

УДК 539.1

В. А. Астапенко, Е. В. Сахно

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Взаимодействие ультракороткого импульса гауссовой формы с осциллятором Морзе

Статья посвящена численному анализу особенностей возбуждения классического осциллятора Морзе под действием электрических импульсов гауссовой формы. Исследована спектральная и временная зависимости поглощенной энергии осциллятором Морзе. Проведено сравнение со случаем гармонического осциллятора.

Ключевые слова: ультракороткий импульс, импульс гауссовой формы, гармонический осциллятор, осциллятор Морзе.

V. A. Astapenko, E. V. Sakhno

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Interaction of an ultrashort pulse of Gaussian form with the Morse oscillator

The article is devoted to the numerical analysis of excitation features of the classical Morse oscillator under the action of electrical pulses of Gaussian form. The spectral and time dependences of the absorbed energy by the Morse oscillator are investigated. Comparison is made with a harmonic oscillator case.

Key words: ultrashort pulse, Gaussian pulse, harmonic oscillator, Morse oscillator.

1. Введение

Исследование ультракоротких импульсов – развивающаяся область в лазерной физике и квантовой электронике. Использование лазеров ультракоротких импульсов позволяет проводить измерения предельно коротких промежутков времени. Такое преимущество данных лазеров может быть использовано для более точного исследования быстропротекающих процессов (в частности, в химических реакциях) [1–6].

Под ультракоротким импульсом (УКИ) в данной работе будем понимать импульс, длительность τ которого примерно равна его периоду на несущей частоте ω , т.е. для которых выполняется соотношение

$$\frac{\omega\tau}{2\pi} \sim 1. \quad (1)$$

Гармонический осциллятор является хорошей моделью для описания колебательного движения атомов в молекуле при малых энергиях возбуждения [7]. Однако для описания колебаний атомов при более высоких энергиях используют модель ангармонического осциллятора – например, осциллятора Морзе, который, в частности, описывает возможность диссоциации молекулы [7]. Стоит заметить, что осциллятор Морзе представляет особый интерес, так как данная модель достаточно хорошо описывает колебания атомов в двухатомных молекулах.

Взаимодействие УКИ с гармоническим осциллятором рассматривалось в работе [8]. В данном исследовании проанализирован фазовый контроль осциллятора под воздействием ультракороткого лазерного импульса, а также получено аналитическое выражение для фазового коэффициента модуляции гармонического осциллятора. В работе также проанализированы основные свойства фазового контроля осциллятора Морзе, как в линейном, так и нелинейном режимах.

Исследование взаимодействия классического осциллятора Морзе и электромагнитного ультракороткого импульса с линейным частотным chirпом рассматривается в работе [9]. В данной работе получены формулы для амплитуды и средней по периоду мощности излучения как функции энергии возбуждения для свободных колебаний осциллятора Морзе. Выведены аналитические выражения для описания движения осциллятора после окончания импульса. Получен численный анализ особенностей возбуждения осциллятора Морзе для произвольных параметров.

Данная статья посвящена исследованию взаимодействия осциллятора Морзе с электрическим импульсом гауссовой формы. Общий вид данного импульса как функции времени имеет вид

$$f(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2\tau^2}\right) \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где τ – длительность импульса, ω – несущая частота импульса, φ – начальная фаза [11].

Потенциальная энергия осциллятора Морзе дается выражением

$$U(x) = D(\exp(-2kx) - 2\exp(-kx)), \quad (3)$$

где D – энергия связи, k – параметр потенциала, x – координата отклонения осциллятора от положения равновесия.

Параметр потенциала k определяется по формуле

$$k = \omega_0 \sqrt{\frac{m}{2D}}, \quad (4)$$

где ω_0 – собственная частота осциллятора, m – масса осциллятора.

2. Движение осциллятора Морзе в поле электрического импульса

Уравнение движения гармонического осциллятора при воздействии на него электрического импульса имеет следующий вид:

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 x - \delta \dot{x} + \gamma f(t), \quad (5)$$

где x – координата отклонения осциллятора от положения равновесия, ω_0 – его собственная частота, δ – коэффициент затухания, γ – коэффициент связи электрического поля $E(t)$ с осциллятором, точка обозначает производную по времени.

Коэффициент связи электрического поля $E(t)$ с осциллятором γ определяется по формуле

$$\gamma = \frac{qE_0}{m}, \quad (6)$$

где q – заряд осциллятора, E_0 – амплитуда электрического поля $E(t)$, m – масса осциллятора.

Рассмотрим уравнение движения осциллятора Морзе при воздействии на него электрического импульса:

$$\ddot{x} = \frac{\omega_0^2}{k} (\exp(-2kx) - \exp(-kx)) - \delta \dot{x} + \gamma f(t), \quad (7)$$

где ω_0 – частотный параметр (который в пределе малых смещений соответствует собственной частоте гармонического осциллятора).

Эффективная частота осциллятора Морзе при достаточно малых значениях x определяется по формуле

$$\omega_{eff} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{3}{2} kx}, \text{ где } x \leq \frac{2}{3k}. \quad (8)$$

Данное выражение несложно получить, если разложить экспоненты в формуле (7) по формуле Тейлора до второго порядка.

Выражение для энергии, поглощаемой осциллятором, при возбуждении электрическим полем $E(t)$ имеет вид

$$\varepsilon = 2\gamma \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t) E(t) dt, \quad (9)$$

где $E(t) = E_0 f(t)$.

Для расчета поглощенной энергии гармоническим осциллятором и осциллятором Морзе необходимо решить соответствующие дифференциальные уравнения (5), (7), затем полученные решения подставляют в выражение (9).

3. Возбуждение осциллятора Морзе импульсом гауссовой формы

Для описания спектральных особенностей возбуждения осциллятора Морзе введем безразмерный параметр частотной отстройки ξ :

$$\xi = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} 100\%, \quad (10)$$

где ω – несущая частота импульса, ω_0 – собственная частота осциллятора.

На рис. 1 представлена зависимость поглощенной энергии осциллятором Морзе как функция частотной отстройки ξ для различных коэффициентов γ и при достаточно большой длительности импульса $\tau = 4$.

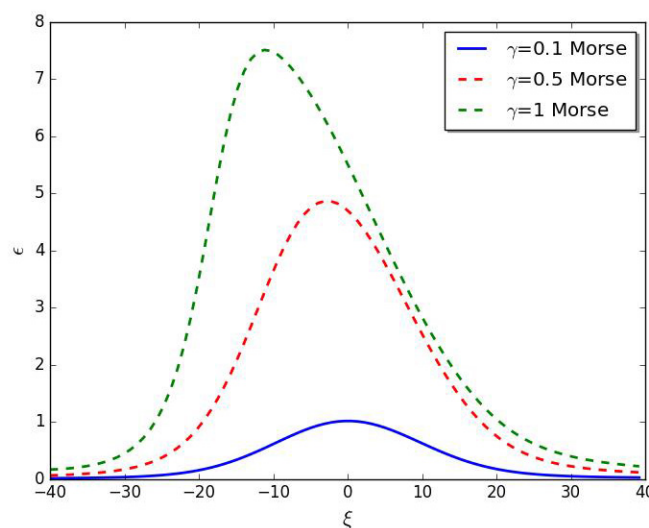


Рис. 1. Зависимость поглощаемой осциллятором Морзе энергии ε как функции частотной отстройки ξ при различных параметрах γ , $\delta = 0.1$, $\tau = 4$

Как видно из рис. 1, с ростом длительности импульса τ , для достаточно больших параметров γ , положение максимума смещается в область отрицательной частотной отстройки ξ . Такой эффект объясняется тем, что с ростом параметра связи γ растет амплитуда колебаний осциллятора, поэтому из формулы (8) следует, что эффективная частота осциллятора Морзе становится меньше собственной частоты гармонического осциллятора ($\omega_{eff} < \omega_0$), что, в свою очередь, приводит к смещению положения максимума спектральной кривой в область отрицательной частотной отстройки.

На рис. 2 приведена зависимость энергии, поглощаемой гармоническим осциллятором и осциллятором Морзе как функции длительности импульса при фиксированном коэффициенте γ и при $\omega \neq \omega_0$ (частотная отстройка $\xi = 15\%$).

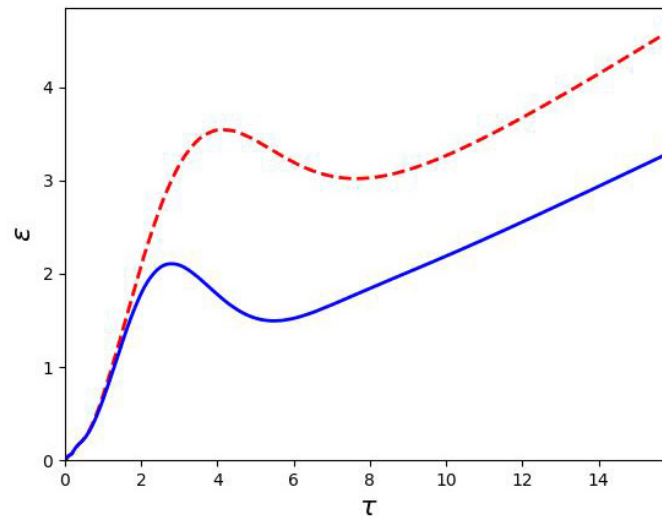


Рис. 2. Зависимость поглощаемой гармоническим осциллятором (пунктирная линия) и осциллятором Морзе (сплошная линия) энергии ε как функции длительности τ при $\gamma = 1$, $\delta = 0.1$, $\omega_0 = 2$, $\xi = 15\%$

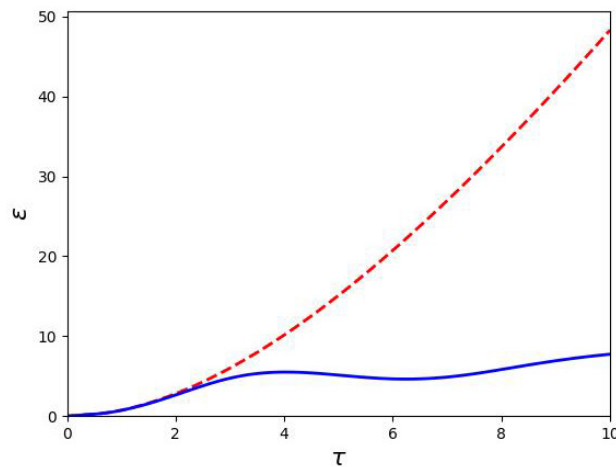


Рис. 3. Зависимость поглощаемой гармоническим осциллятором (пунктирная линия) и осциллятором Морзе (сплошная линия) энергии ε как функции длительности τ при $\gamma = 1$, $\delta = 0.1$, $\omega_0 = 2$, $\xi = 0\%$

Из рис. 1 следует, что с ростом параметра γ количество поглощаемой энергии осцилляторами растет. Однако из рис. 2 видно, что в случае гармонического осциллятора количество поглощаемой им энергии всегда превосходит количество поглощаемой энергии осциллятором Морзе. Стоит отметить, что при $\tau < 8$ зависимости поглощенной энергии для случаев гармонического осциллятора и осциллятора Морзе имеют максимумы, но при $\tau > 8$ данные зависимости являются монотонно возрастающими функциями.

На рис. 3 приведена зависимость энергии, поглощаемой гармоническим осциллятором и осциллятором Морзе как функции длительности импульса при фиксированном коэффициенте γ и при $\omega = \omega_0$ (частотная отстройка $\xi = 0\%$).

Из рис. 2 и 3 видно, что при $\omega = \omega_0$ и при $\omega \neq \omega_0$ количество энергии, поглощаемой гармоническим осциллятором, всегда превосходит количество энергии, поглощаемой

осциллятором Морзе. Стоит заметить, что при малых значениях длительности $\tau < 2$ количество поглощенной энергии гармоническим осциллятором и количество поглощенной энергии осциллятором Морзе совпадают, но при $\tau > 2$ кривая для гармонического осциллятора выходит на линейную зависимость, а у кривой осциллятора Морзе появляется серия максимумов.

На рис. 4 приведена зависимость поглощенной энергии осциллятором Морзе как функции длительности импульса при различных коэффициентах γ .

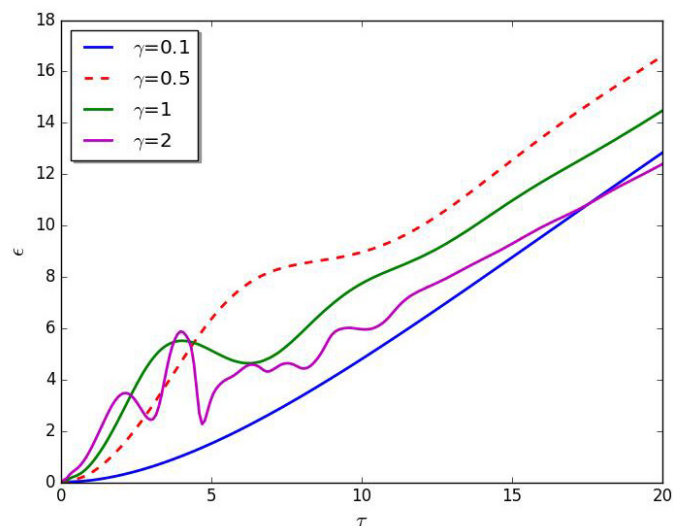


Рис. 4. Зависимость поглощаемой осциллятором Морзе энергии ε как функции длительности τ при различных параметрах γ , $\delta = 0.1$, $\omega_0 = 2$, $\xi = 0\%$

Из рис. 4 следует, что при малых параметрах γ ($\gamma = 0.1$ и $\gamma = 0.5$) количество поглощенной энергии осциллятором Морзе монотонно возрастает с ростом длительности импульса τ . Однако при значениях $\gamma > 1$ на графике появляются осцилляции.

4. Заключение

В данной работе, используя относительные единицы, был проведен численный анализ и аналитическое рассмотрение особенностей взаимодействия ультракороткого электрического импульса гауссовской формы с гармоническим осциллятором и осцилляторами Морзе.

Показано, что спектр поглощенной энергии осциллятором Морзе всегда смещен в область меньших несущих частот по отношению к параметру ω_0 для немалых γ .

Установлено, что количество энергии, поглощенной гармоническим осциллятором, всегда превосходит количество энергии, поглощенной осциллятором Морзе.

Показано, что при частотной отстройке $\xi = 15\%$ ($\omega \neq \omega_0$) и при $\tau < 8$ зависимости поглощенной энергии гармоническим осциллятором и осциллятором Морзе имеют максимумы, но при $\tau > 8$ рассматриваемые зависимости являются монотонно возрастающими функциями.

Показано, что при частотной отстройке $\xi = 0\%$ ($\omega = \omega_0$) и при $\tau < 2$ зависимости поглощенной энергии гармоническим осциллятором и осциллятором Морзе совпадают, но при $\tau > 2$ зависимость для гармонического осциллятора принимает вид линейной функции, а у кривой осциллятора Морзе появляется серия максимумов.

Установлено, что зависимость поглощенной энергии осциллятором Морзе как функции длительности импульса содержит максимумы и минимумы, число которых растет с ростом силы связи γ .

Литература

1. *Крюков П.Г.* Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001. № 2.
2. *Морозов В., Оленин А., Тункин В., Яковлев Д.* Пикосекундные лазеры с импульсной диодной накачкой и электрооптическим управлением генерацией // Фотоника. 2008. № 1.
3. *Астапенко В.А.* Оптические информационные технологии. М.: МФТИ, 2015.
4. *Астапенко В.А.* Электромагнитные процессы в среде, наноплазмоника и метаматериалы. М.: Издательский дом «Интеллект», 2012.
5. *Zhao K., Zhang Q., Chini M., Wu Y., Wang X., Chang Z.* Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch // Optics Lett. 2012. V. 37, N 3891. P. 3891–3893.
6. *Altucci C., Tisch J.W.G., Velotta R.* Single attosecond light pulses from multi-cycle laser sources // Rev. Mod. Phys. 2011. V. 58. P. 1585–1610.
7. *Гребенник А.В., Крюков А.Ю.* Лабораторный практикум по физической химии. Спектрохимия. М.: РХТУ, 2015.
8. *Arustamyan M.G., Astapenko V.A.* Phase control of oscillator excitation under the action of ultra-short laser pulses // Laser Physics. 2008. V. 18. P. 1031.
9. *Астапенко В.А., Ромадановский М.С.* Возбуждение осциллятора Морзе сверхкоротким chirпированным импульсом // ЖЭТФ. 2010. № 137.
10. *Астапенко В.А.* Взаимодействие электромагнитных импульсов с классическими и квантовыми системами. М.: МФТИ, 2013.

References

1. *Kryukov P.G.* Lasers of ultrashort pulses. Quantum electronics. 2001. N 2.
2. *Morozov V., Olenin A., Tunkin V., Yakovlev D.* Picosecond lasers with pulsed diode pumping and electro-optic generation control. Photonics. 2008. N 1.
3. *Astapenko V.A.* Optical information technology. Moscow: MIPT, 2015.
4. *Astapenko V.A.* Electromagnetic processes in the medium, nanoplasmonics and metamaterials. Moscow: Intellect, 2012.
5. *Zhao K., Zhang Q., Chini M., Wu Y., Wang X., Chang Z.* Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch. Optics Lett. 2012. V. 37, N 3891. P. 3891–3893.
6. *Altucci C., Tisch J.W.G., Velotta R.* Single attosecond light pulses from multi-cycle laser sources. Rev. Mod. Phys. 2011. V. 58. P. 1585–1610.
7. *Grebennik A.V., Kryukov A.Y.* Laboratory Workshop on Physical Chemistry. Spectrochemistry. Moscow: MUCTR, 2015.
8. *Arustamyan M.G., Astapenko V.A.* Phase control of oscillator excitation under the action of ultra-short laser pulses. Laser Physics. 2008. V. 18. P. 1031.
9. *Astapenko V.A., Romadanovskiy M.S.* Excitation of the Morse oscillator by an ultrashort chirped pulse. JATF. 2010. N 137.
10. *Astapenko V.A.* Interaction of electromagnetic pulses with classical and quantum systems. Moscow: MIPT, 2013.

Поступила в редакцию 12.09.2017