

ЛАЗЕРНОЕ ФОТОИОНИЗАЦИОННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЕДИНИЧНЫХ АТОМОВ НАТРИЯ ЧЕРЕЗ РИДБЕРГОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ

Г.И.Беков, В.С.Летохов, В.И.Мишин

Впервые осуществлена регистрация единичных атомов, используя метод ионизации атома электрическим полем из высоколежащих (ридберговских) состояний. Атомы натрия, возбужденные в состояние $13d$ излучением импульсных лазеров на красителях, ионизовались импульсом электрического поля. В области наблюдения было зарегистрировано 3 – 5 атомов Na из атомного пучка.

1. Метод селективной ступенчатой фотоионизации атомов лазерным излучением, впервые осуществленный в работе [1], может использоваться не только для разделения изотопов, но и для детектирования атомов, так как при достаточно большой плотности энергии лазерных импульсов квантовый выход фотоионизации близок к единице [2]. На эту возможность было обращено внимание в работах [3 – 5]. Первый успешный эксперимент по детектированию единичных атомов методом селективной фотоионизации сделан в работах [6].

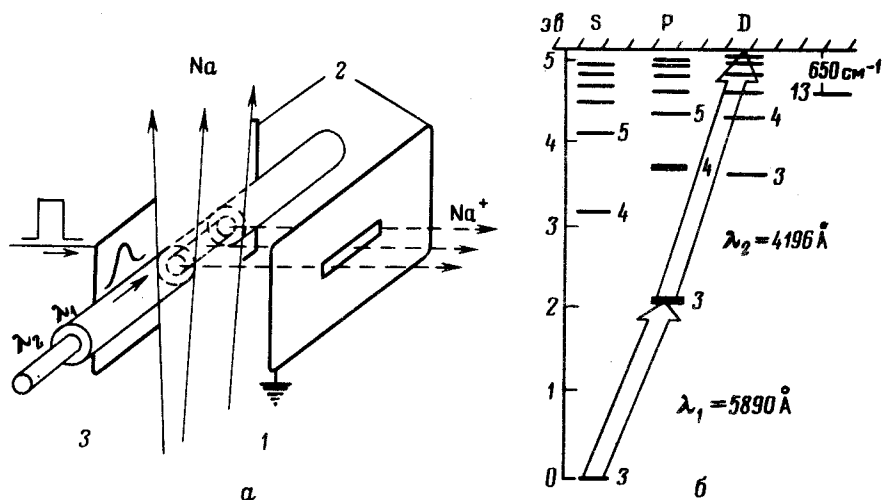


Рис. 1. а – Взаимное расположение атомного и световых пучков: 1 – пучок атомов натрия, 2 – электроды, 3 – световые пучки лазеров; б – схема используемых переходов атома Na

Недостатком метода двухступенчатой ионизации атомов лазерным излучением является относительно низкое сечение фотоионизации по сравнению с сечением резонансного возбуждения. Это предъявляет очень высокие требования к энергетике ионизирующего лазерного импульса, особенно при регистрации атомов, пересекающих лазерный луч с тепловой скоростью, когда для перехвата всех атомов требуется высокая частота повторения импульсов.

Энергию лазерного импульса, необходимую для ионизации атома, можно на несколько порядков уменьшить, если ионизовать атом из высоколежащего состояния электрическим полем, как это предложено в [7] и реализовано в [8].

В настоящей работе метод ионизации высоковозбужденных атомов электрическим полем впервые используется для регистрации единичных атомов натрия.

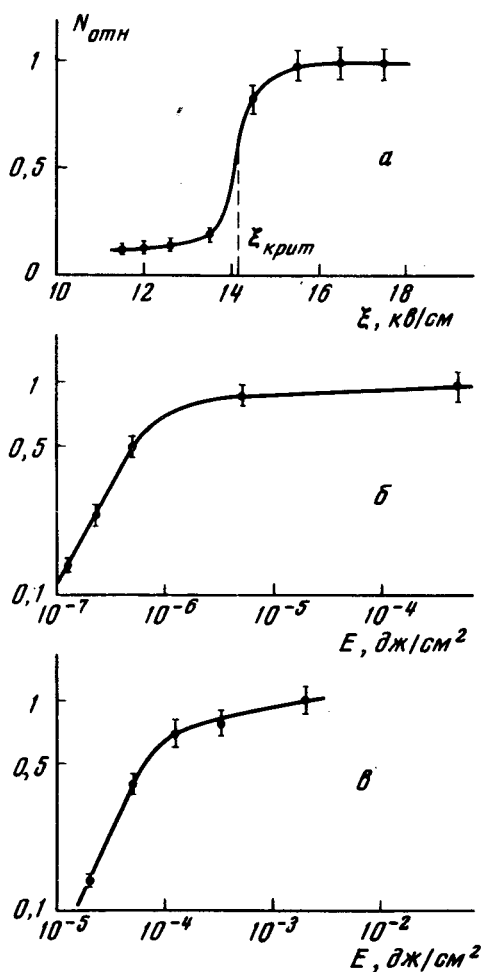


Рис. 2. а — Зависимость выхода ионов от напряженности электрического поля при возбуждении атомов Na в состояние $13d$; б — зависимость выхода ионов от плотности энергии лазерного импульса первой ступени возбуждения, напряженность электрического поля $E = 17$ кВ/см; в — зависимость выхода ионов от плотности энергии лазерного импульса второй ступени возбуждения, $E = 17$ кВ/см

2. Атомы натрия в пучке (рис. 1, а) возбуждались в высоколежащее состояние в две ступени излучением импульсных лазеров на красителях с перестраиваемой частотой генерации (ширина спектра $\Delta\nu \approx 1$ см⁻¹). Накачка лазеров осуществлялась одновременно азотным лазером с частотой следования импульсов 10 иц. Первый лазер переводил атомы натрия из основного состояния в $3^2P_{3/2}$ -состояние, второй лазер из $3^2P_{3/2}$ — в ридберговское состояние $13d$ (рис. 1, б). Световые пучки пересекали атомный пучок в области между электродами, объем зоны пересечения всех пучков составлял $\pi(0,5)^2 \cdot 6$ мм³. Через 20 нсек после лазерных импульсов на электроды подавался импульс напряжения прямоугольной формы. Возникающие ионы вытягивались из области ионизации через

щель в одном электроде и регистрировались вторично — электронным множителем (ВЭУ). Более подробно экспериментальная установка описана в работе [9]. Главное квантовое число ридберговского состояния выбиралось с таким расчетом, чтобы сечение возбуждения этого состояния было по возможности большим, а напряженность электрического поля, при которой выход ионов близок к единице, была легко доступной в лабораторных условиях. Этим требованиям удовлетворяет состояние $13d$.

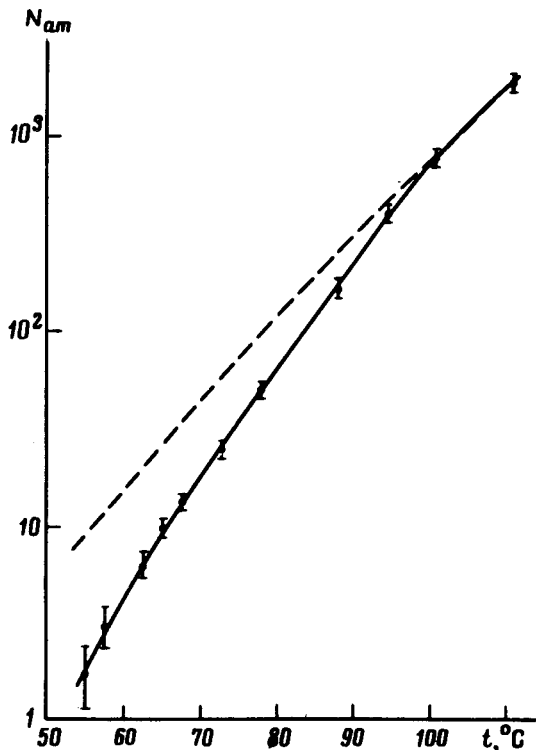


Рис. 3. Зависимость выхода ионов от температуры натриевой печи при максимальном значении плотности энергии лазерных импульсов и $E = 17 \text{ кв/см}$

3. На рис. 2, а представлена зависимость выхода ионов от напряженности импульсного электрического поля при возбуждении атомов натрия в состояние $13d$. Зависимость имеет явно выраженный пороговый характер. Резкое возрастание сигнала при переходе через критическое значение электрического поля обусловлено очень сильной зависимостью вероятности ионизации от напряженности электрического поля. Насыщение ионного сигнала возникает при ионизации в течение импульса электрического поля всех атомов, возбужденных в $13d$ -состояние. Используя эту зависимость, рабочее значение напряженности электрического поля было выбрано равным 17 кв/см .

На рис. 2, б и в приведены зависимости выхода ионов от плотности энергии импульсов лазеров первой и второй ступеней возбуждения при напряженности электрического поля 17 кв/см . Плотности энергии насыщения первого и второго переходов, определенные из этих зависимостей равняются $E_{\text{нас}}^{(1)} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/см}^2$ и $E_{\text{нас}}^{(2)} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/см}^2$, соответственно. Для первой ступени найденное значение хорошо согласуется с рассчитанным и одного порядка — для второй ступени. Детек-

тирование атомов проводилось при энергии лазерных импульсов, равной 20 мкдж. В этом случае в состоянии $13d$ возбуждается около 2/5 всех взаимодействующих с лазерным полем частиц.

На рис. 3 представлена зависимость выхода ионов от температуры натриевой печи. Здесь же приведена рассчитанная стандартным способом зависимость количества атомов в пучке, взаимодействующих с лазерным излучением, от температуры (пунктирная кривая). При температуре печи $t_n > 100^\circ\text{C}$ эти кривые параллельны. Поэтому экспериментальная зависимость нормировалась таким образом, чтобы она совпала с рассчитанной при $t_n \geq 100^\circ\text{C}$. При понижении температуры детектируемое число атомов отличается от расчетного. По-видимому, это связано с тем, что атомный пар в печи при такой температуре не является насыщенным. Минимальный сигнал был зарегистрирован при температуре печи 55°C и равнялся 3 + 5 атомам. Теоретическая зависимость дает при этой температуре максимальное значение 9 атомов в возбуждаемом объеме $V = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$. Сравнение амплитуды минимального сигнала с амплитудой темновых "одноэлектронных" импульсов ВЭУ указывает на регистрацию 1 + 2 ионов натрия, что находится в хорошем согласии с экспериментальным значением. Дополнительная нестабильность ионного сигнала, наблюдаемая при минимальных значениях температуры печи, связана с флуктуациями числа атомов Na в возбуждаемом объеме, которые при низкой плотности пучка становятся одного порядка со средним числом атомов в объеме.

4. Несмотря на то, что предложенный метод регистрации атомов является разрушающим, т. е. регистрируемый атом ионизуется и выбывает из дальнейшего взаимодействия с лазерным полем, он более универсален, чем метод лазерного флуоресцентного детектирования атомов [10], так как ридберговские состояния существуют для всех атомов. Во флуоресцентном методе для многократного переизлучения фотонов необходимо наличие перехода, близкого к двухуровневой системе, что сильно сужает класс детектируемых атомов.

Метод ионизации ридберговских атомов электрическим полем, как показано в данной работе, снижает требования к энергетике лазерного ионизирующего излучения на 3 – 5 порядков, что позволяет уже с существующими типами перестраиваемых лазеров проводить эффективное детектирование практически каждого пролетающего через лазерный луч атома для элементов большей части таблицы Менделеева.

Институт спектроскопии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
1 декабря 1977 г.

Литература

- [1] Р.В.Амбарцумян, В.П.Калинин, В.С.Летохов. Письма в ЖЭТФ, 13, 305, 1971.
- [2] Р.В.Амбарцумян, В.М.Апатин, В.С.Летохов, А.А.Макаров, В.И.Мишин, А.А.Пурецкий, Н.П.Фурзиков. ЖЭТФ, 70, 1660, 1975.

- [3] V.S. Letokhov in "Tunable Lasers and Applications" Proceedings of the Loen Conference (6 - 11 June 1976, Norway), ed. by Mooradian, T. Jaeger. P. Stokseth (Springer - Verlag, 1976), p.122.
- [4] В.С.Летохов. УФН, 118, 199, 1976.
- [5] V.S. Letokhov in "Frontiers in Laser Spectroscopy", Proceedings of Les-Houches Summer School (Session XXVII, 30 June - 26 July 1975), vol. 2, ed by R. Balian, S. Haroche, S. Liberman (North-Holland Publ. Co., 1977), p.771.
- [6] G.S. Hurst, M.H. Nayfeh, J.P. Young. Appl. Phys. Lett., 30, 229, 1977; Phys. Rev. A15, 2283, 1977.
- [7] Л.Н.Иванов, В.С.Летохов. Квантовая электроника, 2, 585, 1975.
- [8] Р.В.Амбарцумян, Г.И.Беков, В.С.Летохов, В.И.Мишин. Письма в ЖЭТФ, 21, 595, 1975.
- [9] Г.И.Беков, В.С.Летохов, В.И.Мишин. ЖЭТФ, 73, 152, 1977.
- [10] В.И.Балыкин, В.С.Летохов, В.И.Мишин, В.А.Семчишен. Письма в ЖЭТФ, 26, 492, 1977.
-