

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЫСОКОЛЕЖАЩИХ СОСТОЯНИЙ АТОМА НАТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРОВ НА КРАСИТЕЛЯХ И АВТОИОНИЗАЦИЯ ИХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Р. В. Амбарцумян, Г. И. Беков, В. С. Летохов,
В. И. Мишин*

Впервые осуществлена ионизация атомов Na электрическим полем при селективном двухступенчатом возбуждении излучением импульсных лазеров на красителях. Сечение фотоионизации атомов Na через автоионизационное состояние $15d$ в электрическом поле 12 кВ/см составляет $0,7 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$.

1. Для разделения изотопов, изомеров и для получения сверхчистых веществ представляет интерес метод селективной ионизации атомов лазерным излучением. Впервые двухступенчатая схема ионизации атомов световым полем предложена и осуществлена (атом Rb) в работе [1]. Недавно по такой же схеме были разделены изотопы урана [2]. Существенным недостатком этого метода является малость сечения фотоионизации атомов σ_i (типичное значение $\sigma_i \approx 10^{-17} \div 10^{-19} \text{ см}^2$ [3]).

Для увеличения сечения ионизации в работе [4] предложено использовать явление автоионизационного распада состояний вблизи границы ионизации атома под действием внешнего постоянного электрического поля. В настоящей работе такой способ ионизации экспериментально осуществлен на примере атома Na, возбужденного в состояния, близкие к границе ионизации, излучением двух лазеров с перестраиваемой частотой.

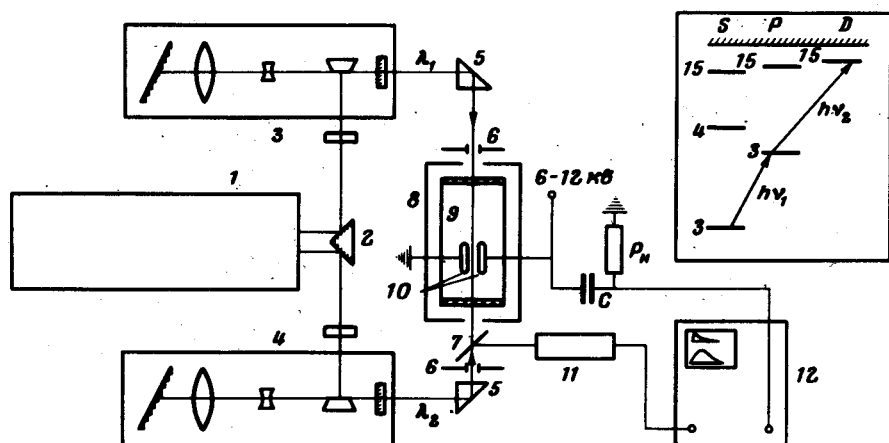


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1. — азотный лазер; 2 — делитель луча; 3, 4. — перестраиваемые лазеры на красителях; 5 — поворотные призмы; 6 — диафрагмы; 7. — делительная пластинка; 8 — нагреватель; 9 — кювета с парами натрия; 10 — электроды; 11. — ФЭУ; 12 — осциллограф

2. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Азотный лазер с поперечным разрядом (1) (частота следования импульсов 10 и , длительность импульса $\tau = 9 \text{ нсек}$) возбуждает одновременно два перестраиваемых лазера на красителях. Для резонансного возбуждения состояния $3^2P_{1/2}$ Na лазер (3) (родамин-6G) настраивался на длину волны $\lambda_1 = 5895,9 \text{ \AA}$. Ширина спектра генерации равнялась $0,3 \text{ \AA}$, мощность излучения — $0,5 \text{ кВт}$, что заведомо обеспечивало насыщение перехода $3^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{1/2}$. Длина волны лазера (4) (раствор РОРОР в толуоле + КОН) перестраивалась в диапазоне $4210 + 4140 \text{ \AA}$, что позволяло резонансно возбуждать высоколежащие S- и D-состояния Na с квантовым числом n , меняющимся от 13 до 18. Ширина спектра излучения лазера равнялась $0,1 \text{ \AA}$, энергия в импульсе $0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$. Световые лучи направлялись в кювету с парами Na и пересекались в области между электродами. Электроды (6 20 мм) располагались на расстоянии 6 мм . Температура кюветы $t = 175 \pm 3^\circ \text{ C}$. Постоянное напряжение на электродах менялось в пределах $6 + 12 \text{ кВ}$. Сигнал фотоионизации и импульс излучения λ_2 регистрировались двухлучевым осциллографом. Лазер с длиной волны λ_1 насыщал поглощение резонансного перехода Na по всей длине кюветы ($\approx 10 \text{ см}$), что визуально контролировалось по флуоресценции.

3. На рис. 2 приведена зависимость сигнала ионизации в милливольт-тах от изменения длины волны λ_2 в окрестности линии $3^2P_{1/2} \rightarrow 15^2D_{3/2}$

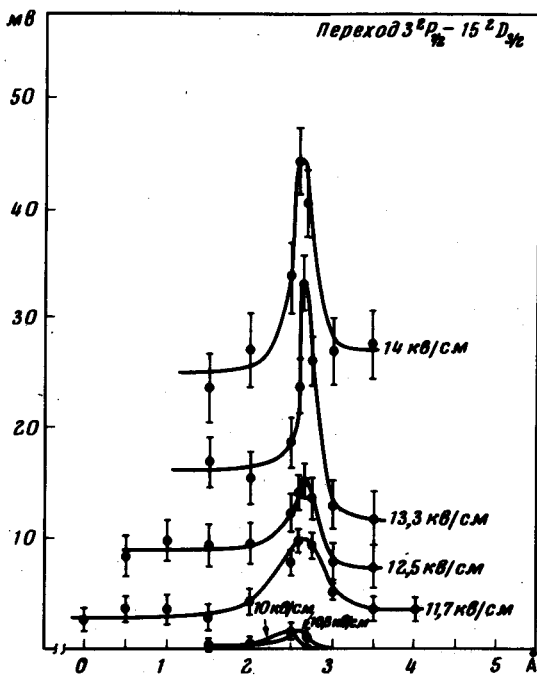


Рис. 2. Зависимость сигнала двухступенчатой ионизации от длины волны лазера второй ступени и напряженности электрического поля при возбуждении уровня $15d$ Na

при различных напряженностях электрического поля (уровень $15d$ лежит ниже границы ионизации на 488 см^{-1}). Сигнал представляет собой разность двух сигналов: резонансного сигнала, наблюдаемого при одновременном действии излучений первой и второй ступеней, и нерезонансного сигнала, возникающего при действии излучения только второй ступени. Излучение одной первой ступени фототока не вызывало. Резонансный сигнал исчезал также при расстройке длины волны λ_1 относительно точного резонанса. Из рисунка отчетливо видны резонансный характер двухступенчатой ионизации от длины волны λ_2 и зависимость сигнала ионизации от величины электрического поля. Подобного рода резонансная фотоионизация наблюдалась при возбуждении любого из S - и D -состояний Na с главным квантовым числом, меняющимся от $n = 12$ до $n = 18$. Зависимость сигнала ионизации от напряженности электрического поля при точной настройке λ_2 в резонанс приведена на рис. 3 (из сигнала ионизации вычтена нерезонансная часть). Резкое возрастание фототока при возбуждении состояния $15d$ возникает в поле $E = 12 \text{ кВ/см}$. Время жизни $15d$ -состояния $\tau_{15d} \approx 10^{-9} \text{ с}$. Поэтому заметный сигнал автоионизации должен быть в полях, при которых вероятность автоионизации $W_{\text{авт}} \approx 1/\tau_{15d}$. Теоретический расчет ([4] формула (4)) дает значение поля $E = 11 \text{ кВ/см}$ для главного квантового числа $n = 15$ (параболическое квантовое число $n_2 = 7$). Контроль всех параметров эксперимента позволяет также сравнить величину сигнала фотоионизации с расчетной. Амплитуда сигнала ионизации в эксперименте равнялась $V = Q/C$, где Q — заряд, образовавшийся в процессе ионизации, C — емкость измерительной цепи ($240 \cdot 10^{-12} \text{ ф}$). Максимальный заряд Q при $W(E) \gtrsim 1/\tau_{15d}$ определяется числом частиц, возбуждаемых в состояние $15d$. Оно равно $N_i = n_1 \sigma_2 \mathcal{E}(\lambda_2) \Delta\omega_D / \Delta\omega_L$, где n_1 — число атомов в состоянии $3^2P_{1/2}$, σ_2 — сечение возбуждения состоя-

ния $15^2D_{3/2}$ из состояния $3^2P_{1/2}$. $\mathcal{E}(\lambda_2)$ — плотность энергии лазера второй ступени, $\Delta\omega_D$ — доплеровская ширина линии, $\Delta\omega_L$ — ширина линии лазера. В эксперименте $n_1 = 3 \cdot 10^9$ (концентрация частиц 10^{11} л/см³, объем — $6 \cdot 10^{-2}$ см³), $\mathcal{E}(\lambda_2) = 3,5 \cdot 10^{12}$ фотон/см² (энергия — $5 \cdot 10^{-8}$ Дж, площадь — $3,14 \cdot 10^{-2}$ см²). Сечение σ_2 определялось при экстраполяции зависимости вероятности перехода $A_{3p \rightarrow nd}$ от n , известной до $n = 13$ [5], и равно $7,3 \cdot 10^{-15}$ см². Таким образом, для сигнала получаем значение $V = 5 \cdot 10^{-3}$ в. Сигнал ионизации, наблюдаемый при $E = 12$ кВ/см (рис. 3), равнялся $4 \cdot 10^{-3}$ в.

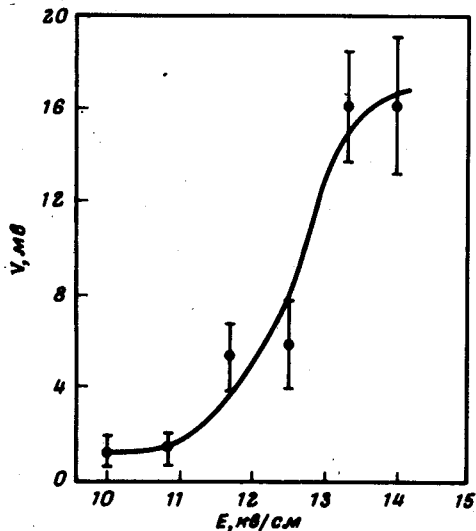


Рис. 3: Зависимость сигнала двухступенчатой ионизации от электрического поля при резонансном возбуждении состояния $15^2D_{3/2}$ Na

4. Таким образом максимальное сечение фотоионизации атома в электрическом поле определяется сечением σ_2 перехода $3p \rightarrow 15d$ (для Na $\sigma_2 = 0,7 \cdot 10^{-14}$ см²). В электрическом поле $E = 12$ кВ/см сечение фотоионизации Na возрастает в $\sigma_2/\sigma_i \cdot 10^5$ раз по сравнению с сечением нерезонансной (по второй ступени) двухступенчатой ионизации ($\sigma_i = 10^{-19}$ см² [6]). Это существенно расширяет возможности применения метода селективной фотоионизации атомов лазерным излучением.

Институт спектроскопии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 апреля 1975 г.

Литература

- [1] Р.В.Амбарцумян, В.П.Калинин, В.С.Летохов. Письма в ЖЭТФ, 13, 305, 1971.
- [2] В. Snavely. Report on VIII Intern. Quant. Electr. Conf., July, 1974, San-Francisco, USA.
- [3] И.И.Собельман. Введение в теорию атомных спектров. М., 1963.
- [4] Л.Н.Иванов, В.С.Летохов. Квантовая электроника, 2, 585, 1975.
- [5] W.L.Wiese, M.W.Smith, B.M.Miller. Atomic transition Probabilities (Sodium through calcium), NSRDS — NBS 2, 22, 1969.
- [6] У.Фано, Дж. Купер. Спектральные распределения сил осцилляторов в атомах. М., 1972.