

## ОБНАРУЖЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОДНО- И ДВУХФОТОННОГО ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАЦИИ $4s$ -СОСТОЯНИЯ НАТРИЯ

*Н.Б.Баранова, И.М.Бетеров, Б.Я.Зельдович, И.И.Рябцев, А.Н.Чудинов, А.А.Шульгинов*

*Челябинский государственный технический университет  
454000, Челябинск*

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН  
630090, Новосибирск*

Поступила в редакцию 25 февраля 1992 г.

Пучок атомов Na в  $4s$ -состоянии, энергия связи  $I = 1,97$  эВ, облучался импульсами Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера,  $\lambda_1 = 1064$  нм, и его второй гармоники,  $\lambda_2 = 532$  нм, вызывавшими двухфотонную ионизацию и однофотонную соответственно:  $\hbar\omega_1 < I < 2\hbar\omega_1$ . Зарегистрирована экспериментально осцилляционная зависимость потока электронов, вылетающих в определенном направлении, от разности фаз между  $E^2(\omega_1)$  и  $E(2\omega_1)$ , то есть интерференция, указанная в названии статьи.

1. В связи с регистрацией эффекта самоорганизующейся генерации второй гармоники (ГВГ) света в волоконных световодах из плавленного кварца<sup>1</sup> была высказана идея полярной асимметрии вылета электронов при ионизации атомов (а также ионизации молекул или дефектов в твердом теле) за счет интерференции двухфотонного поглощения лазерного излучения  $E(\omega)\exp(-i\omega t)$  и однофотонного поглощения излучения  $E(2\omega)\exp(-2i\omega t)$  его второй гармоники<sup>2,3</sup>. Эта интерференция связана с тем, что вылетевший электрон возбуждается в одно и то же состояние непрерывного спектра  $\exp(ikr)$  за счет двух процессов (рис.1). Плоская волна в непрерывном спектре возбуждается однофотонно через  $p$ -состояние, а двухфотонно - через  $s$ - и  $d$ -состояния, если исходно имелся связанный  $s$ -электрон. Суммарная волновая функция и дает полярную асимметрию вероятности вылета (рис.2). В наших работах<sup>4</sup> с катодом ФЭУ с красной границей чувствительности  $\lambda = 600$  нм была экспериментально обнаружена интерференция такого рода при освещении катода совместно распространяющимися импульсами с  $\lambda = 1064$  нм и  $\lambda = 532$  нм. К сожалению, теория, развитая в<sup>2,3</sup> для изолированных атомов, не применима к фотоэффекту из твердого тела - катода. Представляется интересным зарегистрировать полярную асимметрию вылета, возникающую за счет  $\omega/2\omega$  интерференции для атомов.

Мы выбрали атомы натрия в  $4s$ -состоянии в качестве объекта исследования по ряду причин. Среди них - наличие  $5p$ -уровня с энергией перехода  $\hbar\omega(4s - 5p) = 1,15$  эВ, почти резонансного для длины волны неодимового лазера ( $\hbar\omega_1 = 1,16$  эВ), что значительно повышает вероятность двухфотонной ионизации. Отметим, что интерференционные фазозависимые эффекты при 7- и 8-фотонной ионизации атомов криптона недавно были зарегистрированы в работе<sup>5</sup>.

2. Экспериментальная установка изображена на рис.3. В вакуумной камере  $C$  был помещен источник  $S$ , в котором пары натрия получались испарением последнего при температуре  $T = 513$  К. Вертикально направленный атомарный пучок получался при выходе паров Na через отверстие диаметром  $\approx 1$  мм. Для возбуждения Na с  $3s$ - на  $3p$ -состояние мы фокусировали с помощью линзы  $A$  излучение лазера  $L1$  на красителе родамин  $6G$  с  $\lambda = 589$  нм, накачиваемого второй гармоникой, получаемой внутри резонатора импульсного Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера  $L2$ . Дальнейший заброс с  $3p$ - на  $4s$ -уровень осуществлялся сфокусированным туда же пучком лазера  $L3$  на центрах окраски  $F_2^- : LiF$ ,

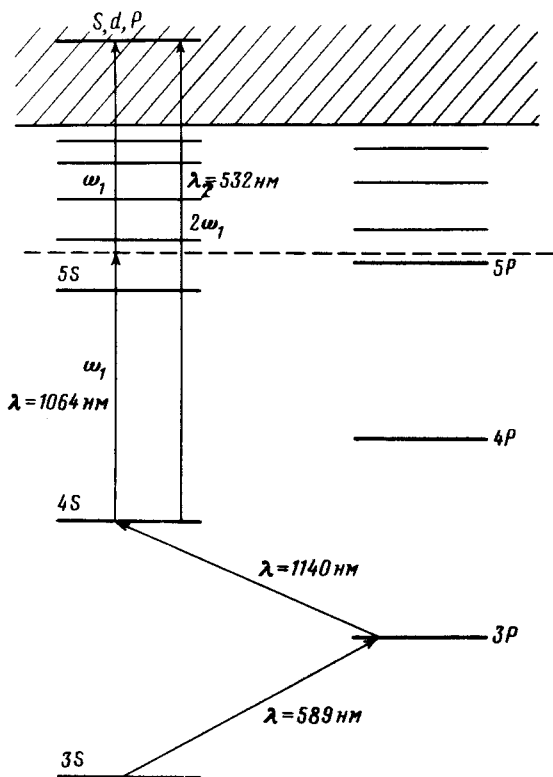


Рис.1. Схема уровней и процессов, описывающая одно- и двухфотонную ионизацию. Атом натрия в 4s-возбужденном состоянии имеет потенциал ионизации 1,97 эВ и облучается полем накачки  $E(\omega_1)$  с  $\hbar\omega_1 = 1,16$  эВ и его второй гармоникой  $E(2\omega_1)$ ,  $\hbar 2\omega_1 = 2,32$  эВ

$\lambda = 1140$  нм, накачиваемого другим  $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ -лазером  $L4$ . Оба пучка,  $\lambda = 589$  и  $\lambda = 1140$  нм, вводились в камеру через окно  $W_1$ , а с противоположной стороны через окно  $W_2$  вводилось излучение неодимового лазера  $L5$  и его второй гармоники,  $\lambda = 1064$  и  $532$  нм соответственно. ГВГ осуществлялся кристаллом  $\text{KTP}$ , на выходе из которого получался пучок  $E(2\omega_1)$  с горизонтальной линейной поляризацией и пучок  $E(\omega_1)$  с некоторой фиксированной (вообще говоря, эллиптической) поляризацией. Длительность импульсов  $E(\omega_1)$  была порядка  $10^{-7}$  с, они генерировались с частотой повторения 5 кГц и средней мощностью  $\approx 6$  Вт. Средняя мощность пучка  $E(2\omega_1)$  составляла от 0,06 до 0,2 Вт. Средняя мощность пучка с  $\lambda = 589$  нм была 0,025 Вт, пучка с  $\lambda = 1140$  нм – 0,01 Вт. Все три неодимовых лазера имели электрически синхронизован-

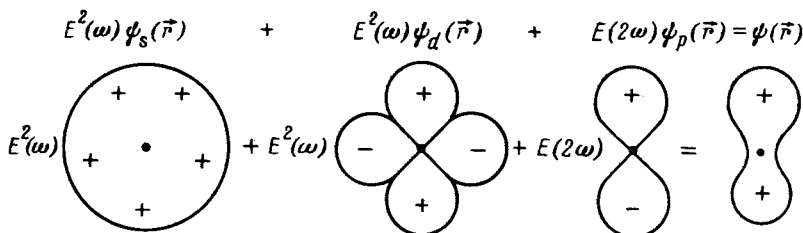


Рис.2. Иллюстрация сложения s-, p- и d-волн в непрерывном спектре в единую функцию, обладающую полярной асимметрией распределения вероятности вылета

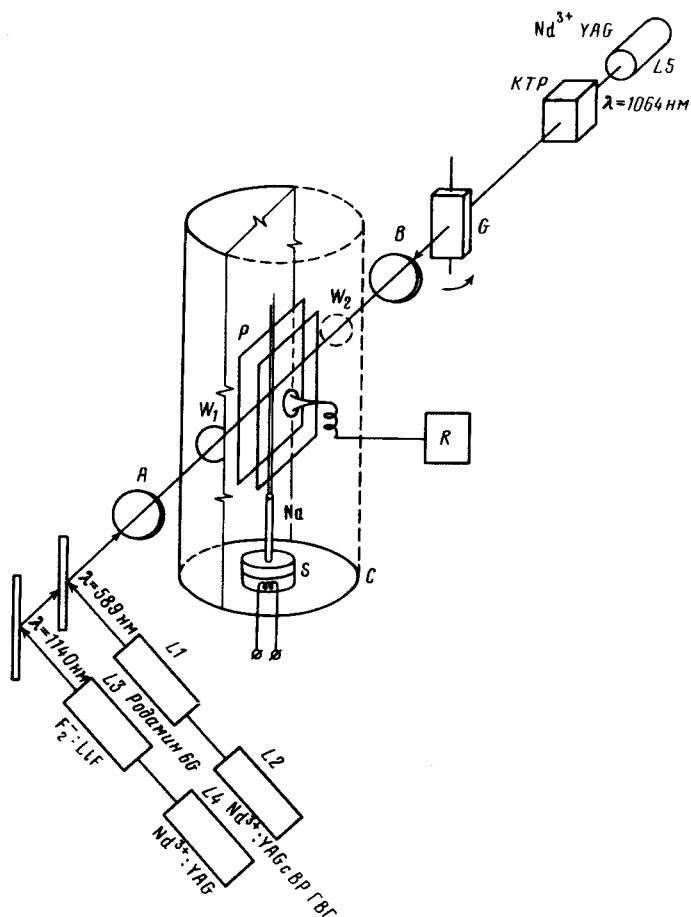


Рис.3. Схема экспериментальной установки

ный запуск и выдавали импульсы примерно одинаковой длительности. Сдвиг фазы  $\Delta\varphi$  между квадратом поля накачки  $E^2(\omega_1)$  и полем второй гармоники  $E(2\omega_1)$  осуществлялся поворотом плоскопараллельной стеклянной пластинки  $G$  толщиной 7 мм: зависимость  $\Delta\varphi$  от угла поворота  $\theta$  была прокалибрована заранее по методике работы <sup>6</sup> и для нашей пластинки давалась соотношением  $\Delta\varphi(\text{рад}) = 0,075 \cdot [\theta(\text{град})]^2$ . Оба световых пучка диаметром  $\approx 1$  мм фокусировались на атомный пучок с помощью линзы  $B$  с фокусным расстоянием 21 см. Мы осознаем трудную проблему хроматических aberrаций, вносимых линзой  $B$  и окном  $W_2$ ; однако в настоящей работе какие-либо меры по борьбе с ними не осуществлялись. Чрезвычайно большую трудность представляло сведение всех четырех пучков в одно и то же место. В частности из-за этого мы пока не провели исследований со всеми возможными поляризациями волн  $E(\omega_1)$  и  $E(2\omega_1)$ . Электроны, получаемые при ионизации, регистрировались вторичным электронным умножителем канального типа ВЭУ-6. Входное отверстие ВЭУ-6 было расположено напротив освещенной части атомного пучка в направлении поляризации  $\vec{E}(2\omega_1)$  и вмонтировано в отверстие одной из двух металлических пластин  $P$ ; расстояние между пластинами 8 мм. Сигнал с ВЭУ регистрировался самописцем  $R$ .

При приложении положительного напряжения  $U = 30$  В к пластине, скрепленной с ВЭУ, на его вход попадали, по-видимому, все образовавшиеся свободные электроны. Напротив, в отсутствие разности потенциалов ВЭУ, по-видимому, регистрировал лишь те электроны, для которых вектор скорости был направлен в сторону отверстия. Это подтверждается, в частности, следующим. При  $U = 30$  В сигнал как для двухфотонной ионизации пучком  $\vec{E}(\omega_1)$ , так и для однофотонной ионизации зеленым пучком  $\vec{E}(2\omega_1)$  практически не зависел от поляризации света. При выключении напряжения на пластине,  $U = 0$ , сигналы падали примерно в 10 раз. При этом они были максимальными в случае линейной поляризации в направлении отверстия ВЭУ и уменьшались еще в 3-4 раза после поворота поляризации на  $90^\circ$  как для  $\vec{E}(\omega_1)$ , так и для  $\vec{E}(2\omega_1)$ . Сигнал ВЭУ содержал небольшой фон ( $\leq 10\%$ ) от однофотонной ионизации  $4s$ -состояния желтым светом лазера  $L1$ ,  $\lambda = 589$  нм. За вычетом этого фона зависимости сигнала ВЭУ от  $|E(\omega_1)|^4$  и от  $|E(2\omega_1)|^2$  были линейными. Подбор режима ГВГ в кристалле КТР позволил эти два вклада в сигнал сделать величинами одного порядка; к сожалению, достичь их равенства с точностью лучше, чем в 2 раза, было затруднительно.

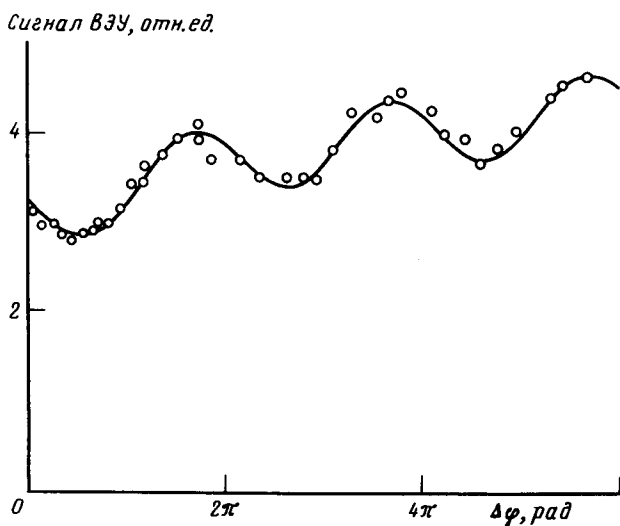


Рис.4. Экспериментальная зависимость сигнала с ВЭУ от сдвига фазы  $\Delta\varphi$  между полями  $E(2\omega_1)$  и  $E(\omega_1)$

3. Результаты измерения интерференции. На рис.4 представлена зависимость сигнала ВЭУ от сдвига фазы  $\Delta\varphi$  между  $E^2(\omega_1)$  и  $E(2\omega_1)$ , вносимого поворотом стеклянной пластинки. Контраст  $(S_{max} - S_{min}) / (S_{max} + S_{min}) \simeq 15\%$  и периодичность с периодом  $2\pi$  просматриваются абсолютно уверенно. Следует признаться, что из-за трудности совмещения пучков столь "хорошие" результаты проявились примерно в 6 случаях из 13, еще примерно в 5 случаях интерференция была видна отчетливо, но с несколько худшим контрастом, и в 2 случаях шумы не позволяли регистрировать интерференцию надежно. Монотонный наклон зависимости сигнала от  $\Delta\varphi$ , а точнее, от угла поворота пластинки  $\theta$ , по-видимому, связан с эффектами поперечного смещения пучка.

4. Заключение. Таким образом, в настоящей работе впервые, насколько нам известно, зарегистрирована экспериментально полярная асимметрия распределения вылетевших электронов, обусловленная интерференцией одно- и двухфотонной ионизации свободных атомов при освещении полем с нерав-

ным нулю средним кубом его величины,  $\langle E^3 \rangle = E_1^2(\omega)E_2^*(2\omega) + \text{к.с.}$  На наш взгляд, было бы интересно проверить предсказания для зависимости фазы интерференционного члена от поляризаций волн  $\vec{E}(\omega_1)$  и  $\vec{E}(2\omega_1)$ , основанные на квантовой теории рассеяния электронов на атомном остатке <sup>2,6</sup>.

- 
1. V. Oesterberg and W. Mozoglia, *Opt. Lett.* **11**, 516 (1986).
  2. Н.Б.Баранов, Б.Я.Зельдович, Письма в ЖЭТФ **45**, 562 (1987); Н.Б.Баранов, Б.Я.Зельдович, *J. Opt. Soc. Am. B* **8**, 27 (1991).
  3. М.В.Энтин, *Физ. Тех. Полупроводн.* **23**, 1066 (1989).
  4. Б.Я.Зельдович, А.Н.Чудинов, Письма в ЖЭТФ **50**, 405 (1989); N.B. Baranova, A.N. Chudinov, B. Ya. Zel'dovich, *Opt. Commun.* **79**, 116 (1990); Н.Б.Баранова, Б.Я.Зельдович, А.Н.Чудинов, А.А.Шульгинов, *ЖЭТФ* **98**, 1857 (1990); N.B. Baranova, A.N. Chudinov, A.A. Shulginov and B. Ya. Zel'dovich, *Opt. Lett.* **16**, 1346 (1991).
  5. H.G. Muller, P.H. Bucksbaum, D.W. Schumacher, A.J. Zavriyer. *Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **23**, 2761, (1990).
  6. A.N. Chudinov, Yu.E. Kapitzky, A.A. Shulginov, B. Ya. Zel'dovich, *Opt. Quantum. Electron.* **23**, 1055 (1991).