачи  $^{225}\text{Ra}$ , образующихся в результате радиоактивного распада  $^{229}\text{Th}$ , нанесенного в виде тонкого слоя на танталовую фольгу. Радиоактивный распад атомов  $^{225}\text{Ra}$  рождает цепочку элементов  $^{225}\text{Ra} \xrightarrow[14,8 \text{ дня}]{\beta} ^{225}\text{Ac} \xrightarrow[10 \text{ дн.}]{\alpha} ^{221}\text{Fr} \xrightarrow[4,8 \text{ мин.}]{\alpha}$ ,

одним из которых был  $^{221}\text{Fr}$ . Стационарное количество  $^{221}\text{Fr}$  в образце  $N_{\text{ст}} = nT_{1/2} / \ln 2 = 3,3 \cdot 10^5$  атомов,  $n = 8 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  – скорость наработки  $^{221}\text{Fr}$  в результате радиоактивного распада  $^{225}\text{Ac}$  (измерялась по  $\alpha$ -активности).

Схема фотоионизации  $\text{Fr}$  показана на рис. 1. Излучение лазера на парах меди  $I^6$  (энергия в импульсе 0,65 мДж, длительность импульса  $\approx 15$  нс, частота следования  $8,7 \cdot 10^3$  Гц) с помощью диэлектрического зеркала разделялось на два пучка. Один пучок с длиной волны 578,2 нм (40%) использовался для накачки лазера на красителе 2, излучением которого  $\lambda_1 = 718,0$  нм <sup>4</sup> осуществлялось возбуждение на первой ступени, другой – с длиной волны 510,6 нм – использовался для ионизации атомов из возбужденного состояния. Для синхронизации импульсов обоих пучков осуществлялась оптическая задержка излучения  $\lambda_2 = 510,6$  нм. Лазерные пучки сводились вместе навстречу друг другу внутри ионизационной камеры 3.

Схема устройства ионизации и системы регистрации представлена на рис. 2. Фотоионизация атомов  $\text{Fr}$  осуществлялась внутри нагретой ( $\sim 600^\circ\text{C}$ ) полости 1, образованной двумя выталкивающими пластинами из титана диаметром 30 мм, разделенных изолятором из кварцевой трубки длиной 10 мм и толщиной стенки 2 мм. Нагрев полости осуществлялся излучением

<sup>1</sup>Идея резонансного фотоионизационного детектирования единичных атомов радиоактивных элементов была сформулирована в работе <sup>3</sup>.

ем горячей поверхности 2. Атомы Fг выпаривались из образца в танталовом отростке 3 при температуре  $T \approx 1250^\circ\text{C}$  и по каналу в одной из выталкивающих пластин попадали внутрь ионизационной полости. Для пассивации стенок полости и уменьшения работы выхода материалов, из которых она сделана, внутрь полости был заложен металлический Ва. Атомы, блуждающие внутри полости, многократно пересекают область ионизации, что увеличивает вероятность перехвата их лазерным лучом и, следовательно, эффективность их ионизации<sup>7</sup>. Фотоионы выталкивались из полости через отверстие диаметром 1 мм импульсом электрического поля амплитудой 1,1 кВ/см и длительностью 350 нс, отклонялись пластинами 4 и регистрировались микроканальным электронным умножителем 7 типа ВЭУ-7. Для уменьшения фона, связанного с тепловыми ионами, осуществлялся анализ ионов по массе и энергии за счет времени пролета (пролетная область 50 см) и с помощью электростатического анализатора в виде сеток 6. Вакуум в камере составлял  $10^{-7}$  тор.

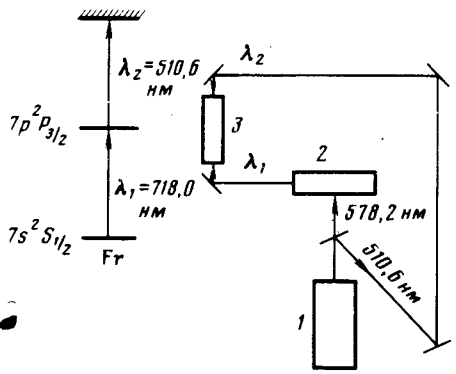


Рис. 1. Схема лазерной фотоионизации Fг: 1 – лазер на парах меди, 2 – лазер на красителе, 3 – ионизационная камера

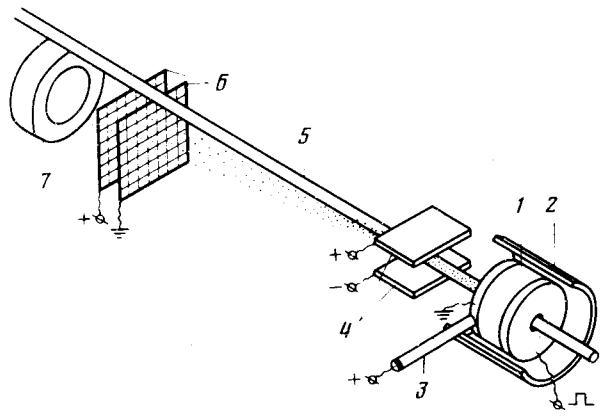


Рис. 2. Схема устройства ионизации и системы регистрации: 1 – ионизационная полость, 2 – нагреватель, 3 – выпариватель, 4 – отклоняющие пластины, 5 – лазерные лучи, 6 – электростатический анализатор, 7 – вторичный электронный умножитель

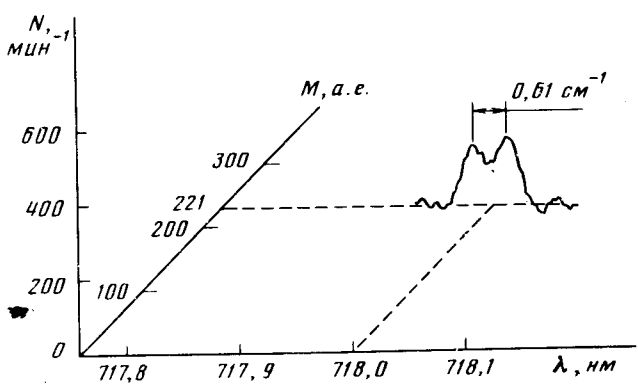


Рис. 3. Схема идентификации атомов Fг. Спектр получен при потоке  $8 \cdot 10^2$  атомов/с

3. Идентификация атомов Fr осуществлялась по резонансному пику фототока на длине волны 718,0 нм, возникавшему при перестройке частоты лазера первой ступени. При этом времяпролетный масс-анализатор был настроен на массу, соответствующую атомам Fr (рис. 3). Сверхтонкая структура линии  $D_2$  ( $\lambda = 718,0$  нм) была исследована с помощью лазера с шириной спектра излучения  $0,3 \text{ см}^{-1}$ . Измеренное в эксперименте расстояние между компонентами СТС равнялось  $0,61 \pm 0,02 \text{ см}^{-1}$ , что согласуется с величиной  $0,62 \text{ см}^{-1}$ , полученной в работе <sup>5</sup>, но на другой линии ( $D'_2$ ,  $\lambda = 422,57$  нм). Совпадение величин сверхтонкого расщепления служит дополнительным доказательством детектирования франция.

Отметим, что суммарная энергия квантов лазерного излучения, резонансно ионизирующих атомы франция, равнялась 4,154 эВ. Отсюда следует, что потенциал ионизации франция  $E_i \leq 4,154$  эВ (вероятность попадания частоты медного лазера на переход в ридберговское состояние мала). Полученное нами значение потенциала ионизации меньше величины, приведенной в работе <sup>4</sup> ( $E_i = 4,19$  эВ).

4. Предельная чувствительность регистрации атомов Fr в образце определялась следующим образом. В течение времени  $4T_{1/2}$  франций накапливался в холодном отростке. Затем отросток быстро нагревался. Режим нагрева выбирался таким, что выпаривание Fr осуществлялось за 1 минуту. За это время было зарегистрировано 750 отсчетов за вычетом фона. Это количество отсчетов соответствовало стационарному количеству  $^{221}\text{Fr}$  в образце, равному  $3,3 \cdot 10^5$ . Отсюда следует, что эффективность регистрации атомов Fr равнялась  $2 \cdot 10^{-3}$ . Легко определить предельную чувствительность регистрации, если учесть, что флуктуации фона в эксперименте составляли  $\approx 35 \text{ мин}^{-1}$ . При отношении сигнал/шум, равном единице, чувствительность будет равна  $1,5 \cdot 10^4$  атомов Fr в образце.

5. Данная работа показывает, что имеется альтернативный путь спектроскопии элементов, которыми природа не обеспечивает нас в достаточном, для оптических исследований, количестве. Вместо использования дорогостоящей ускорительной техники для генерации больших потоков таких элементов <sup>4, 5</sup> можно использовать слаборадиоактивные источники таких элементов в сочетании с ультрачувствительной фотоионизационной лазерной спектроскопией, доступной сегодня каждой лаборатории.

Авторы выражают глубокую благодарность В.А.Карнаухову за ценные обсуждения и советы, а А.Ф.Новгородову и Г.В.Мышинскому за приготовление образца.

#### Литература

1. *Летохов В.С.* УФН, 1986, **148**, 123; Optica Acta, 1985, **32**, 1191.
2. *Fedoseyev V.N., Letokhov V.S., Mishin V.I., et al.* Opticas Comm., 1984, **52**, 24.
3. *Letokhov V.S.* Tunable Lasers and Applications, v. 3, edited by A. Mooradian, T. Jaeger, P. Stokseth, S. Ringer Series in Optical Sciences (Berlin, 1976), p. 122.
4. *Lieberman S., Pinard J., Duong H.T., et al.* Phys. Rev., 1980, **A22**, 2732.
5. *Touchard F., Bendali N., Büttgenbach S., et al.* Laser Spectroscopy of Francium Atoms, 7-th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Darmstadt-Seeheim, FRG, 1984.
6. *Жерихин А.Н., Летохов В.С., Мишин В.И. и др.* Квантовая электроника, 1981, **8**, 1340.
7. *Андреев С.В., Мишин В.И., Секацкий С.К.* Квантовая электроника, 1985, **12**, 611.