

УДК 537.5

В. А. Астапенко, А. В. Яковец, Е. Ю. Ионичев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Поглощение ультракоротких лазерных импульсов на атоме водорода

В работе теоретически исследуется поглощение ультракороткого лазерного импульса (УКИ) атомом водорода, находящемся в основном состоянии. Рассчитывается полная вероятность фотопоглощения за все время действия УКИ с учетом возбуждения атомного электрона как в дискретном, так и в непрерывном энергетическом спектре. Рассматриваются два типа УКИ: с несущей частотой и без несущей частоты. Анализируется зависимость вероятности поглощения от длительности УКИ и его несущей частоты.

Ключевые слова: ультракороткий импульс, атом водорода, фотопоглощение.

V. A. Astapenko, A. V. Yakovets, E. Y. Ionichev

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Absorption of ultrashort laser pulses by hydrogen atom

The absorption of ultrashort electromagnetic pulses on hydrogen atom in the ground state is studied theoretically. The total probability of photoabsorption is calculated for all time to the action of ultrashort pulse with allowance for excitation of an atomic electron, both in discrete and continuous energy spectrum. Two types of ultrashort pulses are considered: with carrier frequency and without it. The dependence of the probability of absorption of ultrashort pulse duration and carrier frequency is analyzed.

Key words: ultrashort pulse, hydrogen atom, photoabsorption.

1. Введение

Взаимодействие излучения с атомом водорода исследовалось экспериментально и теоретически, начиная с середины XIX века. Экспериментальный линейчатый спектр атома водорода явился фундаментом для построения «старой» квантовой теории этого атома, созданной Нильсом Бором в 1913 г. Как известно, в рамках последовательной квантовой механики все однофотонные процессы на атоме водорода могут быть описаны аналитически. С развитием технологии генерации ультракоротких электромагнитных импульсов, длительность которых может быть сравнима с характерным атомным временем (24 аттосекунды), встал вопрос о корректном описании взаимодействия таких импульсов с веществом. Действительно, как показано в работе [1], в случае УКИ необходимо обобщение прежних методов теории для учета специфики ультрабыстрых электромагнитных взаимодействий. Естественно, что важнейшим объектом для применения нового подхода является атом водорода, для которого существуют простые аналитические формулы, описывающие сечения фотовозбуждения в дискретном и непрерывном спектре.

Фотоионизация атома водорода под действием УКИ исследовалась ранее в ряде работ [2] – [5]. Были, в частности, получены простые аппроксимационные формулы, описывающие вероятность процесса за все время действия импульса как функцию параметров задачи: длительности УКИ и его несущей частоты (при наличии последней).

Данная статья посвящена теоретическому анализу поглощения ультракоротких лазерных импульсов двух типов (с несущей частотой и без несущей частоты) атомом водорода с одновременным учетом возбуждения связанного электрона как в дискретном, так и в непрерывном энергетическом спектре.

2. Основные формулы

Итак, рассмотрим поглощение УКИ атомом водорода, находящимся в основном состоянии. Общая формула для вероятности поглощения УКИ квантовой системой за все время действия импульса имеет вид [1] (всюду используем атомную систему единиц: $e = \hbar = m_e = 1$):

$$W = \frac{c}{4\pi^2} \int_0^\infty \sigma_{tot}(\omega') \frac{|E(\omega')|^2}{\omega'} d\omega', \quad (1)$$

где c — скорость света, $E(\omega')$ — фурье-образ напряженности электрического поля в импульсе, $\sigma_{tot}(\omega')$ — полное сечение фотопоглощения, которое равно

$$\sigma_{tot}(\omega') = \sigma_d(\omega') + \sigma_c(\omega'), \quad (2)$$

где

$$\sigma_d(\omega') = \frac{2\pi^2}{c} \sum_{n=2}^\infty f_n G_n(\omega') \quad (3)$$

— сечение поглощения в дискретном спектре, f_n — сила осциллятора и $G_n(\omega')$ — форма линии перехода связанного электрона из основного состояния в n -состояние (тонким расщеплением пренебрегаем). В рассматриваемом случае, когда ширина спектральной линии много меньше собственной частоты перехода ω_n , имеем приближенное равенство

$$G_n(\omega') \cong \delta(\omega' - \omega_n). \quad (4)$$

В случае атома водорода справедливы следующие формулы для собственной частоты:

$$\omega_n = \frac{n^2 - 1}{2n^2} \quad (5)$$

и силы осциллятора [6]:

$$f_n = n^5 \frac{2^8 (n-1)^{(2n-4)}}{3(n+1)^{(2n+4)}}. \quad (6)$$

Сечение фотоионизации атома водорода из основного состояния (второе слагаемое в формуле (3)) имеет вид [6]

$$\sigma_c(\omega') = \frac{2^5 \pi^2}{3c\omega'^4} \frac{\exp\{-4a \tan \sqrt{2\omega' - 1}/\sqrt{2\omega' - 1}\}}{1 - \exp(2\pi/\sqrt{2\omega' - 1})} \theta(2\omega' - 1), \quad (7)$$

где $\theta(w)$ — ступенчатая тета-функция Хэвисайда, которая в данном случае описывает наличие пороговой частоты фотоионизации атома водорода: $\omega_{th} = 1/2$ а.е. (13.6 эВ).

Рассмотрим поглощение атомом водорода двух типов УКИ: скорректированного гауссовского импульса (СГИ) с несущей частотой и синус-вейвлет импульса (СВИ) без несущей частоты.

Фурье-образ напряженности электрического поля в СГИ равен [3]

$$E_{CGP}(\omega', \omega, \tau, \varphi) = i E_0 \tau \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega'^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \left\{ e^{-i\varphi - (\omega - \omega')^2 \tau^2 / 2} - e^{i\varphi - (\omega + \omega')^2 \tau^2 / 2} \right\}, \quad (8)$$

где E_0 , ω , τ — амплитуда, несущая частота и длительность импульса, φ — начальная фаза.

Аналогичное выражение для СВИ имеет вид [2]

$$E_{SWP}(\omega') = 2i \sqrt[4]{\pi} E_0 \omega' \tau^2 \exp\left(-\omega'^2 \tau^2 / 2\right). \quad (9)$$

3. Результаты

Результаты расчетов вероятности поглощения УКИ на атоме водорода по вышеприведенным формулам представлены на рис. 1–3 для амплитуды напряженности электрического поля в импульсе $E_0 = 10^{-2}$ а.е.

На рис. 1 изображена зависимость вероятности возбуждения от несущей частоты СГИ для различных длительностей импульса: $\tau = 40, 20$ а.е. Кроме того, на этом же рисунке представлена вероятность фотоионизации.

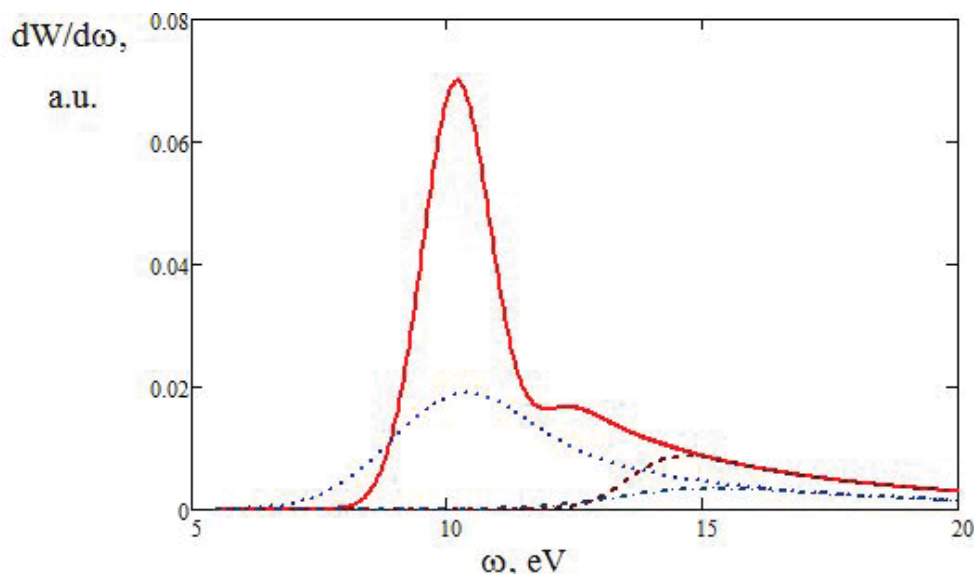


Рис. 1. Спектральная вероятность поглощения СГИ для различных длительностей импульса: сплошная и штриховая кривые $\tau = 40$ а.е. (0.96 фс), пунктир и штрихпунктир — $\tau = 20$ а.е. (0.48 фс). Штриховая кривая и штрихпунктир отвечают фотоионизации атома водорода

Видно, что спектр фотопоглощения для более длинного импульса помимо максимума, приходящегося на собственную частоту перехода $1s - 2p$, содержит также «плечо», отвечающее возбуждению перехода $1s - 3p$ с меньшей силой осциллятора. С уменьшением длительности СГИ до 20 а.е. (0.48 фс) плечо в спектре поглощения исчезает, остается один максимум. Кривые, описывающие вероятность фотоионизации, сливаются с полной вероятностью фотопоглощения для $\omega \geq 15$ эВ. Характерно, что вероятность фотоионизации отлична от нуля и для несущих частот ниже пороговой, что объясняется большой шириной спектра УКИ.

На рис. 2 представлена зависимость вероятности поглощения СГИ от длительности импульса для различных несущих частот. Первая из этих частот равна собственной частоте перехода $1s - 2p$, вторая отвечает возбуждению в дискретном спектре, третья соответствует собственной частоте перехода $1s - 3p$ и, наконец, четвертая несущая частота равна пороговой частоте фотоионизации атома водорода.

Сплошная кривая квадратично возрастает с ростом длительности СГИ в области $\tau \geq 40$ а.е. (~ 1 фс.). Вероятность возбуждения на несущей частоте, равной пороговой, линейно возрастает по мере увеличения длительности импульса для $\tau \geq 20$ а.е. Причем обе зависимости носят монотонный характер. В противоположность этому вероятность $W(\tau)$ имеет максимум для несущей частоты $\omega = 0.4$ а.е., попадающей в область дискретного спектра, но не совпадающей с собственной частотой перехода. В случае равенства несущей частоты собственной частоте перехода вероятность поглощения возрастает монотонно с ростом длительности УКИ. Для случая $\omega = 0.444$ а.е. (переход $1s - 3p$) соответствующая зависимость имеет «плечо» в диапазоне длительностей $40 \text{ а.е.} \geq \tau \geq 20 \text{ а.е.}$ и существенно меньше по амплитуде по сравнению с несущей частотой $\omega = 0.375$ а.е. (переход $1s - 2p$).

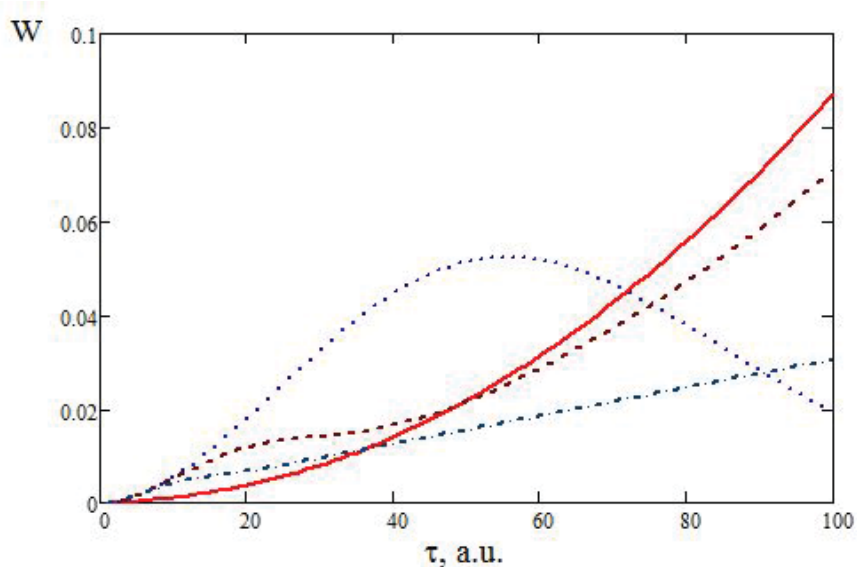


Рис. 2. Зависимость вероятности поглощения СГИ атомом водорода от длительности импульса при различных несущих частотах: сплошная кривая — $\omega = 0.375$ а.е. (уменьшено в 5 раз), пунктир — $\omega = 0.4$ а.е., штриховая кривая — $\omega = 0.444$ а.е., штрихпунктир — $\omega = 0.5$ а.е.

На рис. 3 представлена зависимость вероятности поглощения атомом водорода синус-вейвлет импульса (9) от длительности импульса. На этом же рисунке показаны вклады в вероятность поглощения от возбуждения в дискретном спектре и фотоионизации.

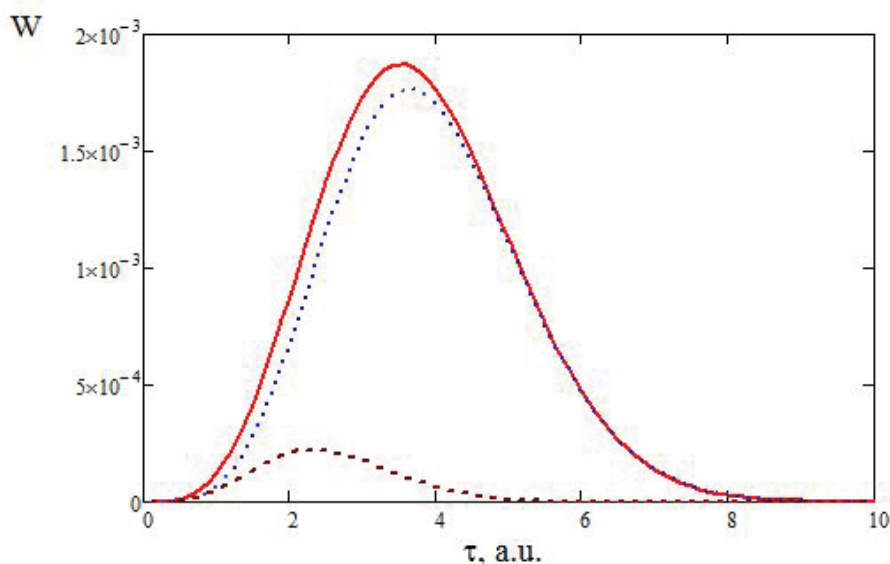


Рис. 3. Зависимость вероятности поглощения синус-вейвлет импульса атомом водорода от длительности импульса: сплошная кривая — полная вероятность, пунктир — поглощение в дискретном спектре, штриховая кривая — фотоионизация

Видно, что определяющий вклад вносит возбуждение в дискретном спектре. Напомним, что данный импульс не имеет несущей частоты, а максимум его спектра определяется длительностью: $\omega_{\max} = 1/\tau$. В результате максимум вероятности возбуждения существенно сдвинут в область меньших длительностей по сравнению со случаем СГИ и амплитуда его существенно меньше.

4. Заключение

В работе исследованы особенности поглощения ультракоротких лазерных импульсов атомом водорода с учетом возбуждения связанного электрона как в дискретном, так и в непрерывном спектре. Рассчитана полная вероятность поглощения как функция длительности импульса и несущей частоты (для СГИ). Показано, что характер зависимости $W(\tau)$ существенно зависит от несущей частоты СГИ, в то время как для СВИ соответствующая кривая имеет колоколообразную форму.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и образования РФ (задание № 3.9890.2017/БЧ).

Литература

1. *Astapenko V.A.* Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field // *Physics Letters A*. 2010. V. 374. P. 1585–1590.
2. *Gets A.V. and Krainov V. P.* Ionization of Atoms by Attosecond Pulses // *Contrib. Plasma Phys.* 2013. V. 53. P. 140–147.
3. *Astapenko, V.A., Svita, S.Y.* Photoionization of noble-gas atoms by ultrashort electromagnetic pulses // *JETF*. 2014. V. 146. P. 927–932.
4. *Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* On the Theory of Hydrogen Atom Ionization by Ultra-Short Electromagnetic Pulses // *Contrib. Plasma Phys.* 2013. V. 55. P. 522–528.
5. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* Generalized scaling laws for ionization of atomic states by ultra-short electromagnetic pulses // *J. Phys. B*. 2016. V. 49. 025602.
6. *Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Квантовая электродинамика. Теоретическая физика. Т. 4. М.: Наука, 1989. 723 с.

References

1. *Astapenko V.A.* Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field. *Physics Letters A*. 2010. V. 374. P. 1585–1590.
2. *Gets A.V. and Krainov V. P.* Ionization of Atoms by Attosecond Pulses. *Contrib. Plasma Phys.* 2013. V. 53. P. 140–147.
3. *Astapenko, V.A., Svita, S.Y.* Photoionization of noble-gas atoms by ultrashort electromagnetic pulses. *JETF*. 2014. V. 146. P. 927–932.
4. *Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* On the Theory of Hydrogen Atom Ionization by Ultra-Short Electromagnetic Pulses. *Contrib. Plasma Phys.* 2013. V. 55. P. 522–528.
5. *Rosmej F.B., Astapenko V.A., Lisitsa V.S.* Generalized scaling laws for ionization of atomic states by ultra-short electromagnetic pulses. *J. Phys. B*. 2016. V. 49. 025602.
6. *Berestetskiy V.B., Lifshitz E.M., Pitaevskii L.P.* Quantum electrodynamics. *Theoretical physics*. V. 4. M.: Nauka, 1989. 723 p.

Поступила в редакцию 04.02.2017