

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМА ВОДОРОДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА

Дербов В.Л.¹, Серов В.В.¹, Тепер Н.И.²

¹Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,

²Саратовский государственный социально-экономический университет

Аннотация

Мы представляем результаты численного моделирования динамики заселенностей в атоме водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера. Исследуется возможность формирования волновых пакетов, включающих состояния с высокими значениями орбитального и магнитного квантовых чисел, под действием лазерного поля, вследствие многократных переходов между состояниями дискретного и непрерывного спектра. Ионизационные потери учитываются на основе реалистичной модели континуума. Показана частичная локализация электронной плотности по радиальной и угловой переменным. На основе прямого решения уравнения Шредингера рассчитываются спектральные характеристики излучения атома во время лазерного возбуждения для оценки ридберговских волновых пакетов в качестве источников генерации в терагерцевом диапазоне.

Ключевые слова: ридберговские состояния, волновой пакет, численное моделирование, ультракороткий лазерный импульс, титан-сапфировый лазер.

Введение

Ридберговские состояния вследствие большой удаленности от атомного ядра, высоких значений главного квантового числа являются классическим пределом атома. Ридберговские атомы имеют макроскопические размеры, макроскопическое время жизни и экстремально слабую связь электрона в атоме, по причине близости энергетических уровней возбужденного электрона к континууму, отличаются высокой чувствительностью к воздействию внешних электромагнитных полей. Волновые пакеты, включающие ридберговские состояния, характеризуются чертами одновременно и квантовых, и классических объектов: им может быть свойственна локализация в пространстве, эволюция вдоль классической кеплеровской траектории.

Особые свойства таких состояний определяют их применение для изучения принципа соответствия классического предела атома, установления связей между орбитами классически хаотических систем и движением квантового волнового пакета, для решения задач управления поведением ридберговского электрона [1], сжатия электромагнитного поля в резонаторе [2]. В последнее время ридберговские атомы исследуются в качестве источников и детекторов излучения в терагерцевом диапазоне [3-4], имеющем важное значение для биофизики и материаловедения.

Были предложены различные способы теоретического описания ридберговских волновых пакетов [5] и методы их экспериментального получения, основанные на взаимодействии атома с различными комбинациями специально подобранных внешних полей [6-11].

Один из способов получения ридберговских волновых пакетов подразумевает действие на атом водорода короткого лазерного импульса высокой интенсивности [8-11]. Данный метод интересен тем,

что открывает возможность формирования локализованных волновых пакетов, ограничиваясь только лазерным возбуждением, в отличие от других сложных технологий. Особую актуальность такая методика приобретает в настоящее время в связи с созданием сверхмощных лазерных систем [12] с параметрами, подходящими по интенсивности для решения исследуемой проблемы.

В данной работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия импульса титан-сапфирового лазера с атомом водорода. Исследуется возможность формирования локализованного волнового пакета под действием лазера. С учетом сверхмалой длительности импульса и высокой интенсивности лазерного поля были рассмотрены как переходы на дискретные уровни, включая состояния с высокими значениями квантовых чисел, так и переходы в состояния непрерывного спектра.

Особенностью рассматриваемой задачи является то, что несущая частота титан-сапфирового лазера существенно отличается от частот переходов между состояниями дискретного и непрерывного спектра. Мы имеем дело со сверхсильным, сверхкоротким и сильно нерезонансным воздействием на атом, что вызывает необходимость прямого непертурбативного решения уравнения Шредингера и практически исключает интерпретацию результатов в терминах переходов с поглощением/испусканием определенного числа фотонов.

На основе полученного решения уравнений для амплитуд заселенностей исследуются спектральные характеристики излучения атома и возможность генерации в терагерцевом диапазоне под действием импульса титан-сапфирового лазера. Для решения этой задачи рассматривается временная эволюция среднего значения дипольного момента и рассчитывается его спектр Фурье.

Модель взаимодействия атома водорода с лазерным импульсом

Для исследования динамики заселенностей в атоме численно решается уравнение Шредингера для амплитуд заселенностей в базе стационарных состояний атома водорода дискретного и непрерывного спектра. Для ограничения числа уравнений непрерывный спектр задается в дискретном представлении [11] с использованием набора состояний, заданных через равные значения волнового числа k . Всего учитывалось двадцать состояний непрерывного спектра с энергиями от 0 до 0,3 в атомных единицах.

Ранее другими авторами [12] было показано, что дипольное приближение действует для переходов между уровнями со значениями главных квантовых чисел до 20. Поэтому исследование динамики заселенностей под действием лазерного поля выполнялось для дискретных уровней со значениями главного квантового числа $n = 1 \div 20$. Лазерное поле предполагается циркулярно-поляризованным, поэтому в используемую модель включены только переходы, соответствующие правилам отбора $\Delta l = 1, \Delta m = 1$, где l и m – орбитальное и магнитное квантовые числа. Предполагается, что перед действием импульса атом находится в основном состоянии. Волновая функция такой системы может быть представлена в виде суперпозиции собственных состояний дискретного и непрерывного спектра атома водорода [11]:

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \sum_n \sum_{l=m} C_{nl}(t) R_{nl} Y_{l,m=l} + \sum_k \sum_{l=m} C_{kl}(t) R_{kl} Y_{l,m=l} W_k, \quad (1)$$

где $C_{nl}(t)$ и $C_{kl}(t)$ – амплитуды заселенностей дискретных уровней и состояний непрерывного спектра; R_{nl}, R_{kl} – радиальные функции состояний дискретного и непрерывного спектра; $Y_{l,m}$ – сферическая функция; $w_k = k^2 \Delta k$ – весовой множитель.

Первая сумма в выражении (1) представляет стационарные состояния, вторая – состояния непрерывного спектра. Для учета необратимого характера ионизации в уравнения для амплитуд заселенностей вводилась феноменологическая ширина уровня для состояний непрерывного спектра:

$$\Gamma_k = \Delta E_k \alpha, \quad (2)$$

где $\Delta E_k = E_{k+1} - E_k$, E_k – энергия состояния для данного k ; α – константа. Нами выполнялось исследование для $\alpha = 1$.

Возможность формирования волновых пакетов, включающих состояния с высокими значениями орбитального и магнитного квантовых чисел, возникает в процессе многократных переходов между состояниями континуума и дискретными уровнями [13]. Для описания подобных эффектов требуется включение в рассмотрение состояний с различными

значениями l и m и учет всех возможных переходов между ними, в том числе так называемых «горизонтальных» переходов между подуровнями с одинаковым главным квантовым числом n , но различными орбитальными и магнитными квантовыми числами. С этой целью рассматривались состояния дискретного и непрерывного спектра с l и m до 10. Учитывались все возможные переходы между ними. Система уравнений для амплитуд заселенностей в этом случае может быть представлена в виде (3)

$$\begin{aligned} \frac{dC_{nl}(t)}{dt} &= i \sum_k \sum_{l'=l\pm 1} d_{nl}^{kl\pm 1} \exp\left[\pm i\left(-\frac{1}{n^2} - E_k\right)t\right] \times \\ &\times E(t) \cdot C_{kl\pm 1}(t) w_k + \\ &+ i \sum_{n'} \sum_{l'=l\pm 1} d_{nl}^{n'l\pm 1} \exp\left[i\left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right)t\right] E(t) \cdot C_{n'l\pm 1}(t), \\ \frac{dC_{kl}(t)}{dt} &= -\frac{\Gamma_k}{2} C_{kl}(t) + \\ &+ i \sum_n \sum_{l'=l\pm 1} d_{kl}^{nl\pm 1} \exp\left[\pm i\left(-\frac{1}{n^2} - E_k\right)t\right] E(t) \cdot C_{nl\pm 1}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $d_{nl}^{kl\pm 1}, d_{nl}^{n'l\pm 1}, d_{kl}^{nl\pm 1}$ – дипольные матричные элементы переходов; $E(t)$ – напряженность внешнего электрического поля. Огибающая импульса задается гауссовой формой $E(t) = E_0 \cdot \exp[-(2(t-t_0)/T)^2] \sin(\omega t)$, T – продолжительность импульса, E_0 – амплитуда импульса, ω – его частота, t_0 – соответствует центру импульса. Для моделирования использовались параметры импульса существующей мультитераваттной лазерной системы [14].

Такой подход позволяет удовлетворительно описать динамику заселенностей в системе. Необходимо отметить, что в выражении (3) при $n' = n$ подразумеваются переходы между подуровнями с одинаковым значением главного квантового числа.

Предполагается, что атом в начальный момент времени находится в основном состоянии. Поэтому начальные условия к системе уравнений для амплитуд заселенностей (3) могут быть представлены в виде: $C_{10}(0) = 1$, для $n = 1, l = 0$; $C_{nl}(0) = 0$, для состояний дискретного спектра с $n = 2 \div 20$; $C_{kl}(0) = 0$ для всех состояний непрерывного спектра.

Уравнения (3) решались численно, на основе метода Рунге-Кутты четвертого порядка с использованием программного пакета Mathematica 6.0.3.

Результаты численного моделирования

Исследования динамики заселенностей в системе показали, что под действием импульса с амплитудой 4,59·10⁸ В/см, длиной волны 780 нм и продолжительностью 48 фс [14] наблюдается практически полное опустошение основного состояния (1,8%). Основная часть заселенности ($\approx 72\%$) теряется в результате ионизации. Оставшаяся часть распределяется между дискретными уровнями с различными значениями главного, орбитального и магнитного

квантовых чисел. Распределение заселенностей дискретных уровней по l и m представлено на рис. 1, а по n – на рис. 2. Поскольку несущая частота импульса принадлежит ближней инфракрасной области и намного меньше частот переходов из основного состояния в возбужденные, естественно, заселяются низколежащие возбужденные уровни, однако заметную заселенность приобретают и уровни с n от 10 до 16.

Снижение величин заселенностей при l и m , равных 7 и 9, заметное на рис. 2, является следствием переходов между дискретными уровнями и состояниями непрерывного спектра. В этом случае преимущественно заселяются состояния непрерывного спектра с нечетными значениями орбитального и магнитного квантовых чисел, а обратные переходы заселяют дискретные уровни с четными l и m .

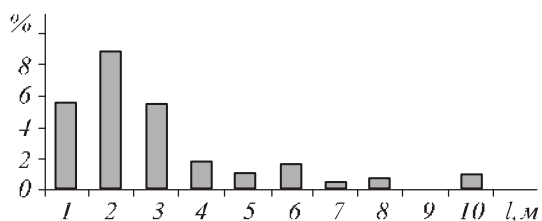


Рис. 1. Распределение заселенностей в процентах по l и m в атоме водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера продолжительностью 48 фс, с длиной волны 780 нм и амплитудой $4,59 \cdot 10^8$ В/см

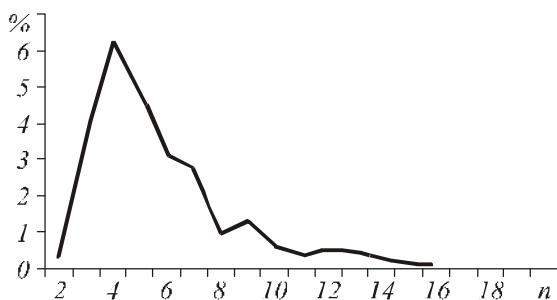


Рис. 2. Распределение заселенностей в процентах по n в атоме водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера продолжительностью 48 фс, с длиной волны 780 нм и амплитудой $4,59 \cdot 10^8$ В/см

Распределение плотности вероятности волнового пакета, сформированного в результате действия импульса, представлено на рис. 3. Полученное состояние, как видно из рисунка, характеризуется частичной локализацией как по угловой, так и по радиальной переменной. Такая форма пакета также объясняется значительным вкладом в суперпозицию низколежащих уровней.

Изучение спектральных характеристик излучения атома

Ранее во введении говорилось, что ридберговские атомы рассматриваются как источники и детекторы излучения в терагерцевом диапазоне, находящего применение в материаловедении и биофизике. Волновые пакеты, включающие ридберговские состояния, также могут представлять интерес в этом

смысле. В ходе проведенного анализа выяснилось, что под действием лазерного импульса близкие к терагерцевому диапазону переходы между возбужденными уровнями, также как и «горизонтальные» переходы, вносят значительный вклад в динамику заселенностей.

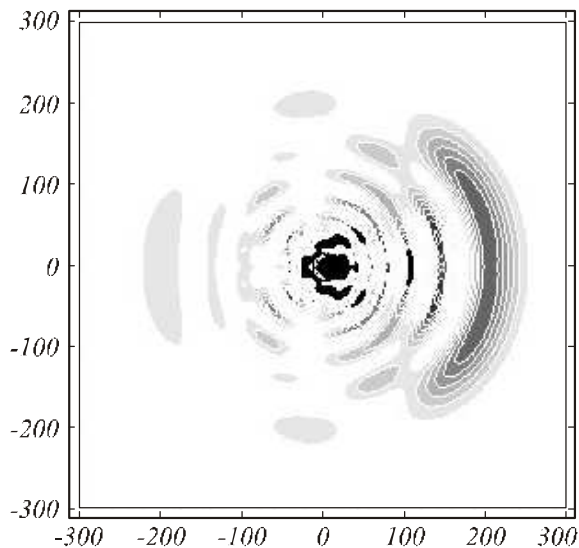


Рис. 3. Распределение плотности вероятности в атоме водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера продолжительностью 48 фс, с длиной волны 780 нм и амплитудой $4,59 \cdot 10^8$ В/см

Классическое спектральное разложение интенсивности дипольного излучения имеет вид

$$I_{\omega} = \frac{d\mathcal{E}_{\omega}}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{4\omega^4}{3c^3} |d_{\omega}|^2, \tag{4}$$

где $d\mathcal{E}_{\omega}$ – количество энергии, излученной в единицу времени в интервале частот $d\omega/2\pi$; T – продолжительность импульса;

$d_{\omega} = \frac{1}{T} \int_0^T d(t) e^{-i\omega t} dt$ – Фурье-компонента дипольного момента.

В качестве излучающего дипольного момента рассмотрим квантовое среднее $d(t) = \langle \Psi(\mathbf{r}, t) | \mathbf{d} | \Psi(\mathbf{s}, t) \rangle$ оператора \mathbf{d} дипольного момента атома, где $\Psi(\mathbf{r}, t)$ – волновая функция системы, определяемая выражением (1).

Исследование проводилось для импульса титан-сапфирового лазера продолжительностью 48 фс, с центральной длиной волны 780 нм и амплитудой $4,59 \cdot 10^8$ В/см. Средние значения дипольного момента системы были получены численным интегрированием для 200 равноотстоящих моментов времени. В разложение волновой функции (1) включались собственные состояния дискретного и непрерывного спектра, умноженные на соответствующие амплитуды вероятности, полученные в результате численного решения уравнений (3). При интегрировании не учитывались состояния дискретного и непрерывного спектра, число атомов в которых составляло

менее 0,0025% первоначального. При этом исключалось большое число состояний непрерывного спектра, так как их заселенность быстро терялась вследствие заданной в используемой модели диссипации. Временная эволюция среднего значения дипольного момента в атомных единицах представлена на рис. 4.

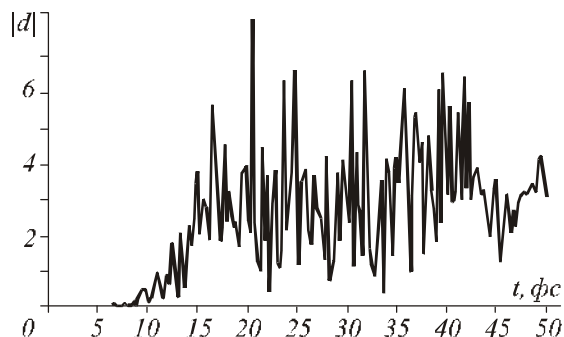


Рис. 4. Динамика среднего значения дипольного момента (в атомных единицах) под действием импульса титан-сапфирового лазера продолжительностью 48 фс, с длиной волны 780 нм и амплитудой $4,59 \cdot 10^8$ В/см

По рассчитанной временной последовательности средних значений дипольного момента был найден его Фурье-образ d_ω (рис. 5), зависимость которого от частоты ω свидетельствует о том, что основная часть испущенных квантов приходится на низкочастотное излучение, в том числе в терагерцевом диапазоне.

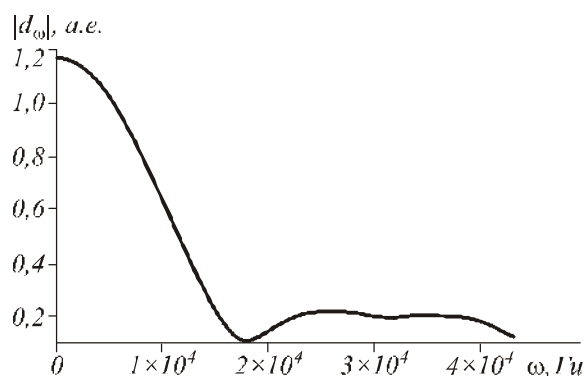


Рис. 5. Фурье-спектр дипольного момента атома водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера продолжительностью 48 фс, с длиной волны 780 нм и амплитудой $4,59 \cdot 10^8$ В/см

Заключение

В результате действия импульса титан-сапфирового лазера при реальных значениях продолжительности, амплитуды и частоты импульса может быть сформирован волновой пакет, включающий состояния с различными значениями главного, орбитального и магнитного квантовых чисел. Основная часть заселенности при этом теряется вследствие ионизации, заметно заселяются также низколежащие уровни. Тем не менее титан-сапфировый лазер может применяться для формирования волновых пакетов, характеризующихся частичной локализацией

как по угловой, так и по радиальной переменной и включающих одновременно с ридберговскими низколежащими состояниями атома. Повысить значения квантовых чисел во всех степенях свободы возможно с помощью цуга сверхкоротких импульсов [15-16]. Последующие импульсы обеспечивают рост как главного квантового числа, так и орбитального и магнитного квантовых чисел. Снизить ионизационные потери позволяет применение еще более коротких импульсов с частотой в оптическом диапазоне [15-16]. Спектральный анализ индуцированного импульсом среднего дипольного момента атома, меняющегося во времени, указывает на наличие широких полюсов, в том числе в низкочастотной области спектра.

Литература

1. **Shapiro, E.A.** Non-circular Trojan-like wavepackets: quantum theory and application to quantum control / E.A. Shapiro, M. Kalinski, J.H. Eberly // *J. Phys. B.* – 2000. – Vol. 33. – P. 3079-3091.
2. **Kochański, P.** Squeezing of electromagnetic field in a cavity by electrons in Trojan states / P. Kochański, Z. Bialynicka-Birula, I. Bialynicki-Birula // *Phys. Rev. A.* – 2001. – Vol. 63. – P. 013811.
3. **Schafer, K.J.** Tunable terahertz radiation from Stark wave packets / K.J. Schafer, J.L. Krause // *Optics Express.* – 1997. – Vol. 1, № 7. – P. 210-215.
4. **Schafer, K.J.** Control of THz Emission from Stark Wave Packets / K.J. Schafer, J.L. Krause // *J. Phys. Chem. A.* – 1999. – Vol. 103. – P. 10118-10125.
5. **Gaeta, Z.D.** Classical and quantum-mechanical dynamics of quasiclassical state of the hydrogen atom / Z.D. Gaeta, C.R. Stroud // *Phys. Rev. A.* – 1990. – Vol. 42, N 11. – P. 6308-6313.
6. **Gaeta, Z.D.** Excitation of the classical-limit state of an atom / Z.D. Gaeta, M.W. Noel, C.R. Stroud // *Phys. Rev. Lett.* – 1994. – Vol. 73, N 5. – P. 636-639.
7. **Bromage, J.** Excitation of a Three-Dimensionally Localized Atomic Electron Wave Packet / J. Bromage, C.R. Stroud // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 83, N 24. – P. 4963-4966.
8. **Alber, G.** Generation and detection of Rydberg wave packets by short laser pulses / G. Alber, H. Ritsch, P. Zoller // *Phys. Rev. A.* – 1986. – Vol. 34, N 2. – P. 1058-1064.
9. **Parker, J.** Coherence and Decay of Rydberg Wave Packets / J. Parker, C.R. Strong // *Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 56, N 7. – P. 716-719.
10. **Wolde, A.** Observation of Radially Localized Atomic Electron Wave Packets / A. Wolde, L.D. Noordam, A. Lagendijk, H.B. van Linden van den Heuvell // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 61, N 18. – P. 2099-2101.
11. **Nilsen, H.M.** Generation of an angular and radial Rydberg wave packet in a single laser pulse / H.M. Nilsen, J.P. Hansen // *Phys. Rev. A.* – 2000. – Vol. 63. – P. 011405.
12. **Madsen, L.B.** Procedures for the evaluation of atomic transition matrix elements in the interaction with laser light / L.B. Madsen, J.P. Hansen, H.M. Nilsen // *Comput. Phys. Commun.* – 1999. – Vol. 120. – P. 231-237.
13. **Тепер, Н.И.** Динамика заселенностей в атоме водорода под действием ультракороткого импульса лазерного излучения / Н.И. Тепер, В.Л. Дербов // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика.* – 2008. – Т. 16, № 1. – С. 115-123.

14. **Wang, H.** Generation of 10-W average-power, 40-TW peak-power, 24-fs pulses from a Ti:sapphire amplifier system / H. Wang, S. Backus, Z. Chang, R. Wagner, K. Kim, X. Wang, D. Umstadter, T. Lei, M. Murnane, H. Kapteyn // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1999. – Vol. 16, N 10. – P. 1790-1794.
15. **Derbov, V.L.** Forming of Rydberg wave packet under the action of the pulse of Ti:sapphire laser / V.L. Derbov, N.I. Teper // *Proceeding of SPIE.* – 2009. – Vol. 7501. – P. 75010I.
16. **Дербов, В.Л.** Формирование локализованных волновых пакетов в атоме водорода под действием ультракоротких лазерных импульсов. / В.Л. Дербов, Н.И. Тепер // *Проблемы оптической физики и биофотоники: Материалы 13-ой Международной Молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике.* – Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2009. – С. 121-125.

References

1. **Shapiro, E.A.** Non-circular Trojan-like wavepackets: quantum theory and application to quantum control / E.A. Shapiro, M. Kalinski, J.H. Eberly // *J. Phys. B.* – 2000. – Vol. 33. – P. 3079-3091.
2. **Kochański, P.** Squeezing of electromagnetic field in a cavity by electrons in Trojan states / P. Kochański, Z. Bialynicka-Birula, I. Bialynicki-Birula // *Phys. Rev. A.* – 2001. – Vol. 63. – P. 013811.
3. **Schafer, K.J.** Tunable terahertz radiation from Stark wave packets / K.J. Schafer, J.L. Krause // *Optics Express.* – 1997. – Vol. 1, N 7. – P. 210-215.
4. **Schafer, K.J.** Control of THz Emission from Stark Wave Packets / K.J. Schafer, J.L. Krause // *J. Phys. Chem. A.* – 1999. – Vol. 103. – P. 10118-10125.
5. **Gaeta, Z.D.** Classical and quantum-mechanical dynamics of quasiclassical state of the hydrogen atom / Z.D. Gaeta, C.R. Stroud // *Phys. Rev. A.* – 1990. – Vol. 42, N 11. – P. 6308-6313.
6. **Gaeta, Z.D.** Excitation of the classical-limit state of an atom / Z.D. Gaeta, M.W. Noel, C.R. Stroud // *Phys. Rev. Lett.* – 1994. – Vol. 73, N 5. – P. 636-639.
7. **Bromage, J.** Excitation of a Three-Dimensionally Localized Atomic Electron Wave Packet / J. Bromage, C.R. Stroud // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 83, N 24. – P. 4963-4966.
8. **Alber, G.** Generation and detection of Rydberg wave packets by short laser pulses / G. Alber, H. Ritsch, P. Zoller // *Phys. Rev. A.* – 1986. – Vol. 34, N 2. – P. 1058-1064.
9. **Parker, J.** Coherence and Decay of Rydberg Wave Packets / J. Parker, C.R. Strong // *Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 56, N 7. – P. 716-719.
10. **Wolde, A.** Observation of Radially Localized Atomic Electron Wave Packets / A. Wolde, L.D. Noordam, A. Lagendijk, H.B. van Linden van den Heuvell // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 61, N 18. – P. 2099-2101.
11. **Nilsen, H.M.** Generation of an angular and radial Rydberg wave packet in a single laser pulse / H.M. Nilsen, J.P. Hansen // *Phys. Rev. A.* – 2000. – Vol. 63. – P. 011405.
12. **Madsen, L.B.** Procedures for the evaluation of atomic transition matrix elements in the interaction with laser light / L.B. Madsen, J.P. Hansen, H.M. Nilsen // *Comput. Phys. Commun.* – 1999. – Vol. 120. – P. 231-237.
13. **Teper, N.I.** Population dynamics in a hydrogen atom under the action of ultra-short pulse of laser radiation / N.I. Teper, V.L. Derbov // *Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* – 2008. – Vol. 16, N 1. – P. 115-123. – (in Russian).
14. **Wang, H.** Generation of 10-W average-power, 40-TW peak-power, 24-fs pulses from a Ti:sapphire amplifier system / H. Wang, S. Backus, Z. Chang, R. Wagner, K. Kim, X. Wang, D. Umstadter, T. Lei, M. Murnane, H. Kapteyn // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1999. – Vol. 16, N 10. – P. 1790-1794.
15. **Derbov, V.L.** Forming of Rydberg wave packet under the action of the pulse of Ti:sapphire laser / V.L. Derbov, N.I. Teper // *Proceeding of SPIE.* – 2009. – Vol. 7501. – P. 75010I.
16. **Derbov, V.L.** Forming of localized wave packets in a hydrogen atom under the action of ultra-short laser pulses / V.L. Derbov, N.I. Teper // *Optical Physics and Biophotonics: Proceedings of 13th Annual International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophotonics.* – Saratov: Novyi Veter Press, 2009. – P. 121-125. – (in Russian).

INVESTIGATION OF HYDROGEN ATOM RADIATION UNDER THE ACTION OF TI:SAPPHIRE LASER

V.L. Derbov¹, V.V. Serov¹, N.I. Teper²

¹Saratov State University,

²Saratov State Socio-Economic University

Abstract

We present the results of numerical modelling of population dynamics in a hydrogen atom under the action of Ti:sapphire laser pulse. The possibility of formation of wave packets, including the states with high values of orbital and magnetic quantum numbers, via multiple transitions between the states of discrete and continuous spectrum under the action of the laser field is investigated. Ionization losses are taken into account by using a realistic model of the continuum. Partial localization of electron density in radial and angular variables is demonstrated. On the basis of direct solution of Schrödinger equation spectral characteristics of atom radiation during laser excitation for estimation of Rydberg wave packet as source of generation in a terahertz range.

Key words: Rydberg states, wave packet, numerical simulation, ultra-short laser pulse, Ti:sapphire laser.

Сведения об авторах



Дербов Владимир Леонардович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры теоретической физики Саратовского государственного национального исследовательского университета, e-mail: *derbovvl@gmail.com*. Область научных интересов: нелинейная оптика, лазерная спектроскопия, квантовая механика малочастичных систем, экзотические атомные системы, взаимодействие атомов и молекул с сильными электромагнитными полями.

Derbov Vladimir Leonardovich, Doctor of physical and mathematical sciences, research professor, professor of department of theoretical physics of Saratov State National Research University, e-mail: *derbovvl@gmail.com*. Research interests are nonlinear optics, laser spectroscopy, quantum mechanics of few-particle systems, exotic atom systems, interaction of

atoms and molecules with strong electromagnetic fields.



Серов Владислав Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики Саратовского государственного национального исследовательского университета, e-mail: *vladislav_serov@mail.ru*. Область научных интересов: нерелятивистская квантовая механика, теория рассеяния, вычислительная физика, численные методы. Работа В.В.Серова была поддержана грантом Президента РФ МК-2344.2010.2

Vladislav Viktorovich Serov, Candidate of physical and mathematical sciences, docent of department of theoretical physics of Saratov State National Research University, e-mail: *vladislav_serov@mail.ru*. Research interests are non-relativistic quantum mechanics, scattering theory, computational physics, numerical methods. The work of V.V. Serov was supported by

grant of President of Russian Federation МК-2344.2010.2.



Тепер Наталья Игоревна, старший преподаватель кафедры информационных систем в экономике Саратовского государственного социально-экономического университета. Окончила в 1997 г. Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского по специальности «Физика». Область научных интересов: взаимодействие водородоподобных атомов с интенсивными ультракороткими лазерными импульсами, ридберговские состояния атомов, локализованные волновые пакеты. E-mail: *teper@rambler.ru*.

Natalia Igorevna Teper, lecture of Department of informational systems in economics of Saratov State Socio-Economic University, graduated from Saratov State University in 1997, majoring in physics. Research interests are interaction of hydrogen-like atoms with intense ultra-short laser pulses, Rydberg states of atoms, localized wave packets. E-mail: *teper@rambler.ru*.

Поступила в редакцию 1 марта 2010 г.