

КОРРЕЛЯЦИЯ ФОРМ СИГНАЛОВ СВЕТОВОГО ЭХА С ФОРМОЙ ВОЗБУЖДАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

В.А.Зуйков, В.В.Самарцев, Р.Г.Усманов

В кристалле рубина обнаружен эффект корреляции формы сигналов первичного (ПСЭ) и стимулированного (ССЭ) светового эха с формой возбуждающих лазерных импульсов. Установлено, что форма ПСЭ обращена во времени по отношению к форме первого малоинтенсивного импульса, а форма ССЭ — повторяет форму второго малоинтенсивного импульса.

Отличительное свойство сигналов светового эха состоит в способности излучаться через заданные интервалы времени после воздействия на резонансную среду разнесенных друг относительно друга лазерных импульсов [1]. В ряде кристаллов эти временные интервалы могут быть значительными (например, при температуре 2,2 К в рубине они достигают десятков микросекунд [2], а в кристалле $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$ — даже нескольких минут [3]). Поэтому сигналы первичного и стимулированного светового эха могут быть использованы при создании оптических линий задержек, если добиться, чтобы форма эхо-сигналов повторяла форму заданных возбуждающих импульсов.

В данной работе сообщается об обнаружении эффекта корреляции формы сигналов ПСЭ и ССЭ с формой возбуждающих импульсов и исследуются условия его реализации. В качестве резонансной среды был выбран кристалл рубина с концентрацией ионов Cr^{3+} , равной 0,05 вес.% (рабочий переход: ${}^4A_2 - {}^2E(\bar{E})$).

Совокупность осциллограмм, демонстрирующих корреляцию формы ПСЭ и ССЭ с формой возбуждающих импульсов, приведена на рис.1 и рис.2. Следуя терминологии импульсной радиоспектроскопии [4], будем называть импульс, который подлежит воспроизведению, — кодом, последний импульс — считывающим; а при трехимпульсном возбуждении: первый импульс — запускающим. Данный эксперимент показал, что форма сигналов ПСЭ и ССЭ лишь тогда коррелирует с формой импульса-кода, если напряженность электрического поля последнего меньше неоднородности локального электрического поля в местоположении парамагнитных центров, а напряженность поля считывающего и запускающих импульсов — существенно больше ее. Установлено, что подобная корреляция реализуется при выполнении следующих условий:

$$W_{(K)}^{1/2} \hbar^{-1} p \left(\frac{8\pi}{cS} \right)^{1/2} T_2^{*-1} \ll 1; \quad \Delta t_{(K)}^{-1} T_2^* \ll 1; \quad (1)$$

$$W_{(C;3)}^{1/2} \hbar^{-1} p \left(\frac{8}{cS\pi} \right)^{1/2} \Delta t^{-1} \approx 1, \quad (2)$$

где T_2^* — время поперечной обратимой релаксации ($\approx 10^{-10}$ сек); p —

модуль электрического дипольного момента резонансного перехода ($\approx 4,8 \cdot 10^{-21}$ ед. CGSE); c — скорость света; S — площадь поперечного сечения луча ($\approx 10^{-2}$ см²); W и Δt — мощность и длительность лазерного импульса (индексы "к", "с" и "з" относятся соответственно к импульсу-коду, считываемому и запускающему импульсам).

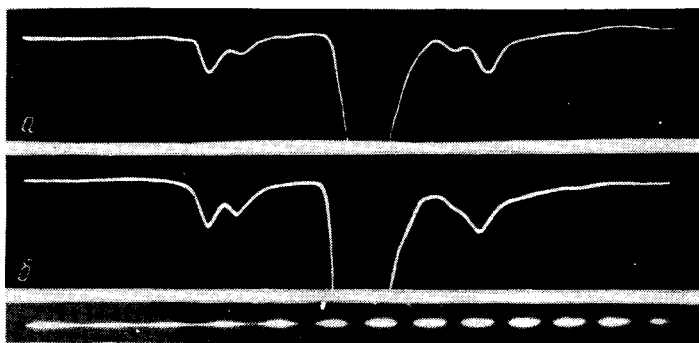


Рис.1. Осциллограммы, иллюстрирующие эффект корреляции формы первичного светового эха с формой первого лазерного импульса. Сигнал ПСЭ — первый справа; остальные сигналы — возбуждающие импульсы. Верхняя осциллограмма (демонстрирующая наличие корреляции) соответствует отношению мощностей второго и первого импульсов, равному 10, а осциллограмма "б" (демонстрирующая частичное нарушение корреляции) — отношению мощностей, равному 2. Мощность второго импульса составляет 300 кВт. Величина (H_0) приложенного постоянного магнитного поля равна 450 Э. Интервал времени между импульсами равен 24 нсек. Метки ("в") — 10 нсек

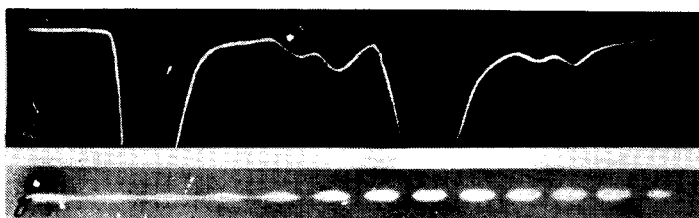


Рис.2. Осциллограмма, иллюстрирующая идентичность формы сигнала стимулированного светового эха (первый справа) с формой второго возбуждающего импульса. Отношение мощностей третьего и второго импульсов равно 10. Мощность третьего импульса составляет 200 кВт. $H_0 = 450$ Э. Время между первым и вторым импульсами равно 24 нсек, а между вторым и третьим импульсами — 20 нсек. Метки ("б") = 10 нсек

Экспериментальная установка, на которой проводились эти исследования, была аналогичной установке, описанной в работе [5]. Длительность возбуждающих импульсов составляла 10 нсек, а время между

импульсами могло варьироваться в пределах от 5 до 120 нсек. Установка допускала приложение постоянного магнитного поля (направленного вдоль оптической оси кристалла) напряженностью до 1,5 кЭ, хотя сигналы ПСЭ и ССЭ наблюдались и в нулевом магнитном поле. Особенность возбуждения заключалась в том, что импульс-код формировался из двух задержанных (на 5 – 8 нсек) друг относительно друга лазерных импульсов, в результате чего форма импульса-кода могла варьироваться.

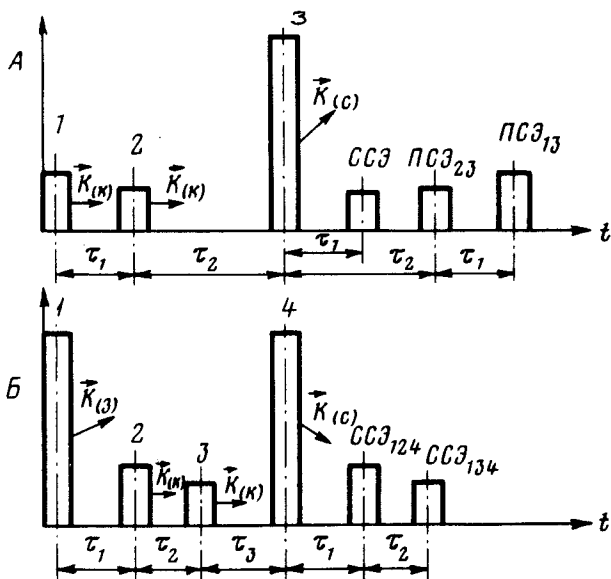


Рис.3. Схемы трехимпульсного (А) и четырехимпульсного (В) возбуждения двухуровневой системы, поясняющие эффекты корреляции формы эхо-сигналов с формой возбуждающих импульсов. $\mathbf{K}_{(k)}$, $\mathbf{K}_{(z)}$, $\mathbf{K}_{(c)}$ – волновые векторы импульса-кода, запускающего и считывающего импульсов соответственно. ПСЭ $\alpha\beta$ – сигналы ПСЭ на воздействие α -го и β -го возбуждающих импульсов. ССЭ – сигналы ССЭ на воздействие α -го, β -го и γ -го возбуждающих импульсов.

С тем, чтобы были понятны причины существования корреляции формы эхо-сигналов с формой импульсов, обратимся к схемам трехимпульсного и четырехимпульсного резонансного возбуждения двухуровневой системы, изображенным на рис.3. В случае трехимпульсного воздействия (рис.3 "А") система способна высветить два сигнала ПСЭ соответственно в моменты времени $2\tau_2 + \tau_1$ и $2\tau_2 + 2\tau_1$ в направлении $2\mathbf{k}_{(c)} - \mathbf{k}_{(k)}$ и сигнал ССЭ в момент времени $2\tau_1 + \tau_2$ в направлении $\mathbf{k}_{(c)}$. Формфакторы сигналов ПСЭ и ССЭ в условиях частичного возбуждения неоднородно-уширенной линии спектром прямоугольных импульсов ($\Delta t \gg T_2^*$) определены в работе [6]. Если импульс-код настолько мало-

интенсивен, что $W_{(k)}^{1/2} \left[\frac{5\hbar^{-1}p}{(cS)^{1/2}} \right] \ll T_2^{*-1}$, то формфактор ПСЭ и ССЭ

оказывается пропорциональным $W_{(K)}^{1/2}$. Таким образом, в этих условиях соотношение интенсивностей сигналов ПСЭ оказывается равным соотношению интенсивностей первого и второго импульсов, однако их порядок расположения во времени стал обратным порядку расположения указанных импульсов. Сближение первых двух импульсов приведет к сближению обоих сигналов ПСЭ, в результате чего они составят единый эхо-сигнал, форма которого оказывается обращенной во времени по отношению к форме импульса-кода. К аналогичному результату приводит численный анализ в случае импульса-кода произвольной формы [7]. Очевидно, если импульс-код имел симметричную форму, то в указанных условиях сигнал ПСЭ также будет иметь симметричную форму. Интенсивность ПСЭ с ростом τ_1 спадает экспоненциально с временем поперечной необратимой релаксации T_2 . Отметим, что если импульс-код и считывающий импульс поменять местами, то форма сигнала ПСЭ будет повторять форму импульса-кода. К аналогичному результату приводит анализ формы сигнала ССЭ в условиях трехимпульсного возбуждения, если кодом является второй импульс. В простейшем случае задача сводится к случаю четырехимпульсного воздействия (рис.3 "Б"), из которого следует, что при сближении второго и третьего импульсов суммарный сигнал ССЭ будет иметь форму, идентичную форме малоинтенсивного импульса-кода. Этот результат согласуется с выводами проведенного нами численного анализа формы ССЭ в случае возбуждающих импульсов произвольной формы. Сигнал ССЭ с ростом τ_3 спадает по экспоненциальному закону с временем продольной релаксации T_1 , которое может быть весьма значительным [2, 3]. С точки зрения возможных технических приложений обнаруженного эффекта может оказаться необходимым, чтобы поляризация эхо-сигналов совпадала с поляризацией импульса-кода. В рубине, например, при распространении импульсов в направлении, близком к направлению оптической оси С, справедливы следующие соотношения: $\psi_{ПСЭ} = 2\psi_2 - \psi_1$ и $\psi_{ССЭ} = -\psi_1 + \psi_2 + \psi_3$, где ψ_η — угол вектора поляризации η -го линейного-поляризационного импульса по отношению к выделенной оси X в плоскости, перпендикулярной оси С; $\psi_{ПСЭ}$ и $\psi_{ССЭ}$ — углы векторов поляризации сигналов ПСЭ и ССЭ соответственно по отношению к оси X. При $\psi_\eta = 0$ (для любых η ; $\eta = 1, 2, 3$) сигналы ПСЭ и ССЭ будут иметь поляризацию, совпадающую с поляризацией импульса-кода. В случае ССЭ подобное совпадение поляризаций реализуется также в случае: $\psi_1 = \psi_3$; $\psi_{ССЭ} = \psi_2$. Справедливость этих поляризационных закономерностей была проверена нами экспериментально.

Отметим, что нами также обнаружена корреляция формы эхо-сигналов с формой возбуждающих импульсов в кристаллах $\text{CaWO}_4 : \text{Nd}^{3+}$ и $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}^{3+}$, что говорит об общем характере обнаруженного эффекта.

Литература

- [1] В.В.Самарцев. ЖПС., 30, 581, 1979.
 - [2] S.Nakanishi, O.Tamura, T.Muramoto, T.Hashi. J. Phys. Soc. Japan., 45, 1437, 1978.
 - [3] Y.C.Chen, K.Chiang, S.R.Hartmann. Optics Comm., 29, 181, 1979.
 - [4] S.Fernbach, W.G.Proctor. J. Appl. Phys., 26, 1170, 1955.
 - [5] Р.Г.Усманов. Сб. "Электромагнитное сверхизлучение". Изд.КФАН СССР, Казань, 1975, стр.100.
 - [6] В.З.Самарцев, Р.Г.Усманов, Г.М.Ершов, Б.Ш.Хамидуллин. ЖЭТФ, 74, 1979, 1978.
 - [7] С.Ф.Елютин, С.М.Захаров, Э.А.Манькин. ЖЭТФ, 76, 835, 1979.
-