

Генерация гармоник высокого порядка и резонансы Фано

М. А. Хохлова^{1,2*} В. В. Стрелков^{2,3†}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской Академии Наук, теоретический отдел Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д.38³Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложена теория, описывающая генерацию гармоник, частота которых совпадает с частотой перехода между автоионизационным и основным состояниями генерирующей системы. Расчет фаз и амплитуд гармоник позволяет исследовать генерацию аттосекундных импульсов, получаемых при резонансной генерации гармоник.

PACS: 33.00.00, 32.80.Wg, 32.80.Zb, 42.65.-k, 03.65.-w

УДК: 535.14.

Ключевые слова: генерация гармоник высокого порядка, аттосекундные импульсы, автоионизационные состояния, резонансы Фано.

Генерация гармоник высокого порядка (ГГВП) при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом представляет собой уникальный источник когерентного коллимированного ультрафиолетового излучения фемто- и аттосекундной длительности. Простая, но при этом очень плодотворная трехступенчатая модель [1,2] ГГВП описывает этот процесс как результат туннельной ионизации, классического свободного движения электрона под действием лазерного излучения и рекомбинации на родительском ионе, сопровождающейся испусканием ультрафиолетового или мягкого рентгеновского излучения. Мы развили теорию ГГВП для того, чтобы описать генерацию гармоник (резонансные гармоники), частота которых совпадает (или близка) с частотой перехода между автоионизационным и основным состояниями генерирующего атома или иона. Данная теория основана на четырехступенчатой модели резонансной ГГВП [3] (см. рис. 1). Первые два шага совпадают с первыми двумя шагами из трехступенчатой модели, а вместо последнего шага (излучательная рекомбинация из континуума в основное состояние) свободный электрон захватывается родительским ионом так, что система (родительский ион + электрон) переходит в автоионизационное состояние (АИС), а затем она релаксирует в основное состояние, излучая ультрафиолет или мягкий рентген.

Чтобы описать резонансную ГГВП, к основному состоянию и состояниям «свободного» [4] континуума было добавлено квазистационарное состояние [5]. Предполагая, что (i) скорость ионизации мала, (ii) населенность АИС мала, и (iii) АИС не возмущено полем лазера, мы получили следующее выражение для спектральных комплексных ам-

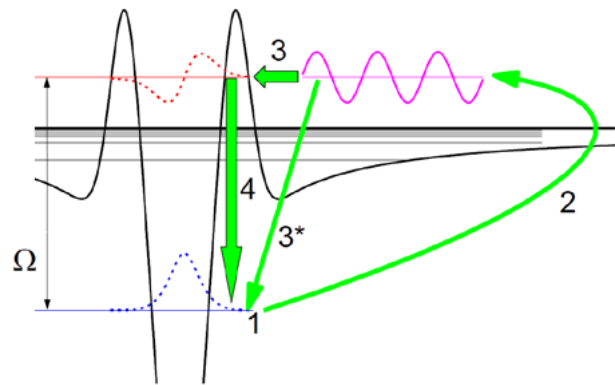


Рис. 1: Трехступенчатая модель включает ионизацию (1), свободное движение электрона в поле лазерного излучения (2) и рекомбинацию (3*); в нашей модели последний шаг заменен на безызлучательный переход в автоионизационное состояние (3) и релаксацию с испусканием ультрафиолетового или мягкого рентгеновского излучения (4). Черной кривой изображен модельный потенциал, заданный выражением (2), в котором существует основное состояние (синяя линия), связанные возбужденные состояния и одно квазистационарное возбужденное состояние (красная линия).

плитуд микроскопического отклика на частоте ω (далее используется атомная система единиц)

$$\mu(\omega) = \mu_{nr}(\omega) \left[1 + f \frac{1}{\Omega - \omega - i\Gamma/2} \right], \quad (1)$$

где $\mu_{nr}(\omega)$ — нерезонансный отклик (который может быть найден в рамках теории [4]), Ω — резонансная частота, Γ — ширина автоионизационного состояния, f — комплексный множитель, который зависит от свойств перехода между автоионизационным и основным состоянием, но не зависит от частоты ω . Легко заметить лоренц-фактор во втором слагаемом в скобках (1), обеспечивающий быстрое изменение фа-

*E-mail: MargaritkaKhokhlova@gmail.com

†E-mail: strelkov.v@gmail.com

зы в окрестности резонанса. Другими словами, интерференция первого (нерезонансного) и второго (резонансного) слагаемого в этом выражении приводит к тому, что появляется «Фано-подобный» фактор в формуле линии гармоника.

Для проверки нашей аналитической теории мы развили численный подход, основанный на решении нестационарного уравнения Шредингера (TDSE) для модельного потенциала:

$$V(r) = -\frac{Z}{\sqrt{a_0^2 + r^2}} + a_1 \exp\left[-\left(\frac{r - a_2}{a_3}\right)^2\right]. \quad (2)$$

Выбор параметров Z , a_0 , a_1 , a_2 , a_3 позволяет воспроизвести для выбранной генерирующей частицы энергию основного состояния и энергию АИС, а также время жизни АИС и силу осциллятора перехода между основным и автоионизационным состояниями. Для того чтобы найти излучаемый спектр, численно решалось 3D TDSE с аксиальной симметрией для электрона в описанном модельном потенциале под воздействием внешнего электрического поля лазерного излучения.

Результаты расчета интенсивностей гармоник хорошо согласуются количественно с результатами экспериментов для генерации высоких гармоник в плазменном факеле [6], показывающими усиление до двух

порядков, когда гармоника является резонансной. Наши численные результаты также хорошо воспроизводят существенное различие в эффективности ГГВП для различных ионов. Кроме того, численное моделирование показывает характерное поведение фазы резонансно усиленной гармоника. Сильное влияние резонанса на фазу гармоника, генерирующейся в плазме олова, было продемонстрировано экспериментально с использованием метода RABBIT [7]. Измеренные фазы гармоник хорошо согласуются с нашими численными [7] и аналитическими результатами.

Относительно высокая эффективность генерации резонансных гармоник делает их потенциально интересными для генерации аттосекундных импульсов. Использование смеси нескольких ионов, имеющих узкие резонансы на различных частотах, или использование одного широкого резонанса, ширина которого существенно превышает частоту лазерного излучения, позволяет добиться усиления группы гармоник. Из формулы (1) можно видеть, что фаза сильно изменяется в окрестности резонанса. Для одиночного широкого резонанса фаза гармоника может быть изменена резонансом таким образом, что данное изменение компенсирует аттоцирп, присущий нерезонансным гармоникам, и, тем самым, позволит получить цуг очень коротких аттосекундных импульсов.

- [1] *Corkum P. B.* Phys. Rev. Lett. **71**. P.1994. (1993)
 [2] *Schafer K. J. et al.* Phys. Rev. Lett. **70**. P.1599. (1993).
 [3] *Strelkov V. V.* Phys. Rev. Lett. **104**. P.123901. (2010).
 [4] *Lewenstein M. et al.* Phys. Rev. A. **49**. P.2117. (1994).
 [5] *Strelkov V. V.* Phys. Rev. A. **89**. P.053833. (2014).

- [6] *Ganeev R. A.* Journal of Modern Optics. **59**. P.409. (2012).
 [7] *Haessler S. et al.* New Journal of Physics. **15**. P.013051. (2013).

High-order harmonic generation and Fano resonances

M. A. Khokhlova^{1,2,a}, **V. V. Strelkov**^{2,3,b}

¹*Department of atomic physics, plasma physics and microelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Theoretical department, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow 119191, Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia*

E-mail: ^aMargaritkaKhokhlova@gmail.com, ^bstrelkov.v@gmail.com

We suggest the theory describing generation of a harmonic resonant with the transition from ground to autoionizing state of the generating particle. Calculating both harmonic amplitudes and phases, we study the attopulse generation using these harmonics.

PACS: 33.00.00, 32.80.Wr, 32.80.Zb, 42.65.-k, 03.65.-w

Keywords: high-order harmonic generation, attosecond pulses, autoionizing states, Fano resonances.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Хохлова Маргарита Александровна — аспирант; e-mail: MargaritkaKhokhlova@gmail.com.
2. Стрелков Василий Вячеславович — докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; тел.: (499) 135-02-47, e-mail: strelkov.v@gmail.com.