

РЕЗОНАНСНОЕ РАССЕЯНИЕ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА АТОМАХ В ПАРАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

В. А. Астапенко , Н. Н. Мороз*

*Московский физико-технический институт (государственный университет)
141701, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 14 марта 2018 г.

Теоретически исследуется резонансное рассеяние ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) вблизи спектральных дублетов в одноатомных парах лития и натрия. Проведены расчеты вероятности рассеяния за все время действия импульса в зависимости от различных параметров задачи: несущей частоты и длительности УКИ, давления и температуры пара. Показано, что зависимость полной вероятности рассеяния от длительности импульса носит, вообще говоря, нелинейный характер.

DOI: 10.1134/S0044451018070064

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активное развитие получили методы генерации коротких и ультракоротких лазерных импульсов [1]. Подобный интерес связан с широким спектром их возможных применений не только для решения фундаментальных задач в физике [2], но и в прикладных сферах, например, медицине [3]. Вместе с тем теоретическое описание процесса взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) с веществом еще далеко до своего завершения. Большое количество работ посвящено вопросам ионизации и возбуждения различных мишеней, например, работы [4–7]. В то же время теоретическому исследованию процесса рассеяния УКИ на текущий момент уделено меньшее внимание. Одна из первых работ на эту тему [8] посвящена исследованию изменения формы падающего ультракороткого импульса при рассеянии на атомах. В статьях [9, 10] получены спектры рассеивающихся аттосекундных импульсов на многоатомных системах с использованием теории внезапных возмущений [11], неприменимой для резонансного рассеяния. В работах [12, 13] в рамках теории возмущений описан процесс рассеяния УКИ на многоэлектронных атомах в широком спектральном диапазоне. При этом в статье [12] показано, что для ультракоротких импульсов необходимо использовать понятие вероятности

фотопроцесса за все время действия импульса, в отличие от традиционного подхода, базирующегося на вероятности в единицу времени.

В настоящей работе исследуется резонансное рассеяние ультракоротких лазерных импульсов вблизи спектральных дублетов в одноатомных парах лития и натрия в зависимости от различных параметров задачи: несущей частоты и длительности УКИ, давления и температуры пара.

2. МЕТОД РАСЧЕТА

Для определения интегральной (по частоте и углу) вероятности рассеяния УКИ за все время действия лазерного импульса используем формулу, полученную в рамках теории возмущений в работе [12] (здесь и далее вычисления проводим в атомной системе единиц $e = \hbar = m_e = 1$):

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

где c — скорость света, $E(\omega', \omega, \tau)$ — фурье-образ напряженности электрического поля в импульсе, ω — несущая частота УКИ, τ — длительность УКИ, $\sigma_{sc}(\omega')$ — интегральное по углу сечение рассеяния атомом излучения на частоте ω' .

В дипольном приближении сечение рассеяния на атоме дается равенством

$$\sigma_{sc}(\omega') = \frac{8\pi}{3} \left| \frac{\omega'^2}{c^2} \beta(\omega') \right|^2, \quad (2)$$

* E-mail: astval@mail.ru

где $\beta(\omega')$ — дипольная динамическая поляризуемость мишени.

Для определения дипольной динамической поляризуемости в случае резонансного рассеяния на переходе из основного состояния атома щелочного металла на уровни тонкой структуры $nS \rightarrow nP_j$ ($j = 1/2, 3/2$), исходим из выражения

$$\beta_{res}(\omega') \cong \sum_{j=1/2,3/2} \frac{f_j}{\omega_j^2 - \omega'^2 - 2i\omega'\Delta_j}, \quad (3)$$

где f_j — сила осциллятора электронного перехода, ω_j — собственная частота перехода, Δ_j — ширина спектральной линии перехода.

Для учета доплеровского уширения линий переходов в одноатомных парах лития и натрия в выражении (2) необходимо провести усреднение модуля квадрата дипольной динамической поляризуемости по максвелловскому распределению скоростей атомов:

$$\sigma_{sc}(\omega') = \frac{8\pi}{3} \frac{\omega'^4}{c^4} \langle |\beta(\omega')|^2 \rangle_D. \quad (4)$$

При усреднении квадрата модуля выражения (3) по распределению скоростей атомов при температуре T с учетом ударного уширения имеем

$$\langle |\beta(\omega')|^2 \rangle_D = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dy e^{-y^2} \times \left| \sum_{j=1/2,3/2} \frac{f_j}{\omega_j^2 (1 - (u/c)y)^2 - \omega'^2 - 2i\omega'\Delta_j} \right|^2, \quad (5)$$

где $u = \sqrt{2T/M}$ — тепловая скорость атома с массой M при температуре T , Δ_j — ширина однородной спектральной линии перехода, равная

$$\Delta_j = \frac{2f_j\omega_j^2}{3c^3} + 4\pi \frac{f_j}{\omega_j} N. \quad (6)$$

Первое слагаемое в выражении (6) определяет величину однородного уширения, связанного со спонтанным излучением, второе слагаемое — ударное уширение линии перехода за счет диполь-дипольного взаимодействия между атомами, N — концентрация атомов в паре [14].

В качестве ультракороткого импульса рассмотрим импульс с гауссовой огибающей, квадрат модуля фурье-образа напряженности электрического поля в котором можно записать следующим образом:

$$|E(\omega', \omega, \tau)|^2 \approx \frac{\pi}{2} \tau^2 E_0^2 \exp \{ -(\omega - \omega')^2 \tau^2 \}, \quad (7)$$

где E_0 — амплитуда напряженности электрического поля в импульсе.

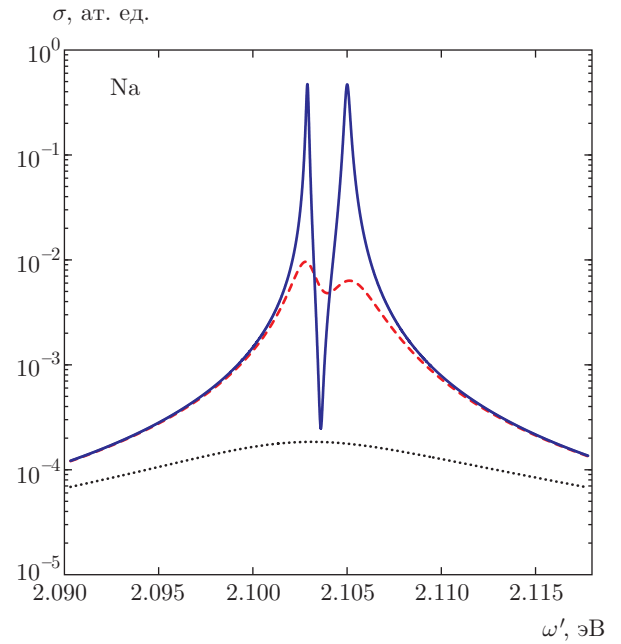


Рис. 1. Спектр сечения рассеяния при температуре $T = 2000$ К и различных давлениях одноатомного пара натрия: $p = 10^4$ Па (сплошная линия), 10^5 Па (штриховая линия), 10^6 Па (пунктирная линия)

3. РАСЧЕТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты проведены для атомов лития и натрия по формулам (1)–(7) с использованием данных из книги [15].

Результаты расчетов для сечения резонансного рассеяния излучения на атоме натрия при температуре $T = 2000$ К и различных давлениях одноатомного пара p приведены на рис. 1 в логарифмическом масштабе. Как видно из графиков, в диапазоне давлений до $p \approx 10^6$ Па указанная величина представляет собой двугорбую структуру с максимумами, соответствующими собственным частотам переходов на уровни тонкой структуры. По мере увеличения давления пара амплитуда максимумов значительно уменьшается, а при давлении $p \approx 10^6$ Па зависимость вырождается в структуру с одним максимумом. Это связано с соотношением между величинами ударного уширения и тонкого расщепления верхнего уровня атома натрия Δ_{fs} . Величина ударного уширения при температуре $T = 2000$ К и давлении одноатомного пара $p = 10^5$ Па составляет $\Delta_{col} = 1.51 \cdot 10^{-3}$ эВ, а при давлении $p = 10^6$ Па — $\Delta_{col} = 1.51 \cdot 10^{-2}$ эВ. Величина тонкого расщепления равна $\Delta_{fs} = 2.1 \cdot 10^{-3}$ эВ. Таким образом, при давлении $p = 10^6$ Па величина ударного уширения значительно больше тонкого расщепления, что и обуславливает вырождение спектра в одnogорбую структуру.

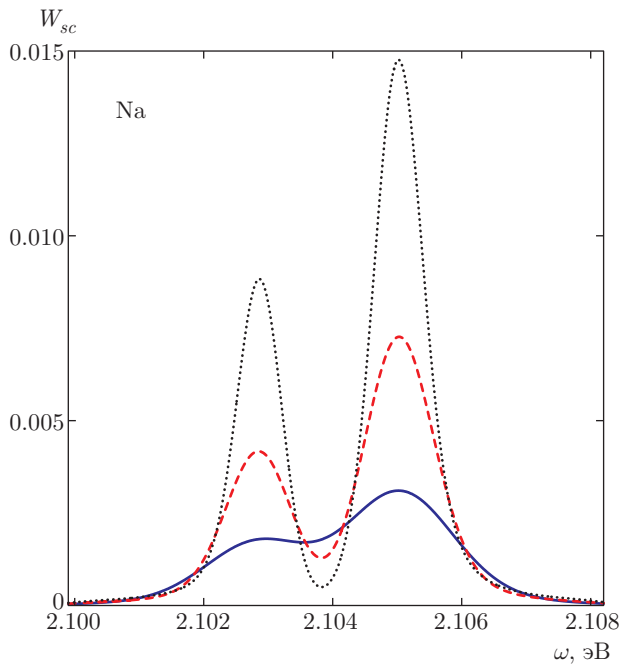


Рис. 2. Зависимости вероятности рассеяния от несущей частоты импульса для давления $p = 10^4$ Па и температуры $T = 2000$ К одноатомного пара натрия при различных значениях длительности УКИ: $\tau = 0.6$ пс (сплошная линия), 0.96 пс (штриховая линия), 1.44 пс (пунктирная линия)

Расчеты для вероятности рассеяния ультракоротких лазерных импульсов на атомах натрия в одноатомных парах проведены при амплитуде напряженности электрического поля $E_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ ат. ед.

На рис. 2 представлены зависимости вероятности рассеяния от несущей частоты импульса, рассчитанные для давления $p = 10^4$ Па и температуры $T = 2000$ К одноатомного пара натрия при различных значениях длительности воздействующего импульса. Как видно из графиков, при рассматриваемых значениях давления и температуры указанная зависимость представляет собой структуру с двумя максимумами, соответствующими собственным частотам переходов на уровни тонкой структуры. При уменьшении длительности импульса амплитуды максимумов уменьшаются, а сами они становятся шире, размываясь для достаточно коротких импульсов.

На рис. 3 представлены зависимости вероятности рассеяния от несущей частоты импульса для различных температур при длительности ультракороткого лазерного импульса $\tau = 0.96$ пс и давлении $p = 10^4$ Па одноатомного пара натрия. Как видно из графиков, при рассматриваемых значениях дав-

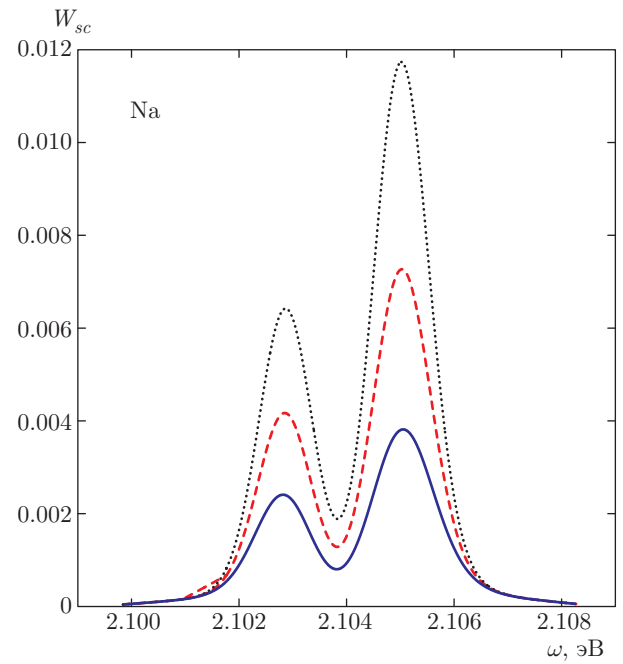


Рис. 3. Зависимости вероятности рассеяния от несущей частоты импульса при давлении $p = 10^4$ Па одноатомного пара натрия и длительности воздействующего импульса $\tau = 0.96$ пс при различных значениях температуры: $T = 1200$ К (сплошная линия), 2000 К (штриховая линия), 3000 К (пунктирная линия)

ления и температуры указанные зависимости имеют два максимума, соответствующих частотам переходов на уровни тонкой структуры атома натрия и увеличивающихся в пределах одного порядка по мере роста температуры одноатомного пара. Расчеты для других параметров задачи показали, что для давлений, больших $p \approx 10^6$ Па, зависимость вероятности рассеяния от несущей частоты импульса, аналогично спектру сечения рассеяния, приобретает колоколообразный вид с одним максимумом, величина которого увеличивается с ростом температуры.

На рис. 4 приведены зависимости вероятности рассеяния от длительности УКИ для давления $p = 10^4$ Па и температуры $T = 2000$ К одноатомного пара натрия при различных значениях несущей частоты импульса. Как видно из графиков, при совпадении несущей частоты импульса с частотой перехода на уровень тонкой структуры вероятность квадратично возрастает, а при длительности импульса $\tau \approx 1.5$ пс и больше приобретает линейную зависимость от длительности. Для несущей частоты импульса, равной центральной частоте $\omega_c = (\omega_{1/2} + \omega_{3/2})/2 = 2.104$ эВ, зависимость вероятности от длительности имеет нелинейный характер с

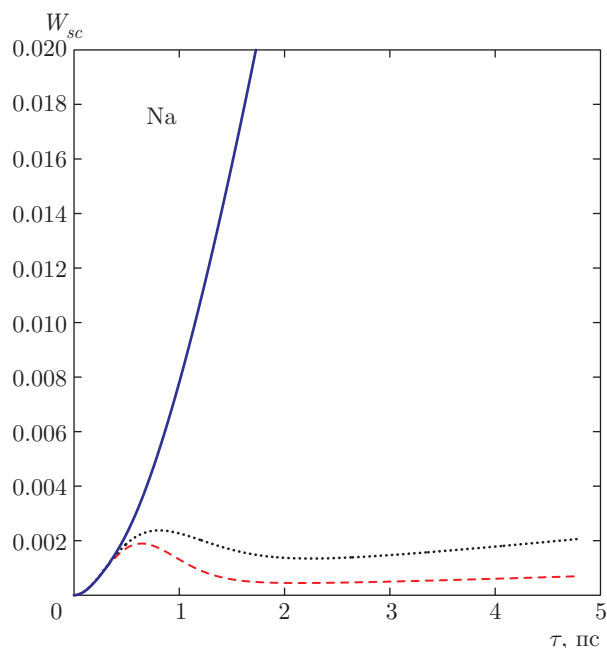


Рис. 4. Зависимости вероятности рассеяния от длительности импульса для давления $p = 10^4$ Па и температуры $T = 2000$ К одноатомного пара натрия при различных значениях несущей частоты: сплошная линия — равная собственной частоте перехода $\omega = \omega_{3/2} = 2.105$ эВ, штриховая линия — равная центральной частоте $\omega = \omega_c = 2.104$ эВ, пунктирная линия — $\omega = 2.1044$ эВ

максимумом и минимумом. Более детально данные нелинейности представлены на рис. 5.

На рис. 5 представлены вероятности рассеяния УКИ в зависимости от длительности импульса для несущей частоты, равной центральной частоте $\omega = \omega_c = 2.104$ эВ, при давлениях $p = 10^4$ Па, 10^5 Па и различных температурах одноатомного пара натрия. Как видно на рис. 5а, при давлении $p = 10^4$ Па рассматриваемая зависимость имеет ярко выраженные максимум и минимум, при этом величина максимума растет с увеличением температуры. При длительностях импульса более $\tau \approx 3$ пс зависимость приобретает линейный характер, что соответствует традиционному описанию процесса. При давлении $p = 10^5$ Па нелинейности в зависимости вероятности рассеяния от длительности импульса практически исчезают, что объясняется существенно большей величиной ударного уширения по сравнению с тонким расщеплением при данных параметрах задачи.

Расчеты для рассеяния УКИ на одноатомном паре лития в целом демонстрируют наличие аналогичных зависимостей. На рис. 6 приведены зависимости вероятности рассеяния от длительности импуль-

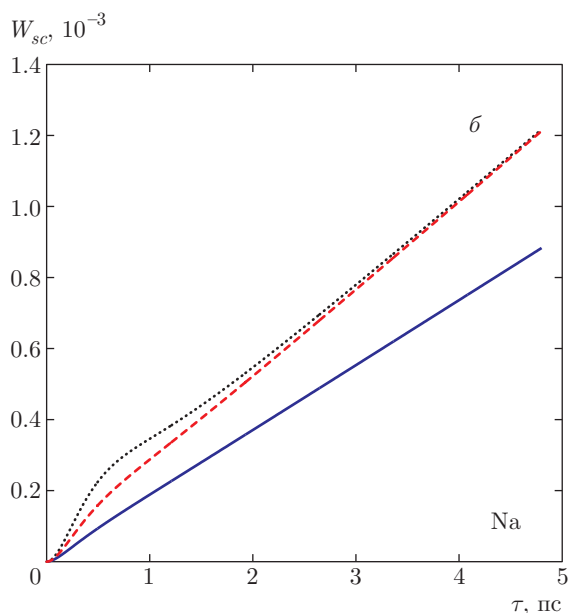
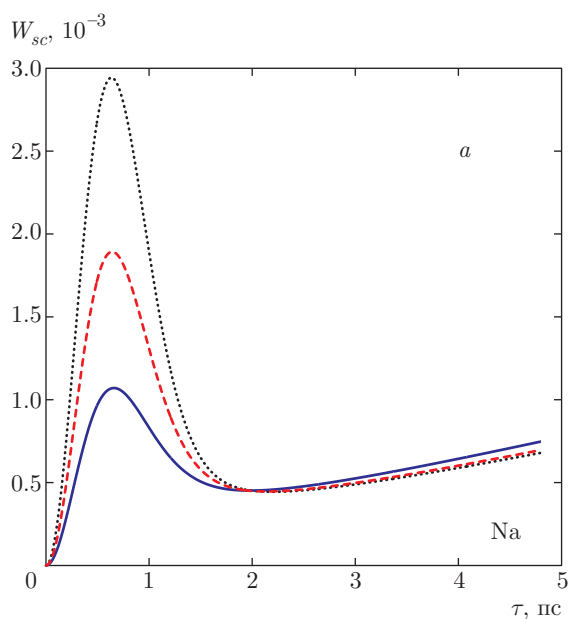


Рис. 5. Вероятность рассеяния в зависимости от длительности импульса для несущей частоты импульса, равной центральной частоте $\omega = \omega_c = 2.104$ эВ, при давлении $p = 10^4$ Па (а), 10^5 Па (б) одноатомного пара натрия и различных температурах: $T = 1200$ К (сплошные линии), 2000 К (штриховые линии), 3000 К (пунктирные линии)

са для несущей частоты $\omega = \omega_c = 1.848361$ эВ при давлении $p = 1$ Па и различных температурах одноатомного пара лития. Как видно из графиков, зависимости имеют нелинейный характер с максимумами и минимумами в области малых длительностей и линейный характер в области больших длительностей. По мере роста температуры пара амплитуда

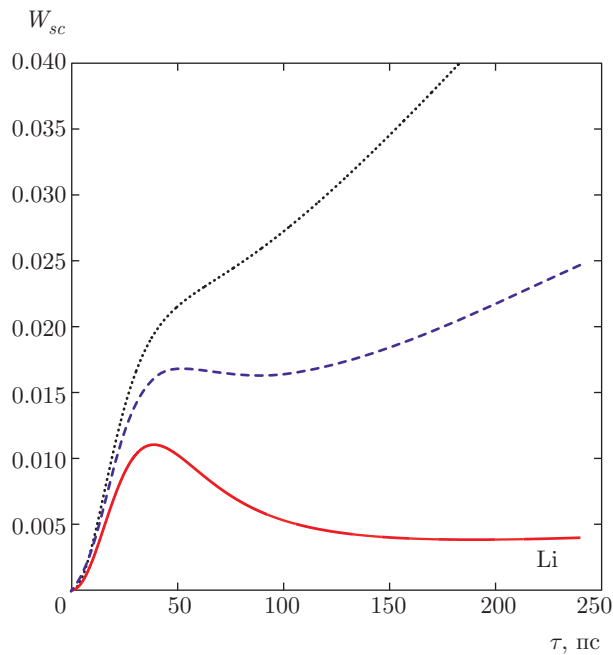


Рис. 6. Зависимости вероятности рассеяния от длительности импульса для давления $p = 1$ Па одноатомного пара лития и несущей частоты воздействующего импульса $\omega = \omega_c = 1.848361$ эВ при различных значениях температуры пара: $T = 900$ К (сплошная линия), 1500 К (штриховая линия), 2000 К (пунктирная линия)

максимума зависимости увеличивается, в то время как сам максимум становится менее выраженным, в отличие от случая натрия, для которого максимум становится более выраженным с увеличением температуры. Данное различие объясняется тем, что в рассматриваемом диапазоне температур величины доплеровского уширения и тонкого расщепления верхнего уровня атома лития являются сопоставимыми, в отличие от таковых для натрия. Таким образом, с ростом температуры паров лития изменяется наклон прямой в линейной части зависимости вероятности рассеяния от длительности импульса.

На рис. 7 приведены зависимости вероятности рассеяния от длительности УКИ для несущей частоты $\omega = \omega_c = 1.848361$ эВ при температуре $T = 1500$ К одноатомного пара лития и различных значениях давления в диапазоне $p = 100$ – 900 Па. Как видно из графиков, при давлении одноатомного пара лития $p \approx 500$ Па нелинейности в зависимости вероятности рассеяния от длительности исчезают. Это объясняется тем, что при данных значениях величина ударного уширения становится сопоставимой с величиной тонкой структуры.

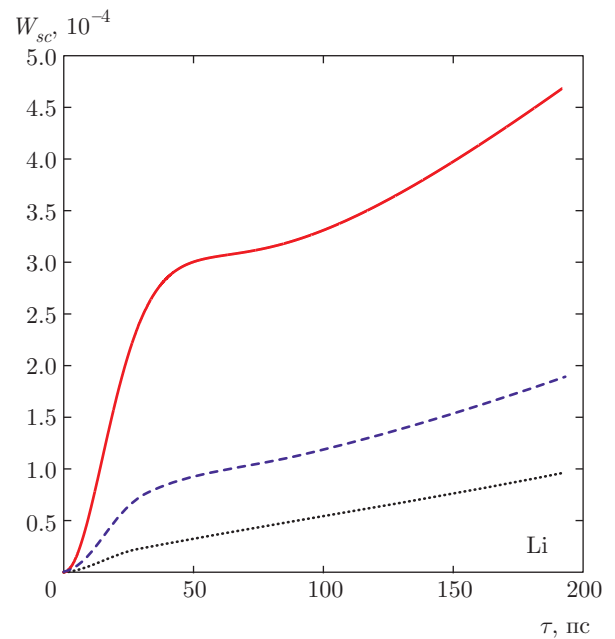


Рис. 7. Зависимости вероятности рассеяния от длительности импульса для температуры $T = 1500$ К одноатомного пара лития и несущей частоты воздействующего импульса $\omega = \omega_c = 1.848361$ эВ при различных значениях давления пара: $p = 100$ Па (сплошная линия), 300 Па (штриховая линия), 900 Па (пунктирная линия)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано резонансное рассеяние ультракоротких лазерных импульсов вблизи спектральных дублетов атомов лития и натрия в одноатомных парах для различных параметров задачи: несущей частоты и длительности УКИ, давления и температуры одноатомного пара. Показано, что зависимость вероятности рассеяния от несущей частоты импульса в области низких давлений одноатомного пара (до $p = 10^4$ Па для паров лития и до $p = 10^6$ Па для паров натрия) представляет собой структуру с двумя максимумами, соответствующими собственным частотам переходов из основного состояния атома на уровни тонкой структуры. Амплитуда максимумов сильно уменьшается при увеличении давления паров, в то время как сами максимумы уширяются. При значительном превышении величины ударного уширения над величиной тонкого расщепления зависимость вырождается в структуру с одним максимумом.

Показано, что зависимости вероятности рассеяния УКИ вблизи спектральных дублетов атомов лития и натрия от длительности импульса содержат нелинейные участки в области давлений до $p =$

$= 10^3$ Па для паров лития и до $p = 10^5$ Па для паров натрия. В работе продемонстрированы указанные нелинейности для несущих частот импульса, равных центральной частоте $\omega = \omega_c = (\omega_{1/2} + \omega_{3/2})/2$. При данных параметрах задачи зависимость вероятности рассеяния от длительности импульса содержит максимум и минимум, амплитуда которых растет с увеличением температуры. Длительность УКИ в максимуме вероятности рассеяния для лития составляет 50 пс, а для натрия — 0.5 пс.

В случае длинных импульсов зависимость вероятности рассеяния вблизи спектральных дублетов атомов лития и натрия от длительности импульса становится линейной, что отвечает традиционному описанию. В области больших давлений одноатомных паров зависимость также имеет линейный вид. При совпадении несущей частоты с собственной частотой атома вероятность рассеяния сначала возрастает квадратично при увеличении длительности УКИ, а потом линейно.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и образования РФ (задание № 3.9890.2017/8.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Hassan, A. Wirth, I. Grguras et al., Rev. Sci. Instr. **83**, 111301 (2012).
2. F. Krausz and M. Ivanov, Rev. Mod. Phys. **81**, 163 (2009).
3. K. H. Soong, Amer. J. Ophthalmology **147**(2), 189 (2008).
4. R. Moshhammer, W. Schmitt, J. Ullrich et al., Phys. Rev. Lett. **79**, 3621 (1997).
5. P. B. Corkit and F. Krausz, Nature Phys. **3**, 381 (2007).
6. A. V. Gets and V. P. Krainov, Contrib. Plasma Phys. **53**, 140 (2013).
7. N. V. Bordyug and V. P. Krainov, Laser Phys. Lett. **4**, 674 (2007).
8. P. A. Golovinkii and E. M. Mikhailov, Laser Phys. Lett. **3**, 259 (2006).
9. Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев, ЖЭТФ **144**, 905 (2013).
10. Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев, ЖЭТФ **146**, 685 (2014).
11. А. М. Дыхне, Г. Л. Юдин, УФН **125**, 377 (1978).
12. V. A. Astapenko, Phys. Lett. A **374**, 1585 (2010).
13. В. А. Астапенко, ЖЭТФ **139**, 228 (2011).
14. И. И. Собельман, *Введение в теорию атомных спектров*, Физматлит, Москва (1963).
15. Н. Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*, Наука, Москва (1972).