

SPIN AND PHOTON ECHO

E. A. MANYKIN

Photon echo is a coherent nonlinear effect. It may serve a tool to study non-equilibrium properties of crystals and other solid state materials. Super high-speed optical processors and fast active optical memory with very large capacity can be built up by means of various photon echo effects.

Фотонное эхо — когерентный нелинейно-оптический эффект. С его помощью можно изучать неравновесные свойства кристаллов. На основе фотонного эха могут быть созданы оптические процессоры и оптоэлектронная оперативная память сверхбольшой емкости.

СПИНОВОЕ И ФОТОННОЕ ЭХО

Э. А. МАНЬКИН

Московский инженерно-физический институт
(технический университет)

ВВЕДЕНИЕ

Цель статьи — рассказать, по возможности качественно, без привлечения математических выкладок, о классе нестационарных физических явлений — эффектах эхо, из которых фотонное эхо — одно из наиболее ярких и обладающих замечательными перспективами практического применения.

Находясь в горах, лесу или просто огромном зале, мы слышим эхо — отражение громко произнесенных звуков с некоторой задержкой во времени. Эхо объясняется отражением звуковых волн от препятствий — склонов гор, опушек леса, стен домов. Это явление известно человеку с незапамятных времен. Само название “эхо” означает имя нимфы, которая превратилась в тень в наказание за свою болтливость (по одной из легенд) так, что она могла повторять только концы слов. Тогда человеку явление эхо казалось таинственным. Человек одушевлял окружающую природу. Сегодня мы бы сказали, что человек неживую природу наделял свойствами искусственного интеллекта: она запоминала сказанную человеком словесную фразу и воспроизводила ее через некоторое время, то есть обладала памятью и свойствами обработки информации. Уже давно явление эхо широко используется в технологии, например при измерении глубины эхолотом, а в нашем XX веке — в радиолокации.

Те явления, которые сегодня включают в название термин “эхо”, имеют совершенно другую физическую природу. Таких явлений очень много: спиновое эхо, фотонное эхо, циклотронное эхо, плазменное эхо, электроакустическое эхо, осцилляторное эхо, поляризационное эхо и др. Во всех этих явлениях мы имеем дело с движением (в основном колебательным или вращательным) большого числа более или менее независимых элементов: механических или магнитных моментов ядер, дипольных моментов атомов или молекул, упругими колебаниями малых частиц или ферроэлектрических и ферромагнитных доменов и т.д. Всем этим явлениям присуще такое свойство, как когерентность и обращение во времени. Под обращением времени следует понимать такой процесс, который повторяет последовательность событий некоторого движения в обратном по ходу времени порядке. В свою очередь, понятие когерентности широко используется в науке в различном контексте. Само слово “когерентность” означает согласованность. В общей физике под когерентностью следует понимать движение нескольких осцилляторов (колебаний) с

постоянной во времени разностью фаз. В оптике для описания явления интерференции световых лучей существует более точное определение, основанное на использовании свойств корреляционных функций источников излучений. В бытовом смысле движение регулярное, синхронизованное для большого числа участников процесса можно считать когерентным, тогда как их случайное, независимое друг от друга хаотическое движение будет некогерентным. На этом далее остановимся подробно, но сначала рассмотрим простую наглядную модель на бытовом, хорошо известном примере для понимания конкретных нестационарных эффектов типа эха.

СОРЕВНОВАНИЕ ИДЕАЛЬНЫХ БЕГУНОВ

Предположим, что проводятся соревнования по бегу на стадионе. Большая группа бегунов выстраивается на стартовой линии, и по первому выстрелу стартера в начальный момент $t = 0$ спортсмены начинают бег. Сделаем одно допущение: все бегуны обладают “идеальной” постоянной скоростью движения во все фазы бега, но скорости у всех разные. Таким образом, первоначально ровная линия бегунов исказится, расстроится. Быстрые бегуны убегут вперед, а более медленные отстанут, так что со временем все бегуны распределятся по замкнутой беговой дорожке более или менее равномерно. По второму выстрелу стартера в момент $t = \tau$, согласно регламенту бега, все бегуны должны двигаться в обратном направлении. Теперь очевидно, что в силу своей “идеальности” спустя промежуток времени, равный интервалу между первым и вторым выстрелом стартера, все бегуны вернутся к стартовой позиции. Из равномерного распределения по беговой дорожке они сгруппируются в ту же линию, что занимали перед стартом. Это произойдет в момент $t = 2\tau$.

Уточним эту модель и взглянем в нее внимательнее. Предположим также, что наши идеальные бегуны обладают идеально стабильной частотой перемещения и длиной шагов, а не только постоянной поступательной скоростью движения. Причем будем также считать, что различия в скоростях и частотах незначительны. Если бы таких различий не было, то все бегуны были бы абсолютно идентичны, а их бег был бы абсолютно синхронным: они бежали бы в ногу, с постоянной скоростью и их стартовое положение сохранялось бы неизменным. При наличии различий в частотах перемещения ног и поступательных скоростях синхронность в их движении сохранялась бы только некоторое время после старта. Затем постепенно движение их ног становилось бы хаотичным (асинхронным) и группа бегунов постепенно размазывалась бы по всей замкнутой беговой дорожке стадиона. После второго выстрела все происходило бы так, как если бы мы засняли на киноплёнку первую половину бега и прокрутили бы эту плёнку в обратном направлении. Как сказано выше, бегуны постепенно стянулись

бы в общую группу к линии старта. Но самое главное то, что постепенно их асинхронное движение становилось бы более упорядоченным и к моменту $t = 2\tau$ они стали бежать в ногу, синхронно и одновременно ударяя ногами по плоскости беговой дорожки. Таким образом, синхронность в их движении, которая имела место в начальный момент времени и которая постепенно исчезла во все последующие времена, вновь была бы восстановлена вблизи момента времени $t = 2\tau$. Обычно беговая дорожка достаточно мягкая, чтобы гасить силу ударов, но если бы она была сделана из упругого материала, скажем из дерева, то в момент синхронизации происходила бы наиболее сильная передача энергии от ног бегунов полотну беговой дорожки.

Это легко понять, потому что при синхронном ударе N ног общий импульс P , передаваемый на дорожку, был бы равен просто сумме всех импульсов каждой ноги, то есть $P = pN$, а передаваемая энергия была бы пропорциональна $P^2 = p^2 N^2$, то есть содержала бы множитель — квадрат числа бегунов. Заметим, что именно это обстоятельство — пропорциональность N^2 — говорит о когерентности процесса и эффективности передачи энергии. В некогерентной фазе бега, когда движения несогласованны, не синхронизованы, каждый бегун передает энергию, пропорциональную просто их общему числу, то есть N . Это типичные характеристики когерентных и некогерентных процессов. Вот почему, в частности, в прошлом веке строю солдат было запрещено идти в ногу по деревянным мостам. Здесь не столько важным являются условия резонанса (когда частота шагов совпадает с собственной частотой колебания моста), а именно когерентность, синхронность движений всего строя. Модель идеальных бегунов в общих чертах правильно отражает свойства совокупности физических явлений типа эха. Только теперь необходимо конкретно указать, что в том или ином физическом процессе типа эха является “бегуном”, выстрелом стартового пистолета и “беговой дорожкой”. Рассмотрим это на примере спинового эха или просто спин-эха.

СПИНОВОЕ ЭХО

Явление спин-эхо состоит в воздействии на систему спинов (магнитных моментов электронов или ядер) двух последовательных радиочастотных импульсов, разделенных некоторым временным интервалом τ . В момент времени $t = 2\tau$ происходит испускание третьего радиочастотного импульса системой спинов, который и называется импульсом эхо. Физические причины, лежащие в основе спин-эха, сводятся к механическому движению магнитных моментов протонов, помещенных в постоянное магнитное поле. Обычно магнитные моменты ориентированы вдоль поля. Электромагнитные волны радиодиапазона производят отклонение этих моментов от направления постоянного поля, так что

после действия радиочастотного импульса они оказываются под некоторым углом θ к нему. Чем больше интенсивность радиоимпульса, тем больше угол отклонения. При отсутствии внешнего радиочастотного воздействия магнитный момент вращается вокруг направления постоянного магнитного поля, как это показано на рис. 1. Говорят, что магнитный момент прецессирует вокруг выделенного направления. По сути в этих случаях и других аналогичных рассматриваемым речь идет о движении соответствующего ротатора. Ротатор представляет собой стержень, один конец которого закреплен, а другой описывает окружность, плоскость которой перпендикулярна оси вращения. Уравнение движения ротатора имеет вид уравнения движения механического волчка:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r},$$

где \mathbf{r} — вектор, характеризующий ротатор, $\boldsymbol{\omega}$ — угловая скорость движения ротатора (правая часть уравнения движения есть векторное произведение этих векторов). Примерами ротаторов являются, например, механический волчок в гравитационном поле, магнитный момент в магнитном поле, двухуровневый атом в резонансном лазерном поле. Мы не будем анализировать решения этого уравнения. Его можно найти в любом учебнике по механике движения твердого тела. Эти и другие подробности по теме данной статьи содержатся в монографии [1].

Рассмотрим качественно, что происходит с системой ротаторов (в данном случае магнитных моментов протонов) при воздействии на нее по-

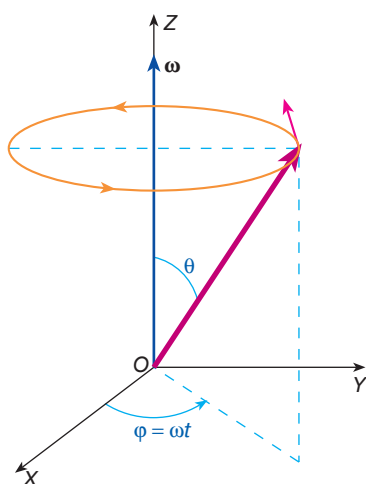


Рис. 1. Прецессия ротатора вокруг оси Z под действием угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$. Ротатор есть вектор, который одним концом закреплен в начале координат O, а другой, свободный его конец совершает равномерное вращение по окружности с центром на оси Z, так что угол θ остается неизменным. $\varphi = \omega t$ — фаза ротатора

следовательно радиоимпульсов. Воздействие радиочастотного импульса сводится к повороту каждого ротатора на некоторый угол θ относительно выделенного направления — вектора постоянной угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$. В состоянии покоя все ротаторы (векторы \mathbf{r}) направлены вдоль вектора $\boldsymbol{\omega}$. В случае спин-эха это означает, что все магнитные моменты протонов направлены вдоль постоянного магнитного поля. Когда угол $\theta = \pi/2$, говорят, что подействовал девяностоградусный импульс радиочастотного поля. В этом случае все ротаторы из первоначального положения вдоль Z перейдут в плоскость XY (как это показано на рис. 2, а, б) и займут, например, положение вдоль оси X, если направление и поляризацию радиочастотного поля подобрать соответствующим образом. После окончания действия радиоимпульса, то есть начиная с момента $t = t_1$, все ротаторы будут прецессировать вокруг направления $\boldsymbol{\omega}$. Обычно магнитное поле неоднородно по образцу, так что все ротаторы находятся по существу в слегка различных магнитных полях (иногда для этой цели в магнитное поле вносят гвоздь, чтобы увеличить неоднородность магнитного поля). Поэтому частоты прецессии у ротаторов несколько различаются. При дальнейшем движении ротаторы равномерно распределятся по кругу, образуя нечто вроде веера. Это показано на рис. 2, в.

Таким образом, бегуном в эффекте спин-эха является ротатор, частота перемещения ног бегуна есть частота прецессии ротатора (то есть его угловая скорость движения по кругу), выстрелом стартера является радиочастотный импульс. Первый импульс у нас был $\pi/2$ -импульс. Оказывается, что если в качестве второго импульса использовать π -импульс, то произойдет обращение времени: движение ротаторов будет повторять их состояния от последнего момента времени до начального, как это имело место в модели идеальных бегунов. Этот импульс называется 180-градусным, или π -импульсом. π -Импульс вызывает поворот ротаторов на угол π вокруг оси Y, как это видно из рис. 2, г: ротатор, имеющий угол φ с осью X до воздействия π -импульса, после его воздействия окажется в положении с углом $\pi - \varphi$ к той же оси X. Иными словами, более медленный ротатор, находящийся в конце вереницы ротаторов, после поворота всего веера ротаторов на угол π оказывается впереди, а более быстрый — в конце вереницы ротаторов. Таким образом, с точностью до постоянной добавки ко всем ротаторам, равной π , фазы ротаторов φ (азимутальные углы ротаторов) приобретают обратный знак! Это и есть обращение движения ротаторов во времени.

Последовательные изменения фаз ротаторов во времени представлены на рис. 2. Синхронизация ротаторов происходит в момент времени $t = 2\tau$, когда более быстрые ротаторы догонят более медленные. В момент синхронизации ротаторов (в данном случае это магнитные моменты протонов) происходит излучение радиоимпульса, интенсивность которого

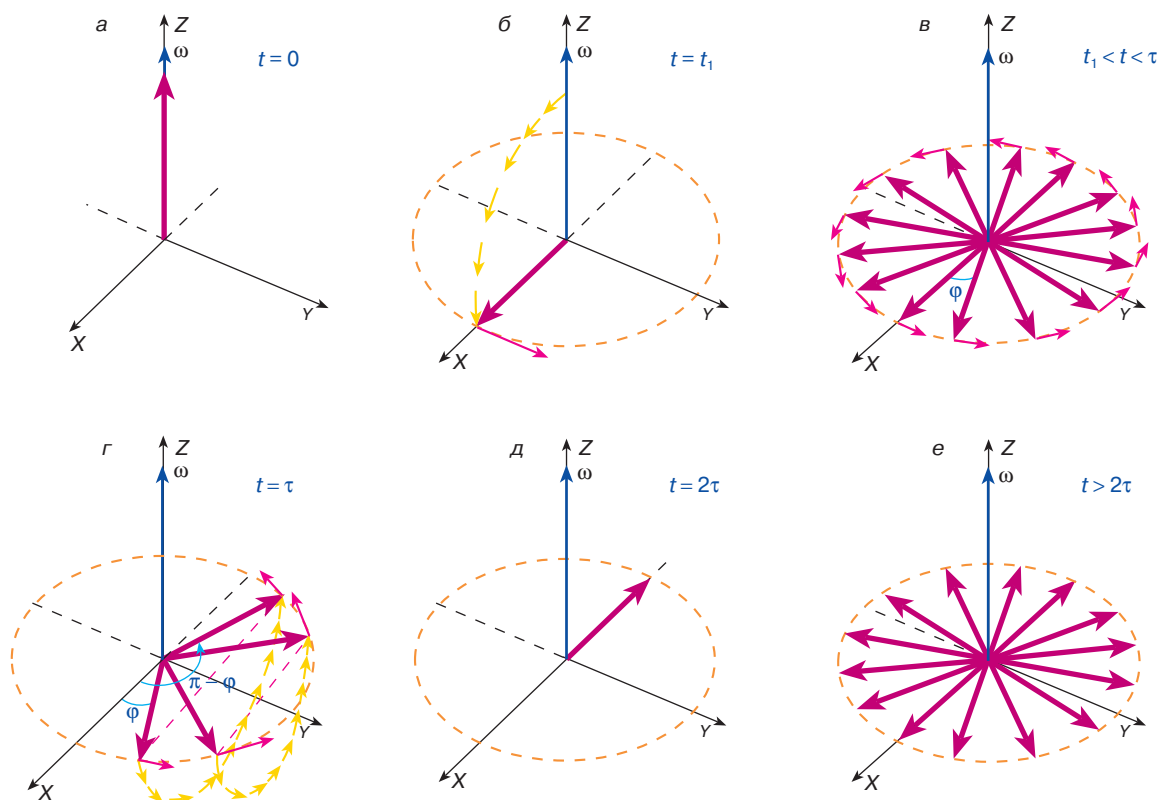


Рис. 2. Поведение системы ротаторов с отличающимися частотами прецессии под воздействием возбуждающих импульсов. *a* – в момент $t = 0$ все ротаторы ориентированы вдоль оси Z . Импульс $\pi/2$ поворачивает все ротаторы одновременно вокруг оси Y ; *б* – в момент окончания действия $\pi/2$ -импульса все ротаторы оказываются в положении вдоль оси X ; *в* – прецессируя с разными угловыми скоростями в указанном интервале времени (τ есть момент действия второго импульса), ротаторы распределяются по всей плоскости XY , образуя своеобразный веер. Движение ротаторов не синхронизовано; *г* – действие второго π -импульса производит поворот всего веера вокруг оси Y на 180° . Показаны положения двух ротаторов перед и после действия π -импульса. Фаза ϕ каждого ротатора меняется на $\pi - \phi$. Более медленный ротатор оказывается впереди более быстрого; *д* – в момент $t = 2\tau$ более быстрые ротаторы догоняют более медленные так, что весь веер схлопывается в положение, когда все ротаторы ориентированы вдоль отрицательного направления оси X . В этот момент движение ротаторов синхронизуется; *е* – в момент $t > 2\tau$ ротаторы вновь дефазированы, разворачиваясь в тот же самый веер, что показан на рис. 2, *в*. Дальнейшее движение ротаторов не синхронизовано

будет пропорциональна квадрату полного числа магнитных моментов в образце. В другие моменты времени движение ротаторов друг относительно друга не синхронизовано. Это приводит к интенсивности излучения, пропорциональной только полному числу магнитных моментов. Излучение в момент синхронизации когерентное, тогда как в другие моменты времени (при отсутствии синхронизации) некогерентное. Последнее значительно меньше первого. Сигнал эха есть сигнал когерентного излучения, поэтому он ярко выделяется в момент $t = 2\tau$ на фоне некогерентного излучения.

Явление спин-эха было открыто в 1950 году американским ученым Г. Ханом несколько лет спустя после открытия магнитного резонанса. В магнитном резонансе используется поглощение веществом квантов электромагнитных волн (фотонов) определенной частоты. При поглощении фотонов меняет-

ся ориентация магнитных моментов частиц вещества – электронов или ядер атомов. Для электронов этот резонанс называется электронным парамагнитным резонансом (ЭПР). ЭПР осуществляется в диапазоне волн сверхвысоких частот (СВЧ), которые лежат в интервале 10^9 – 10^{10} Гц. Для ядер этот резонанс называется ядерным магнитным резонансом (ЯМР). Его частоты лежат в диапазоне коротких радиоволн: 10^6 – 10^7 Гц. Эти спектры очень чувствительны к внутренним магнитным полям в различных веществах, в том числе в биологических тканях живых существ. ЯМР и ЭПР используются для исследования структуры твердых тел и жидкостей в атомной и молекулярной спектроскопии. В частности, на явлении спин-эха основана работа современных томографов, которые позволяют получать изображение внутренних органов человека. Дело в том, что в этом случае системой спинов являются

магнитные моменты протонов, которые суть ядра атомарного водорода. А как известно, человеческий организм в основном состоит из воды, в молекуле которой H_2O содержится два атома водорода.

ФОТОННОЕ ЭХО

Фотонное (световое) эхо или просто фотон-эхо — нелинейный оптический эффект, который также позволяет осуществить обращение времени в системе атомных частиц: атомов, молекул газа и жидкости, примесей в кристаллах, на экситонах полупроводников и других случаях. Это одно из самых красивых когерентных явлений, которое составляет основу целого направления в современной оптике и лазерной технике — оптической эхо-спектроскопии [1]. Фотонное эхо является проявлением взаимодействий ультракоротких световых импульсов с веществом — газами, конденсированными средами, плазмой — и в настоящее время широко применяется для исследования кинетических процессов релаксации элементарных возбуждений в твердых телах. Оно также обладает своеобразной оптической памятью и может служить основой для хранения, обработки и передачи больших массивов информации. Физическая сущность этого явления состоит в следующем.

Пусть в нашем распоряжении имеются источник ультракоротких лазерных импульсов и подходящая резонансная среда. Например, это может быть лазер на красителях, работающий в импульсном режиме, и кристалл рубина (кристалл корунда Al_2O_3 с примесями ионов хрома Cr^{3+}). Частота лазерного излучения подбирается таким образом, чтобы быть резонансной (почти совпадать по величине) к некоторому атомному переходу иона хрома. Именно этот материал использовался в первых экспериментах по обнаружению и изучению фотон-эха. Длина волны оптических импульсов $\lambda = 0,635$ мкм, что соответствовало фотонам энергии $E = h\nu \cong 1,9$ эВ. Эти фотоны могли резонансно поглощаться трехвалентным ионом хрома, замещающим атом алюминия в кристаллической решетке корунда, то есть они переводили хром в возбужденное состояние, отстоящее от основного уровня на энергию фотона. Длительность лазерных импульсов составляла 15–20 нс. Время жизни возбужденного состояния около $T_1 = 20$ мкс, что превосходило длительность импульсов в 1000 раз и позволяло воздействовать многократно на ион хрома в его возбужденном состоянии. В настоящее время используются еще более ультракороткие световые импульсы вплоть до нескольких фемтосекунд (10^{-15} с).

Если через кристалл розового рубина (он содержит хром в качестве примеси в количестве 0,005% по массе) пропустить два последовательных световых импульса с приведенными выше параметрами и интервалом между импульсами $\tau < T_1$, то в системе примесных ионов хрома формируется когерентное

состояние, которое в результате своего распада высвечивает новый оптический когерентный импульс — сигнал двухимпульсного фотонного эха. Таким образом, это явление аналогично явлению спин-эха. Отличие состоит в диапазоне электромагнитного поля излучения: спин-эхо реализуется в радиодиапазоне, фотонное эхо — в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. В радиодиапазоне обычно длина волны намного превосходит размеры образцов резонансной среды, тогда как при световых длинах волн ситуация обратная: $\lambda \ll l$, где l — толщина кристалла рубина. Это приводит к новым свойствам фотонного эха по сравнению со спиновым — возникает определенная направленность эхо-сигнала. Если возбуждающие импульсы являются плоскими волнами, так что второй импульс направлен под некоторым углом к направлению распространения первого, то сигнал эха излучается в направлении под удвоенным углом к первому импульсу (рис. 3), то есть имеет иное направление, чем возбуждающие импульсы. С увеличением интервала между первым и вторым возбуждающими лазерными импульсами величина сигнала эха, как правило, экспоненциально уменьшается.

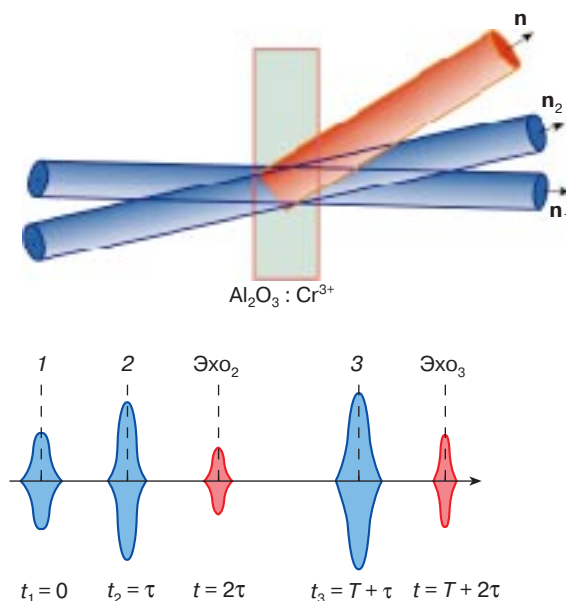


Рис. 3. Схема прохождения лазерных импульсов света через образец из кристалла рубина. \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 — единичные векторы направлений оптических возбуждающих импульсов, действующих в моменты времени $t_1 = 0$ и $t_2 = \tau$, \mathbf{n} — направление возникающего в момент $t = 2\tau$ когерентного отклика среды — сигнала двухимпульсного фотонного эха. На шкале времени указаны моменты действия лазерных импульсов (синий цвет) и моменты возникновения двухимпульсного (Эхо_2) и трехимпульсного (Эхо_3) сигналов эха (красный цвет)

Еще большее значение для научных исследований и приложений имеет трехимпульсное фотонное эхо (это же относится и к спиновому эху и к другим разновидностям когерентных эхо-явлений). Пусть образец (он обычно имеет размер копеечной монеты) подвергается облучению тремя последовательными импульсами (рис. 3, 4). Здесь сигнал фотонного эха возникает после третьего импульса с задержкой, равной интервалу τ между первым и вторым импульсами. На эксперименте оказалось, что затухание трехимпульсного эхо-сигнала часто не зависит от положения во времени третьего возбуждающего импульса. Для плоских волн с волновыми векторами \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 , \mathbf{k}_3 и \mathbf{k} соответственно для первого, второго и третьего оптических импульсов и эхо-сигналов ($\mathbf{k}_i = \mathbf{n}_i \cdot 2\pi/\lambda$; $|\mathbf{n}_i| = 1$; $i = 1, 2, 3$) имеет место следующее соотношение: $\mathbf{k} = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$. Это так называемое условие пространственного синхронизма: распространение сигнала фотонного эха имеет строго определенное направление в соответствии с ним. Часто используется случай обращенного эха, когда $\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_2 = 0$. В этом случае $\mathbf{k} = -\mathbf{k}_1$, то есть направление сигнала фотон-эха противоположно направлению первого импульса возбуждения. Таким образом, в формировании сигнала эха проявляется эффект фазовой памяти. Например, если первый импульс представляет собой в пространстве расходящуюся волну, а два последующих есть плоские волны, направленные противоположно друг другу, то импульс фотон-эха будет сходящейся световой волной. Это означает, что пространственные свойства фотонного эха обладают свойствами явления голографии.

Механизм трехимпульсного эха можно понять на модели идеальных бегунов. Например, пусть при первом выстреле стартера, в момент $t_1 = 0$ группа бегунов начинает бег, при втором выстреле, в момент $t_2 = \tau$, они просто останавливаются. При третьем выстреле, в момент $t_3 = \tau + T$, где T – интервал времени между вторым и третьим возбуждающими импульсами (см. рис. 3), они двигаются в обратном направлении. Тогда все произойдет как и в случае двухимпульсного эха, и спустя время τ после действия третьего импульса бегуны сгруппируются на линии старта и синхронизуют свои шаги. Естественно, что затухание сигнала в этой модели аналогично выбыванию бегунов из соревнования из-за усталости от бега или из-за долгого стояния. Но стоять все же легче, чем бежать! Поэтому время T можно взять значительно больше, чем τ . Несмотря на наивность модели бегунов, она в общем верно передает главные особенности эха – когерентность и движение при обратном отсчете времени.

Физический механизм фотонного эха объясняется в тех же понятиях, что и спиновое эхо. Только для фотонного эха ротатором является не магнитный момент и даже не электрический дипольный момент. Теория взаимодействия лазерной монохроматической волны с двухуровневым атомом, который используется в условиях резонанса, также сводится к уравнению движения ротатора в некоем фиктивном пространстве, где ротатор и угловая скорость суть векторы, компоненты которых есть амплитуды и фазы соответственно монохроматического светового поля, наведенного дипольного момента на резонансном переходе и населенности

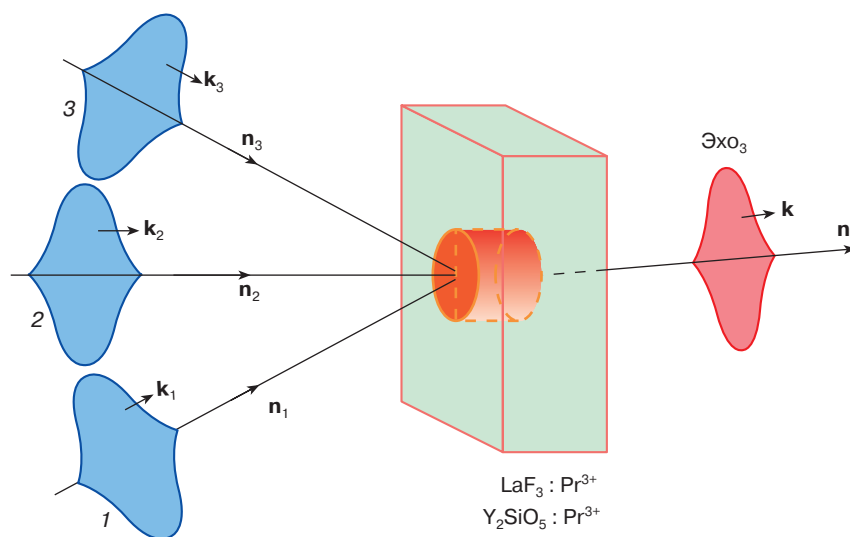


Рис. 4. Схема возбуждения трехимпульсного эха. Фокусировка лазерных пучков из указанных прозрачных кристаллов с примесью трехвалентных ионов празеодима производится в пятно (кружок красного цвета) диаметром 50–100 мкм. \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 , \mathbf{k}_3 и \mathbf{k} – волновые векторы лазерных импульсов и сигнала эха. Теория показывает, что $\mathbf{k} = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1$ для случая плоских волн (условие пространственного синхронизма). Время воздействия лазерных импульсов и момент возникновения сигнала эха показаны на временной шкале рис. 3

возбужденных состояний. Однако в остальном все аналогично спиновому эхо. Иными словами, можно сказать, что первый импульс возбуждает в каждом ионе хрома дипольный момент, колеблющийся с частотой атомного перехода, почти равного (с точностью до ширины энергетического возбужденного состояния) частоте несущей оптической волны. Это как бы частота шагов бегунов, которые здесь есть ионы хрома. Второй импульс в двухимпульсном эхе и третий импульс в трехимпульсном эхе производит обращение времени так же, как и в спиновом эхе. В момент $t = 2\tau$ происходит синхронизация в колебаниях ионов, а это обстоятельство создает наведенный дипольный момент $P = Np$, где p — дипольный момент отдельного иона, а N — общее число ионов в единице объема (макроскопический дипольный момент вещества). Из теории Максвелла и опыта известно, что колеблющийся макроскопический дипольный момент излучает классические электромагнитные волны (в данном случае они соответствуют видимому диапазону — световым волнам). Это и приводит к возникновению явления фотонного эха.

Явление фотонного (светового) эха было предсказано в 1962 году казанскими физиками У.Х. Конвиллемом и В.Р. Нагибаровым, причем в качестве возможного объекта эксперимента они предлагали именно кристалл рубина. Двумя годами позже появилось статья американских ученых Н. Курнита, И. Абеллы и С. Хартмана в “Physical Review Letters” с подробным экспериментом по наблюдению фотонного эха. Позднее были выполнены эксперименты по обнаружению и исследованию других нестационарных нелинейно-оптических процессов: оптической нутации, распаду свободной индукции, раман-эхо и сверхизлучению. О последнем эффекте можно почитать в “Соросовском Образовательном Журнале” [2, 3]. С тех пор и по настоящее время наблюдалось огромное количество разнообразных эффектов типа эха в разных веществах: газах Na, K, Cs, BCl_3 , SF_6 , во многих органических соединениях, кристаллах, например $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{3+}$, $\text{Y}_2\text{SiO}_5 : \text{Pr}^{3+}$, $\text{CaWO}_4 : \text{Nd}^{3+}$, $\text{YAlO}_3 : \text{Er}^{3+}$, многих полупроводниках. По спаду интенсивностей сигналов эха измеряются различные времена релаксации: время спин-спиновой и спин-решеточной релаксации, параметры электрон-электронного и электрон-фононного взаимодействия и др.

За прошедшие годы были изучены многие необычные свойства фотонного эха самых разнообразных модификаций. Например, эха в многоуровневых системах, эха при многофотонном резонансе, модифицированного эха. Используя технику фотонного эха получают богатую информацию о структуре, динамике, кинетических процессах кри-

сталлических и аморфных веществ, полупроводников и диэлектриков, сверхпроводников, а также разнообразных жидкостей и газов. Удалось измерить многие их параметры с сверхвысокой точностью, недоступной какими-либо другими методами. Возникла новая область научных исследований — оптическая эхо-спектроскопия.

Явление фотонного эха обещает целый ряд перспективных технических применений в области оптоэлектроники. Дело в том, что в отличие от магнитных резонансов ЭПР и ЯМР фотонное эхо обладает всеми преимуществами оптического диапазона, а именно сверхбыстродействием и многоканальностью. То есть можно создать такие условия, при которых в кристалле размером 1 см параллельно будет работать большое количество световых лучей (порядка 10^8), состоящих из оптических импульсов длительностью в 1 пс (10^{-12} с). В настоящее время разработан принцип работы и сделаны макеты устройств оптической памяти большой емкости для использования в компьютерных системах. Созданы лабораторные устройства по автоматической обработке информации — фильтры, смесители, разветвители, логические элементы, векторно-матричные умножители, системы распознавания образов и устройств искусственного интеллекта. Разработки продолжают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маныкин Э.А., Самарцев В.В. Оптическая эхо-спектроскопия. М.: Наука, 1984. 270 с.
2. Железняков В.В. Что такое сверхизлучение // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 4. С. 52–54.
3. Трифонов Е.Д. Сверхизлучение — спонтанное излучение многоатомной системы // Там же. 1996. № 12. С. 75–80.

* * *

Эдуард Анатольевич Маныкин, доктор физико-математических наук, профессор Московского инженерно-физического института, зав. отделом Института сверхпроводимости и физики твердого тела Российского научного центра “Курчатовский институт”, зам. главного редактора “Журнала экспериментальной и теоретической физики” (ЖЭТФ). Область научных интересов: физика полупроводников и диэлектриков, теория сверхпроводимости, лазерная физика, нелинейная оптика и оптоэлектроника. Автор и соавтор свыше 150 научных работ, в том числе шести монографий и учебных пособий, десяти патентов и изобретений, нескольких обзоров и популярных статей.