

10,09

Влияние длительности светового импульса на амплитуду и фазу фотоиндуцированных когерентных фононов

© А.Л. Семенов, С.С. Моливер

Ульяновский государственный университет,
Ульяновск, Россия

E-mail: smnv@mail.ru

(Поступила в Редакцию 14 ноября 2013 г.)

Получена теоретическая зависимость амплитуды и начальной фазы фотоиндуцированных когерентных колебаний кристаллической решетки от длительности возбуждающего светового импульса прямоугольной формы. Проведено сравнение с экспериментом для теллура.

1. Введение

Изучение фотоиндуцированных когерентных колебаний кристаллической решетки (фотоиндуцированных когерентных фононов), начиная с их первого наблюдения [1], на протяжении длительного времени вызывает неослабевающий интерес [2–5]. В работе [6] предложена теория возбуждения когерентных фононов путем фотоиндуцированного смещения положения равновесия. Эта теория хорошо согласуется с экспериментом по облучению Sb, Bi, Te, Ti_2O_3 коротким лазерным импульсом малой энергии. В работах [7,8] построена нелинейная теория фотоиндуцированных когерентных колебаний кристаллической решетки, объясняющая асимметрию фононной линии в Фурье спектре колебаний [2], нелинейное затухание фотоиндуцированных осцилляций коэффициента оптического отражения [3], зависимость частоты колебаний от плотности энергии лазерного импульса и времени [4,5]. В линейном приближении теория [7,8] переходит в теорию [6].

В статьях [6–8] предполагается, что длительность τ возбуждающего светового импульса пренебрежимо мала по сравнению с периодом T когерентных колебаний кристаллической решетки. Вместе с тем в эксперименте [9] величина τ/T меняется в пределах от 0.15 до 1.5. Поэтому представляет интерес исследовать этот случай в рамках теории [6–8] и сравнить полученные результаты с имеющимися экспериментальными данными [9].

В настоящей работе в рамках теории [6] проведено теоретическое исследование влияния длительности возбуждающего импульса прямоугольной формы на амплитуду и начальную фазу фотоиндуцированных когерентных колебаний кристаллической решетки. Полученные теоретические результаты сравниваются с экспериментальными данными работы [9] по облучению теллура прямоугольным световым импульсом.

2. Основные уравнения

При малых энергиях лазерного импульса динамика обобщенной координаты Q фотоиндуцированных коге-

рентных колебаний кристаллической решетки описывается уравнением линейного затухающего осциллятора, равновесное положение которого зависит от концентрации n фотовозбужденных электронов [6]

$$\ddot{Q} + 2\gamma\dot{Q} + \Omega_0^2(Q - \theta n) = 0. \quad (1)$$

Здесь γ^{-1} — характерное время фононной релаксации; Ω_0 — круговая частота когерентного фонона в отсутствие затухания; θ — константа, характеризующая взаимодействие когерентного фонона с фотовозбужденными электронами. Зависимость концентрации n фотовозбужденных электронов от времени подчиняется кинетическому уравнению [10]

$$\dot{n} = \frac{(1-R)\alpha I}{\hbar\omega_0} - \beta n, \quad (2)$$

где α, R — соответственно коэффициенты оптического поглощения и отражения; ω_0, I — частота и интенсивность светового поля; β^{-1} — характерное время электронной релаксации.

Решение уравнений (1), (2) с начальными условиями $n(-\infty) = 0, Q(-\infty) = 0$ имеет вид

$$n(t) = \frac{(1-R)\alpha}{\hbar\omega_0} \int_{-\infty}^t I(\xi) \exp(-\beta(t-\xi)) d\xi, \quad (3)$$

$$Q(t) = \frac{\Omega_0^2 \theta}{\Omega} \int_{-\infty}^t n(\xi) \exp(-\gamma(t-\xi)) \sin(\Omega(t-\xi)) d\xi, \quad (4)$$

где

$$\Omega = \sqrt{\Omega_0^2 - \gamma^2}. \quad (5)$$

Уравнения (3), (4) определяют динамику системы в зависимости от интенсивности $I(t)$ светового поля.

3. Возбуждение импульсом прямоугольной формы

Рассмотрим возбуждающий импульс с интенсивностью

$$I(t) = \frac{W}{\tau} \begin{cases} 1, & |t| < \tau/2, \\ 0, & |t| > \tau/2, \end{cases} \quad (6)$$

где W, τ — соответственно плотность энергии и длительность импульса. Подставляя соотношение (6) в (3), получаем

$$n(t) = \frac{(1-R)\alpha W}{\hbar\omega_0\beta\tau} \times \begin{cases} 0, & t < -\tau/2, \\ 1 - \exp(-\beta(t + \tau/2)), & |t| < \tau/2, \\ (\exp(\beta\tau) - 1) \exp(-\beta(t + \tau/2)), & t > \tau/2. \end{cases} \quad (7)$$

Подставляя выражение (7) в уравнение (4), в случае $\tau/2 < t \ll 1/\gamma$ для осциллирующей части обобщенной координаты Q приближенно находим

$$Q(t) = B \sin(\Omega t + \varphi), \quad (8)$$

где

$$B = \frac{(1-R)\alpha W\theta}{\hbar\omega_0\sqrt{1+(\beta/\Omega)^2}} \left| \frac{\sin(\pi\tau/T)}{\pi\tau/T} \right| \quad (9)$$

— амплитуда фотоиндуцированных когерентных колебаний кристаллической решетки,

$$\varphi = -\arcsin \frac{\Omega}{\sqrt{\beta^2 + \Omega^2}} + \frac{\pi}{2} (3 + \text{sign}(T - \tau)) \quad (10)$$

— начальная фаза, $T = 2\pi/\Omega$ — период когерентных колебаний. Формула (10) справедлива при $\tau < 2T$.

4. Сравнение с экспериментом

Для проведения численной оценки используем следующие значения параметров теллура [6]: время электронной релаксации $\beta^{-1} \approx 0.63$ ps, частота фотоиндуцированных когерентных колебаний решетки $\Omega/2\pi \approx 3.61$ THz. Подставляя эти значения в уравнение (10), находим

$$\varphi \cong \begin{cases} 3\pi/2, & \tau < T, \\ \pi/2, & \tau > T. \end{cases} \quad (11)$$

Эксперимент [9] по оптическому зондированию теллура при облучении его лазерным импульсом прямоугольной формы показал, что зависимость амплитуды B фотоиндуцированных когерентных колебаний кристаллической решетки от длительности τ импульса хорошо аппроксимируется выражением

$$B \propto \left| \frac{\sin(\pi\tau/T)}{\pi\tau/T} \right|. \quad (12)$$

При этом в случае $\tau < T$ начальная фаза когерентных колебаний $\varphi \approx 3\pi/2$, а при $\tau = T$ фаза φ скачкообразно уменьшается на величину $\Delta\varphi \approx \pi$. Видно, что эти экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими результатами (9), (11).

5. Заключение

Проведенные в настоящей работе теоретические исследования показали, что зависимость амплитуды B фотоиндуцированных когерентных фононов от длительности τ светового импульса прямоугольной формы определяется выражением (9), а начальная фаза φ при $\tau < 2T$ соотношением (10). При увеличении длительности τ светового импульса от 0 до T эффективность возбуждения когерентных фононов снижается, а начальная фаза $\varphi \approx 3\pi/2$ не меняется. При $\tau = T$ когерентные фононы не индуцируются. Полученные теоретические результаты согласуются с экспериментальными данными [9] по облучению теллура световым импульсом прямоугольной формы.

Список литературы

- [1] T.K. Cheng, J. Vidal, H.J. Zeiger, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, E.P. Ippen. Appl. Phys. Lett. **59**, 16, 1923 (1991).
- [2] M. Hase, M. Kitajima, S. Nakashima, K. Mizoguchi. Phys. Rev. Lett. **88**, 6, 067401 (2002).
- [3] О.В. Мисочко, М.В. Лебедев. ЖЭТФ **136**, 5(11), 931 (2009).
- [4] О.В. Мисочко, М.В. Лебедев. Письма в ЖЭТФ **89**, 3, 148 (2009).
- [5] А.А. Мельников, О.В. Мисочко, В.О. Компанец, А.Л. Добряков, С.В. Чекалин. ЖЭТФ **138**, 3(9), 486 (2010).
- [6] H.J. Zeiger, J. Vidal, T.K. Cheng, E.P. Ippen, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus. Phys. Rev. B **45**, 2, 768 (1992).
- [7] А.Л. Семенов. ФТТ **53**, 11, 2222 (2011).
- [8] А.Л. Семенов. ЖЭТФ **144**, 1, 104 (2013).
- [9] O.V. Misochko, M.V. Lebedev, H. Schafer, T. Dekorsy. J. Phys.: Cond. Matter **19**, 406 220 (2007).
- [10] В.И. Емельянов, Д.В. Бабак. ФТТ **41**, 8, 1462 (1999).