

Атомная мера электрической площади униполярного светового импульса

Р. М. Архипов⁺¹⁾, М. В. Архипов⁺¹⁾, А. В. Пахомов⁺¹⁾, Н. Н. Розанов^{*1)}

⁺ Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 С.-Петербург, Россия

^{*} Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 27 июня 2021 г.

После переработки 28 июня 2021 г.

Принята к публикации 29 июня 2021 г.

В работе для характеристики воздействия униполярных импульсов на квантовую систему вводится новое понятие “атомная мера электрической площади”. Величина равна отношению постоянной Планка к характерному размеру квантовой системы и электрическому заряду квантовой частицы. Она универсальна и может быть использована для оценки степени эффективности действия униполярных и квазиуниполярных импульсов на различные квантовые системы.

DOI: 10.31857/S1234567821150039

Введение. Импульсы аттосекундной длительности позволяют изучать сверхбыстрые процессы в квантовых системах. Это предоставляет исследователям уникальные возможности для изучения сверхбыстрой динамики волновых пакетов в атомах, молекулах и твердых телах [1–6]. В настоящее время аттосекундные импульсы содержат несколько циклов колебаний. На их протяжении компоненты вектора напряженности поля несколько раз меняют знак. Электрическая площадь таких импульсов, определяемая как интеграл от напряженности электрического поля по времени $S_E = \int \mathbf{E}(t) dt$ [7–9], близка к 0. Сократить длительность импульса, содержащего один цикл колебаний, можно, если “обрезать” одну из полувольт поля. В таком случае импульсы становятся униполярными (см., например, обзор [9], работы [10–14], и цитируемую литературу).

Для униполярных импульсов одной из важнейших характеристик является электрическая площадь импульса S_E . Как показывают результаты многочисленных недавних теоретических исследований [13–25], воздействие таких импульсов на микрообъекты определяется именно электрической площадью импульса, а не его энергией.

Это происходит тогда, когда длительность импульса меньше характерного времени осцилляций волновых пакетов вещества, взаимодействующего с излучением. Таким образом, взаимодействие имеет выраженный нерезонансный характер.

В данной работе показано, что существует простой критерий оценки эффективности нерезонансного воздействия униполярного импульса на широкий класс квантовых систем. Для этого вводится величина “атомной меры электрической площади”, которая задает величину электрической площади униполярного импульса, необходимую для опустошения основного состояния квантовой системы.

Масштабы электрической площади униполярных импульсов, эффективно воздействующих на простейшие квантовые системы. Как показывают результаты теоретических [18, 19] и экспериментальных [3] исследований, основной вклад во взаимодействие вносит мощная униполярная компонента импульса, а влиянием отрицательного фронта можно пренебречь, если его амплитуда слабее униполярной части импульса, а длительность больше. Поэтому основной вклад во взаимодействие внесет только униполярная полувольт поля.

В случае водородоподобного атома в работе [15] было получено выражение для заселенности основного состояния после действия импульса. Она определяется электрической площадью импульса:

$$w_0 = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{S_E}{S_0}\right)^2\right]^4}. \quad (1)$$

В выражение (1) входит величина, которая в публикации [17] была в виде $S_0 = \frac{2mq}{\hbar}$. Здесь m – масса электрона, q – заряд электрона, \hbar – приведенная по-

¹⁾ e-mail: arkhipovrostislav@gmail.com; m.arkhipov@spbu.ru; antpakhom@gmail.com; nnrosanov@mail.ru

стоянная Планка. Ее можно переписать в следующем виде:

$$S_0 = \frac{2\hbar}{a_0 q} = 8.78 \cdot 10^{-10} \text{ эрг} \cdot \text{с} / \text{см} \cdot \text{ед. СГСЭ}. \quad (2)$$

В (2) входит только два параметра. Постоянная Планка и a_0 – радиус первой боровской орбиты атома водорода ($a_0 = 0.5 \cdot 10^{-8}$ см), т.е. характерный размер невозбужденного атома водорода.

Параметру S_0 можно дать название “атомная мера” электрической площади. Она соответствует электрической площади импульса, который способен перевести систему из основного состояния в возбужденные. Отметим, что выражение (1) было получено в приближении внезапных возмущений Мигдала [26] и справедливо, когда длительность импульса много меньше периода оборота электрона по первой Боровской орбите в атоме водорода. Населенность w_0 имеет сильную степенную зависимость от электрической площади. Атом практически не возбуждается, если $S_E \ll S_0$. Вероятность водородоподобного атома не возбуждаться не зависит от полярности импульса, т.е. от знака электрической площади импульса.

Отметим, что в нелинейной оптике критерием сильного поля является значение напряженности электрического поля, которое создает протон на расстоянии, равном первой боровской орбите в атоме водорода $E_{\text{ат}} \sim 10^9$ В/см. В случае же униполярных импульсов их воздействие имеет однонаправленный и не резонансный характер. Они способны оказывать более быстрое и эффективное воздействие на заряды по сравнению с многоцикловыми импульсами [3, 13–25]. Воздействие определяет электрическая площадь, а не энергия импульса. Мерой такого воздействия является величина S_0 .

Рассматриваемая величина S_0 имеет прозрачный физический смысл масштаба эффективного воздействия. Из (1) видно, что если электрическая площадь импульса в два раза меньше “атомной меры”, то основной уровень опустошается более, чем наполовину. При их равенстве остается менее 0.1, а при двойном значении “атомной меры площади” основное состояние заселено на 0.0016.

Обсуждаемое выражение имеет и следующую интерпретацию, допускающую обобщение на более широкий класс квантовых систем. В системе с размером $\sim a$ квантовомеханический импульс, в силу соотношения неопределенности Гейзенберга, порядка \hbar/a [27]. С другой стороны, электрическая площадь импульса совпадает с изменением под его действием среднего квантовомеханического значения импульса, отнесенного к единичному электрическому заряду

системы [28]. Тем самым, атомная мера электрической площади импульса отвечает вызванному им изменению импульса квантовой системы, равному характерному квантовомеханическому импульсу “свободной” системы.

Покажем теперь, что приведенные результаты действительно обобщаются на случай и других простых квантовых систем. Это гармонический осциллятор, частица в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками и жесткий ротатор.

Выражение, которое описывает заселенность основного состояния квантового гармонического осциллятора, имеет вид [16]:

$$w_{0\text{HO}} = e^{-\frac{S_E^2}{S_{0\text{HO}}^2}}. \quad (3)$$

Здесь характерная мера площади для гармонического осциллятора

$$S_{0\text{HO}} = \frac{\sqrt{2\hbar\omega_0 m}}{q}. \quad (4)$$

Выражение (4) можно переписать в виде, аналогичном (1), если ввести амплитуду отклонения осциллятора из основного состояния x_0 и учесть, что в этой точке вся энергия осциллятора равна $\hbar\omega_0/2 = kx_0^2/2$, k – коэффициент упругости, который в свою очередь равен $k = m\omega_0^2$. С учетом того, что $\sqrt{\omega_0} = \sqrt{\hbar/m} \cdot 1/x_0$, и введя удвоенную амплитуду $X = 2x_0$, выражение (4) принимает вид

$$S_{0\text{HO}} = \frac{2\sqrt{2}\hbar}{qX}. \quad (5)$$

В случае потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками в приближении внезапных возмущений можно также получить выражение для населенности основного состояния после окончания действия импульса. Оно также определяется электрической площадью импульса и имеет вид:

$$w_{0\text{QW}} = \left| \frac{\sin \tilde{S}}{\tilde{S}} + \sin \tilde{S} \frac{\tilde{S}}{\pi^2 - \tilde{S}^2} \right|^2, \quad (6)$$

где $\tilde{S} \equiv \frac{S_E}{S_{0\text{QW}}}$, а

$$S_{0\text{QW}} \equiv \frac{2\hbar}{ql} \quad (7)$$

– характерная “мера площади” для электрона в потенциальной яме ширины l .

Для жесткого ротатора известно выражение для изменения заселенности основного состояния под

действием короткого импульса с ненулевой электрической площадью [22]. Можно также ввести соответствующий масштаб.

$$S_{0\text{QR}} = \frac{\hbar}{\mu}.$$

Здесь μ – постоянный дипольный момент ротатора, который можно записать в виде $\mu = qR_0$. Здесь R_0 – “размер” ротатора. Тогда

$$S_{0\text{QR}} = \frac{\hbar}{qR_0}. \quad (8)$$

Вновь видно, что “мера электрической площади” обратно пропорциональна размеру системы.

Заключение. Выражения для “меры площадей” водородоподобной системы, гармонического осциллятора, жесткого ротатора и частицы в потенциальном ящике по физическому смыслу одинаковы. Для любой из рассмотренных квантовых систем мера электрической площади импульса обратно пропорциональна характерному размеру системы.

Можно считать, что эта величина, как и боровский радиус и величина атомной напряженности поля, играющие роль масштаба атомных размеров и полей, имеет смысл масштаба действия предельно коротких униполярных импульсов на квантовые системы.

Полученные соотношения просты и крайне удобны для оценок параметров излучения, необходимого для возбуждения электронов в атомах, водородоподобных образованиях (экситонов) в твердых телах, возбуждения колебаний и вращения молекул. Также они применимы для оценки возможности возбуждения электронов в наночастицах, когда их движение хорошо аппроксимируется потенциалом типа “ящика” с высокими стенками.

Еще раз отметим, что воздействие на квантовую систему оказывает импульс, передаваемый полем заряду. Поэтому эффективность воздействия зависит от электрической площади импульса, а не его энергии. Например, импульс имеет прямоугольную форму и напряженность поля равна E_0 и длительность Δt . Такую же энергию будет иметь прямоугольный импульс с длительностью $\Delta t/2$ и напряженностью поля $\sqrt{2}E_0$. Однако его электрическая площадь будет меньше в $\sqrt{2}$ раз, и он создаст меньшие изменения в квантовой системе.

Уместно отметить, что в случае когерентного воздействия многоциклового импульса на квантовую систему в рамках двухуровневого приближения изменение заселенностей происходит в зависимости от площади огибающей импульса, а не его энергии [29].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда # 21-72-10028.

1. F. Krausz and M. Ivanov, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 163 (2009).
2. F. Calegari, G. Sansone, S. Stagira, C. Vozzi, and M. Nisoli, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **49**, 062001 (2016).
3. M. T. Hassan, T. T. Luu, A. Moulet, O. Raskazovskaya, P. Zhokhov, M. Garg, N. Karpowicz, A. M. Zheltikov, V. Pervak, F. Krausz, and E. Goulielmakis, *Nature* **530**, 66 (2016).
4. G. M. Rossi, R. E. Mainz, Y. Yang, F. Scheiba, M. A. Silva-Toledo, S. H. Chia, P. D. Keathley, S. Fang, O. D. Mücke, C. Manzoni, G. Cerullo, G. Cirmi, and F. X. Kärtner, *Nat. Photonics* **14**, 629 (2020).
5. J. Biegert, F. Calegari, N. Dudovich, F. Quéré, and M. Vrakking, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **54**, 070201 (2021).
6. Y. Shou, R. Hu, Z. Gong, J. Yu, J. Chen, G. Mourou, X. Yan, and W. Ma, *New J. Phys.* **23**, 053003 (2021).
7. Н. Н. Розанов, *Оптика и спектроскопия* **107**(5), 761 (2009) [N. N. Rosanov, *Optics and Spectroscopy* **107**(5), 721 (2009)].
8. Н. Н. Розанов, Р. М. Архипов, М. В. Архипов, *УФН* **188**, 1347 (2018) [N. N. Rosanov, R. M. Arkhipov, and M. V. Arkhipov, *Phys. Usp.* **61**, 1227 (2018)].
9. Р. М. Архипов, М. В. Архипов, Н. Н. Розанов, *Квантовая электроника* **50**, 801 (2020) [R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, and N. N. Rosanov, *Quantum Electronics* **50**, 801 (2020)].
10. H.-C. Wu and J. Meyer-ter-Vehn, *Nat. Photonics* **6**, 304 (2012).
11. J. Xu, B. Shen, X. Zhang, Y. Shi, L. Ji, L. Zhang, T. Xu, W. Wang, X. Zhao, and Z. Xu, *Sci. Rep.* **8**, 2669 (2018).
12. D. You and P. H. Bucksbaum, *JOSA B* **14**, 1651 (1997).
13. R. R. Jones, D. You, and P. H. Bucksbaum, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1236 (1993).
14. S. Pisharody, J. Murray, H. Wen, and P. Bucksbaum, *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2004*, **1**, 376 (2004).
15. Н. Н. Розанов, *Оптика и спектроскопия* **124**, 75 (2018) [N. N. Rosanov, *Optics and Spectroscopy* **124**, 72 (2018)].
16. R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, I. Babushkin, A. Demircan, U. Morgner, and N. N. Rosanov, *Opt. Lett.* **44**, 1202 (2019).
17. Р. М. Архипов, М. В. Архипов, А. А. Шимко, А. В. Пахомов, Н. Н. Розанов, *Письма в ЖЭТФ* **110**, 9 (2019) [R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, A. A. Shimko, A. V. Pakhomov, and N. N. Rosanov, *JETP Lett.* **110**, 15 (2019)].

18. Р. М. Архипов, М. В. Архипов, А. В. Пахомов, Н. Н. Розанов, *Оптика и спектроскопия* **128**, 106 (2020) [R. M. Arkhipov, M. V. Arkhipov, A. V. Pakhomov, and N. N. Rosanov, *Optics and Spectroscopy* **128**, 102 (2020)].
19. R. Arkhipov, A. Pakhomov, M. Arkhipov, A. Demircan, U. Morgner, and N. Rosanov, *Opt. Express* **28**, 17020 (2020).
20. R. Arkhipov, A. Pakhomov, M. Arkhipov, I. Babushkin, A. Demircan, U. Morgner, and N. Rosanov, *Sci. Rep.* **11**, 1961 (2021).
21. Р. М. Архипов, *Письма в ЖЭТФ* **113**, 656 (2021) [R. M. Arkhipov, *JETP Lett.* **113**, 611 (2021)].
22. R. Arkhipov, A. Pakhomov, M. Arkhipov, I. Babushkin, and N. Rosanov, *Laser Phys. Lett.* **17**, 105301 (2020).
23. Н. Н. Розанов, Н. В. Высотина, *ЖЭТФ* **157**, 63 (2020) [N. N. Rosanov and N. V. Vysotina, *JETP* **130**, 52 (2020)].
24. Н. Н. Розанов, *Письма в ЖЭТФ* **113**, 157 (2021) [N. N. Rosanov, *JETP Lett.* **113**, 145 (2021)].
25. I. A. Aleksandrov, D. A. Tumakov, A. Kudlis, V. M. Shabaev, and N. N. Rosanov, *Phys. Rev. A* **102**, 0231020 (2020).
26. А. Б. Мигдал, *ЖЭТФ* **9**, 1163 (1939).
27. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Квантовая механика. Нерелятивистская теория*, Наука, М. (1989), 768 с. [L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Quantum mechanics: non-relativistic theory*, Pergamon Press, Oxford (1977)].
28. Н. Н. Розанов, *Оптика и спектроскопия* **125**, 818 (2018) [N. N. Rosanov, *Optics and Spectroscopy* **125**, 1012 (2018)].
29. Л. Аллен, Дж. Эберли, *Оптический резонанс и двух-уровневые атомы*, Мир, М. (1978) [L. Allen and J. H. Eberly, *Optical resonance and two-level atoms*, Wiley, N.Y. (1975)].