

COHERENCE,
INVERSIONLESS
AMPLIFICATION,
AND INDUCED
TRANSPARENCY
IN QUANTUM
TRANSITIONS

A. K. POPOV

The origin of interference processes in quantum transitions which result in unusual appearances in optical physics is explained. Experimental examples are given which prove the potentials of new possibilities in the physics of lasers and nonlinear optics.

Объяснены причины возникновения интерференционных явлений на квантовых переходах, которые приводят к необычным явлениям в оптической физике. Приведены экспериментальные результаты и обсуждены принципиально новые возможности в физике лазеров и нелинейной оптике.

**КОГЕРЕНТНОСТЬ,
БЕЗЫНВЕРСНОЕ УСИЛЕНИЕ
И ИНДУЦИРОВАННАЯ
ПРОЗРАЧНОСТЬ НА КВАНТОВЫХ
ПЕРЕХОДАХ**

А. К. ПОПОВ

Красноярский государственный университет

Красноярский государственный технический университет

Когерентность и интерференция — это фундаментальные, тесно связанные между собой физические явления. Когерентность (от лат. *cohaerens* — находящийся в связи) — коррелированное протекание во времени и пространстве нескольких случайных колебательных или волновых процессов, позволяющее получить при их сложении четкую интерференционную картину. Интерференция волн (от лат. *inter* — взаимно, между собой и *ferio* — ударяю, поражаю) — взаимное усиление или ослабление двух (или большего числа) волн при наложении их друг на друга при одновременном распространении в пространстве. Обычно под интерференционным эффектом понимается отличие результирующей интенсивности волнового поля от суммы интенсивностей исходных волн. Первоначально понятия когерентности и интерференции возникли в оптике, однако они относятся к волновым полям любой природы: электромагнитным волнам произвольного диапазона, упругим волнам, волнам в плазме, квантово-механическим волнам амплитуды вероятностей (то есть к внутриатомным процессам) и т.д. Под когерентностью света понимается взаимная согласованность световых колебаний в разных точках пространства и/или во времени, а под интерференцией света — пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн. Некоторые явления интерференции света исследовал еще Исаак Ньютон в XVII веке, но он не мог объяснить их с точки зрения своей корпускулярной теории. Впервые экспериментальную установку для демонстрации интерференции света построил Томас Юнг в начале XIX века. Совместно с Огюстеном Френелем он дал правильное объяснение этого явления. Для получения стационарной (постоянной во времени) интерференционной картины необходима когерентность складываемых колебаний, то есть постоянство во времени (или регулярность изменения) их разности фаз. (Более подробно об интерференции и основанных на ней принципах голографии см. [1].)

Как уже упоминалось, интерференционные явления присущи колебаниям любой природы. С созданием лазеров в распоряжении физиков появились источники когерентных (регулярных в пространстве и во времени) электромагнитных колебаний с частотой, резонансной колебаниям внутриатомных электронов. Таким образом, появилась возможность осуществлять интерференционные процессы на квантовых переходах атомов и молекул, ответственных за оптические свойства в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом (вплоть до мягкого рентгеновского) диапазонах. С помощью лазерного излучения стало возможным манипулировать этими характеристиками, что эквивалентно созданию материалов с новыми необычными свойствами. Наблюдаемые эффекты столь необычны, что иногда противоречат устоявшимся представлениям оптики и спектроскопии.

КАК СВЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВУЕТ С АТОМАМИ И МОЛЕКУЛАМИ

Многие оптические явления можно объяснить с использованием модели классического осциллятора. В этой модели атом представляется как диполь, состоящий из двух зарядов: положительного и отрицательного, находящихся в равновесии на некотором расстоянии. Если заряды отклонить от положения равновесия, то они начинают совершать колебательное движение с некоторой частотой, которая называется собственной частотой. Для атомных электронов эта частота обычно лежит в оптическом диапазоне, включающем инфракрасную, видимую и ультрафиолетовую области. Под действием переменного электрического поля заряды начинают совершать вынужденные колебания. Амплитуда колебаний резко возрастает по мере приближения частоты излучения к собственной частоте колебаний (явление резонанса). Колебания представляют собой движение, при котором ускорение сменяется замедлением. Неравномерно движущийся заряд отрывается от своего электрического поля, то есть происходит излучение и как следствие – потеря его энергии. Кроме того, атом взаимодействует с окружающей средой. За счет этого происходит дополнительная потеря энергии. В результате свет поглощается. При этом поглощение носит резонансный характер.

Классическая физика достаточно хорошо описывает поведение макроскопических объектов. Для полного объяснения закономерностей, присущих объектам микромира, к которым относятся атомы и молекулы, классических представлений оказывается недостаточно. Это достигается лишь с помощью законов квантовой физики. Согласно им, энергия колебаний связанных атомных электронов квантуется. Иными словами, она не может изменяться непрерывно, а может принимать лишь некоторые определенные значения. Этим значениям энергии

сопоставляют энергетические уровни E_j (рис. 1), и говорят: атом (молекула) находится на энергетическом уровне j . Соответственно атом поглощает и отдает энергию порциями (квантами).

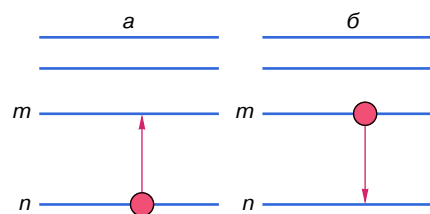


Рис. 1. Энергетические уровни и квантовые переходы с поглощением (а) и испусканием (б) излучения

Если обмен энергией происходит с электромагнитным полем, то соответствующие кванты света называются фотонами. При переходе между энергетическими уровнями m и n энергия фотонов $\hbar\omega_{mn} = E_m - E_n$, где $\hbar = 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка, а ω_{mn} называется частотой перехода. Частота резонансного излучения равняется частоте перехода. Поскольку первичными источниками света являются микрочастицы, его энергия также изменяется дискретно, то есть квантована. При переходе атома на более высокий уровень (рис. 1, а) фотоны поглощаются, при переходе на более низкий (рис. 1, б) испускаются.

Квантовые представления необычны с точки зрения классической физики. Их пришлось ввести в конце прошлого – начале нашего века для объяснения экспериментально наблюдавшихся закономерностей поглощения и испускания излучения нагретыми черными телами. Оказавшаяся фундаментальной для всей современной физики постоянная \hbar была введена Максом Планком в 1900 году. Революционные квантовые представления положили начало бурному развитию физики и новых направлений техники.

Следующее важное представление, имеющее непосредственное отношение к теме статьи, связано с понятиями спонтанного и вынужденного испускания света. Они были введены Альбертом Эйнштейном (который более известен как один из создателей теории относительности) в 1916 году для объяснения закономерностей, связанных с излучением нагретых черных тел, находящихся в равновесии с этим излучением. Эйнштейн пришел к выводу, что существуют два различных процесса испускания света атомами и молекулами вещества. Наряду с самопроизвольным (спонтанным) испусканием должно существовать вынужденное (стимулированное) – под действием фотонов излучения. При этом вынужденно испущенные фотоны должны обладать теми же свойствами, что и вынуждающие. Прошли десятилетия, прежде чем ученые убедились, что

вынужденные квантовые переходы не только существуют, но и могут иметь решающее значение для важнейших применений.

ДЕСТРУКТИВНАЯ И КОНСТРУКТИВНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ

Как уже отмечалось, интерференция — одно из фундаментальных физических явлений. Складываясь, колебания различной природы могут интерферировать как конструктивно (усиливая результирующее колебание), так и деструктивно (подавляя его полностью либо частично) в зависимости от соотношения фаз. Варьируя фазы и амплитуды колебаний, можно манипулировать результирующим процессом, усиливая его либо, наоборот, подавляя до необходимого уровня. Как уже подчеркивалось, для проявления интерференции необходима когерентность (постоянство в течение достаточно продолжительного промежутка времени разности фаз) колебаний. Таким образом, интерференция служит мерой когерентности колебаний. Характерной чертой интерференции является сохранение интегральных характеристик процесса. Так, например, интерференция встречных волн с одинаковой интенсивностью I может приводить к нулевым интенсивностям колебаний в одних участках пространства и учетверению в других:

$$I_s = 2I - 2I\cos(kz).$$

При этом суммарная по пространству энергия сохраняется. Оказывается, что аналогичные явления можно реализовать и на квантовых переходах атомов и молекул.

Как мы уже знаем, квантовым переходам в классической физике соответствуют внутриатомные колебания зарядов. Если излучение возбуждает одновременно несколько когерентных колебаний с близкими частотами, эти вынужденные колебания могут интерферировать, подавляя или усиливая друг друга в зависимости от соотношения фаз. Очевидно, что подобные явления кардинально проявятся в оптических свойствах вещества. Один из примеров представлен на рис. 2, где энергии уровней n_1 и n_2 близки друг к другу. Если вначале атом находится на уровне m , то под действием излучения с частотой, близкой к частоте обоих переходов $m n_1$ и $m n_2$, атом может перейти либо на уровень n_1 , либо на n_2 . Совершенно аналогично, если атом находится на одном из указанных нижних уровней, он поглощает излучение. Таким образом, в каждом атоме возбуждается лишь один осциллятор.

Теперь представим, что каким-либо образом атом попал в нижние состояния так, что может с некоторой вероятностью находиться как на одном, так и на другом из подуровней, причем соотношение этих вероятностей сохраняется либо изменяется по регулярному закону во времени (рис. 2). В

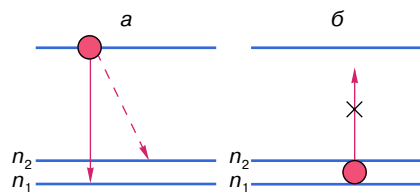


Рис. 2. Усиление без инверсии заселенностей. Независимые квантовые переходы с излучением (а) и подавление поглощения за счет интерференции переходов при когерентном возбуждении нижних подуровней (б)

этом случае говорят, что атом находится в когерентной суперпозиции состояний n_1 и n_2 и может одновременно участвовать в переходах с обоих нижних уровней на верхний. Возбуждаются сразу два осциллятора с близкими частотами, которые, деструктивно интерферируя, могут полностью подавить друг друга. В этом случае атомный электрон остается неподвижным и не участвует в поглощении. При этом в другой области частот поглощение возрастает.

Наряду с однофотонными переходами, о которых шла речь выше, возможны двухфотонные переходы. При этом атом одновременно поглощает (либо поглощает и испускает) сразу два фотона $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$ и переходит с уровня n на g (рис. 3). В присутствии двух излучений с указанными частотами в атоме возбуждаются колебания на частотах ω_1 , ω_2 и как следствие на частоте $\omega_1 + \omega_2 = \omega_{gn}$ (рис. 3, а) или $\omega_1 - \omega_2 = \omega_{gn}$ (рис. 3, б, в). В этом случае атом вновь находится в когерентной суперпозиции состояний n и g . Если при этом частоты ω_1 и ω_2 близки к частотам соответствующих переходов, то поглощение фотонов $\hbar\omega_1$ может происходить как в результате одно-, так и двухфотонных процессов (двух квантовых путей). Им соответствуют внутриатомные осцилляции на одной и той же частоте, которые также могут интерферировать либо конструктивно, либо деструктивно в зависимости от соотношения их фаз. Это соотношение можно при определенных условиях изменять за счет небольших перестроек частот около их резонансов. В этом случае иногда говорят об интерференции квантовых путей. При деструктивной

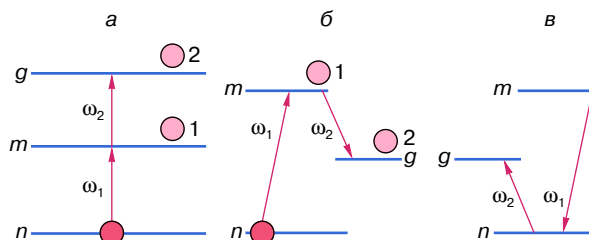


Рис. 3. Схемы взаимодействия двух излучений, в которых может реализоваться интерференция квантовых переходов

интерференции атомный электрон может оставаться неподвижным даже в присутствии резонансных полей, при конструктивной – совершать колебания со значительно большей амплитудой по сравнению с отсутствием квантовой интерференции.

“Оптическая поляризация – это осциллирующий на соответствующей частоте дипольный момент в единице объема среды. Результаты квантовомеханических вычислений поляризации на частоте ω_1 в присутствии сильного поля на частоте ω_2 с интенсивностью I для атомов и молекул имеют громоздкий вид. Однако структура формулы может быть представлена в виде суперпозиции двух компонент с одинаковыми частотами, но – в общем случае – с разными фазами и амплитудами:

$$P(\omega_1) \propto E_1[\Delta N_{mn}(I) + \Delta N_{mg}(I)F_1(I, \delta\omega_{gn}, \delta\omega_{mn}, \delta\omega_{mg})] \times F_2(I, \delta\omega_{gn}, \delta\omega_{mn}, \delta\omega_{mg}). \quad (1)$$

Здесь E_1 – амплитуда пробного поля на частоте ω_1 ; ΔN_{mn} и ΔN_{mg} – соответствующие разности заселенностей, зависящие от интенсивности излучения, F_1 и F_2 – некоторые комплексные функции интенсивности и отстройки от резонансов, $\delta\omega_{mn} = \omega_1 - \omega_{mn}$, $\delta\omega_{mg} = \omega_2 - \omega_{mg}$, $\delta\omega_{gn} = \omega_1 \pm \omega_2 - \omega_{gn}$, ω_{ij} – частоты соответствующих переходов. Одна из компонент (первое слагаемое в (1)) может возбуждаться излучением на частоте ω_1 и при отсутствии дополнительного излучения, тогда как другая – лишь совместно с ним. Таким образом, в терминах интерференции наблюдаемые необычные оптические эффекты получают простую физическую интерпретацию. Соотношением амплитуд и разностью фаз этих компонент можно манипулировать, меняя интенсивность сильного излучения I , его отстройку от резонанса и исходные заселенности уровней. За счет изменения соотношения фаз компонент конструктивную интерференцию можно обратить в деструктивную (частичную или полную) и наоборот. Мнимая часть выражения (1) определяет показатель поглощения или усиления, а действительная – показатель преломления на частоте ω_1 . Таким образом, появляется возможность манипулировать обеими важнейшими характеристиками среды.

ПРИМЕНЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ

Очевидно, что открывающиеся возможности избирательно подключать или отключать от взаимодействия с резонансным электромагнитным излучением атомы, находящиеся на определенных энергетических уровнях, найдут широкие применения. Рассмотрим некоторые из таких примеров.

Усиление и генерация света без инверсии заселенностей

Как уже отмечалось, возбужденные атомы могут излучать фотоны как самопроизвольно (спонтанно), так и вынужденно – под действием резонанс-

ного излучения. Спонтанное излучение изотропно по направлениям распространения и поляризации и немонохроматично. Его частоты распределены в пределах ширины резонансов. В этом смысле оно обладает низким качеством. Вынужденное излучение обладает теми же свойствами, что и вынуждающее, и, добавляясь к нему, приводит к усилению этого излучения. Такое излучение монохроматично и когерентно. Усилению противостоит другой вынужденный процесс – поглощение фотонов (рис. 1). Выделяемая за счет вынужденного излучения в единице объема мощность W_i и поглощаемая W_a определяются выражениями

$$W_i \propto N_m w_i(I), \quad W_a \propto N_n w_a(I). \quad (2)$$

Здесь $N_{m,n}$ – число атомов в единице объема, способных соответственно излучать и поглощать (заселенности верхнего и нижнего уровней), $w_{i,a}(I)$ – вероятности вынужденного излучения и поглощения под действием излучения с интенсивностью I . Если разность $\Delta W = W_i - W_a$ положительна, происходит усиление, в противном случае – поглощение этого излучения. Исходя из выведенных А. Эйнштейном соотношений, обычно предполагалось, что $w(I) = w_a(I)$. Отсюда следует необходимость достижения превышения заселенности верхнего уровня по сравнению с нижним ($\Delta N_{mn} = N_m - N_n > 0$) для получения усиления излучения за счет квантовых процессов. Иными словами, требуется инверсия заселенностей уровней по сравнению со случаем термодинамического равновесия, когда число атомов на верхнем уровне всегда меньше, чем на нижнем.

Для создания инверсной заселенности энергетических уровней используют возбуждение атомов и молекул за счет кинетической энергии электронов в газовых разрядах, энергии фотонов немонохроматического излучения, энергии химических реакций и т.д. При этом скорость возбуждения должна быть такова, чтобы за характерное время их пребывания в возбужденном состоянии успеть накопить на верхнем уровне больше частиц, чем на нижнем (более подробно см., например, [2]).

Трудности решения этой проблемы резко возрастают при переходе к вакуумно-ультрафиолетовому и рентгеновскому диапазонам [3]. Это связано с тем, что времена жизни атомов и ионов на возбужденных уровнях по отношению к спонтанной релаксации обратно пропорциональны кубу частот соответствующих переходов и резко уменьшаются в коротковолновом диапазоне. На рентгеновских переходах это время составляет $\tau \sim 10^{-12} - 10^{-15}$ с. Для того чтобы успеть за это время создать значительную инверсию заселенностей, приходится прибегать к использованию возбуждения в плазме, образующейся с помощью взрывов или сверхкоротких импульсов лазеров длинноволнового диапазона. Решение проблемы усиления при отсутствии инверсии, над которой работают физики, открыло бы

принципиально новые подходы к решению этой фундаментальной задачи.

Идея состоит в том, чтобы, используя квантовую интерференцию, добиться различия вероятностей вынужденного усиления и поглощения и, исключив взаимодействие излучения с поглощающими атомами, оставить лишь вынужденное испускание возбужденных атомов. При этом инверсии заселенностей не требуется [4–6].

Принципиальная возможность добиться различия вероятностей поглощения и испускания обсуждалась выше на примере рис. 2 и 3.

Для случая, изображенного на рис. 2, мы оставили в стороне вопрос о природе подуровней и конкретном способе создания когерентности между ними. Для случая рис. 3 когерентная суперпозиция квазиуровней создается с помощью излучения, резонансного смежному переходу.

Из формулы (1) следует, что даже при отрицательных значениях ΔN_{mn} и ΔN_{gn} , что соответствует поглощению на обоих переходах при отсутствии интерференции, добиваясь изменения знака второго слагаемого (разности фаз, равной π), можно получить усиление без инверсии или прозрачность среды (электромагнитно-индуцированную прозрачность).

Как уже отмечалось, интерференция не меняет интегральных характеристик процессов. В данном случае такой характеристикой является интегральное по частоте ω , поглощение или усиление. Их изменение может быть обусловлено лишь изменением разности заселенности ΔN_{mn} под действием дополнительного поля. Следовательно, в условиях квантовой интерференции резонансы могут приобретать знакопеременную форму. Возникновение усиления или прозрачности в одной области частот (в области резонанса) сопровождается увеличением поглощения в другой. Резонансы приобретают необычный вид (более подробно см. [5]).

В последние годы опубликовано значительное количество работ, посвященных детальному изучению процессов квантовой интерференции и поиску конкретных схем их экспериментальной реализации для различных применений, включая индуцированную прозрачность и усиление без инверсии [4–9].

Лазерно-индуцированная прозрачность

При приближении частоты электромагнитного излучения к атомным резонансам поглощение резко возрастает. Для непрерывного излучения увеличить прозрачность можно за счет выравнивания населенностей верхнего и нижнего уровней с помощью вынужденных переходов. Этот эффект называется эффектом насыщения. Он возможен лишь для очень интенсивного излучения. Возбужденные атомы отдают свою энергию в спонтанное излучение и окружающую среду, стремясь перейти на нижний

уровень. Такие процессы называются релаксационными. В результате на обеспечение и поддержание выравнивания требуется значительная мощность излучения.

После включения излучения атомы начинают совершать вынужденные переходы между уровнями с некоторой частотой, пропорциональной интенсивности излучения. Эту частоту называют частотой Раби. С течением времени успевают проявиться релаксационные процессы, которые некогерентны и для разных атомов проявятся через разные промежутки времени. В итоге через промежуток времени, значительно больший среднего времени релаксации, разные атомы окажутся на разных уровнях и в сильном поле проявится эффект насыщения. Пусть излучение имеет вид короткого импульса с длительностью, существенно меньшей времени релаксации. Для переходов в видимом диапазоне это время обычно лежит в интервале от нескольких наносекунд до пикосекунд. Если частоту Раби (интенсивность излучения) подобрать так, чтобы импульс завершился в тот момент, когда атомы окажутся вновь на нижнем уровне (2π -импульс), то такой импульс пройдет через резонансную среду без потерь. Эффект называется самоиндуцированной прозрачностью. Обычно это должны быть очень мощные импульсы, кроме того, на больших длинах даже незначительные проявления релаксации успевают накапливаться, приводя к нарастающим потерям излучения, обусловленным нарушением условия 2π -импульса.

Использование квантовых интерференционных явлений позволяет найти принципиально иное решение проблемы, в том числе и для сколь угодно слабого непрерывного излучения. На рис. 4 проиллюстрированы результаты экспериментов с парами стронция [8]. До включения зеленого излучения с длиной волны 570,3 нм в широком интервале длин волн около 337,1 нм пары были практически непрозрачны для этого ультрафиолетового излучения. После включения зеленого излучения за счет деструктивной интерференции квантовых путей 1–3 и 1–3–2 оптический электрон практически перестал взаимодействовать с ультрафиолетовым излучением в некотором интервале частот. Около 40% излучения стало проходить через среду.

Возможны самые разные применения этого эффекта. Например, если газовая среда состоит из смеси двух изотопов с очень близкими спектральными линиями поглощения, то поглощение редкого изотопа маскируется поглощением компонента с большим содержанием. Селективно создавая окно прозрачности на частоте последнего за счет квантовой интерференции, можно обеспечить регистрацию поглощения и, следовательно, определение содержания в смеси редкого изотопа.

Вблизи от резонанса показатель преломления начинает сильно зависеть от частоты (увеличение

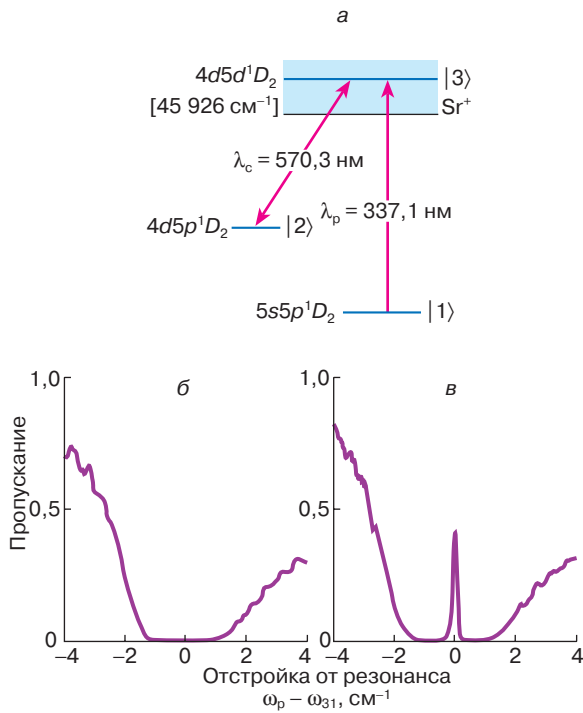


Рис. 4. Лазерно-индуцированная прозрачность на переходах стронция [8]: а – схема переходов (λ_p – пробное, λ_c – индуцирующее излучение); б – полное поглощение в центре перехода при нулевой интенсивности и в – возникновение прозрачности в интенсивном индуцирующем излучении

дисперсии) (рис. 5, б). Квантовая интерференция приводит к существенному изменению этой зависимости. Если интерференция приводит к такому изменению формы резонанса, как это изображено на рис. 5, а, то соответствующее изменение дисперсии представлено на рис. 5, б. Обратный ход по сравнению с обычной аномальной дисперсией в центре и исключительно большая крутизна этого участка могут быть использованы для замедления групповой скорости импульсов света в среде вплоть до нескольких десятков метров в секунду! Из-за отсутствия поглощения концентрацию атомов можно увеличивать до таких значений, что получается вещество с гигантским показателем преломления, отсутствующим в природе для прозрачных сред. Одним из веществ, обладающих самым большим коэффициентом преломления, является алмаз. (Этим обусловлено сверкание бриллиантов.) Оценки показывают, что сочетание близкого к нулевому поглощения и резонансное увеличение показателя преломления могут быть использованы для создания материала с показателем преломления, превышающим таковой в алмазе.

Другие предложения касаются возможности построения сверхчувствительных измерителей слабых магнитных полей. Если поместить газ или пары со

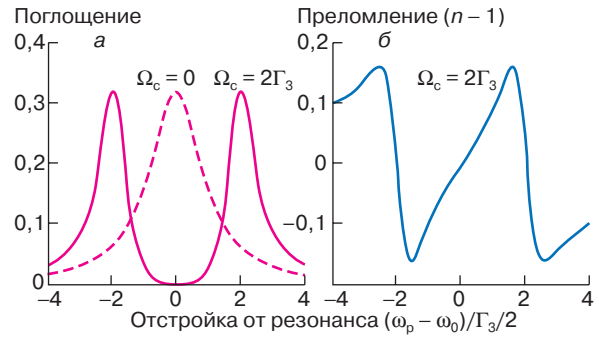


Рис. 5. Частотные зависимости показателя поглощения (а) и преломления (б) в области резонанса, когда частота Раби в два раза превышает невозмущенную ширину резонансного перехода [8]

столь резкой дисперсией в интерферометр, то незначительное смещение уровней во внешних магнитных полях скажется на условиях квантовой интерференции и как следствие проявится в значительном смещении интерференционных полос оптического интерферометра.

Интенсивное излучение изменяет показатель преломления на своей частоте в пределах сечения лазерного пучка за счет нелинейных эффектов. Если интенсивность излучения, распространяющегося в газовой среде, превышает некоторое значение, зависящее от близости к резонансу, то однородность пучка разрушается за счет явления самофокусировки. В экспериментах с парами свинца было показано, что использование квантовой интерференции позволяет подавить эффект самофокусировки и сохранить однородность пучка даже при увеличении его интенсивности в 10 000 раз [8, 9].

Подобно тому как различаются положение и форма лазерно-индуцированных резонансов в показателях поглощения и преломления, они отличаются и в нелинейных восприимчивостях, ответственных за резонансно усиленное нелинейно-оптическое преобразование частот лазерного излучения в газобразных средах. С помощью эффектов квантовой интерференции оказывается возможным осуществить увеличение нелинейной восприимчивости и одновременно уменьшить поглощение генерируемого излучения, а также улучшить фазовое согласование распространяющихся исходного и генерируемого излучений, необходимое для эффективной нелинейно-оптической генерации.

Таким образом, использование фундаментальных законов классической оптики и квантовой физики в сочетании с уникальными свойствами лазерного излучения открывает качественно новые возможности перед оптической физикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слабко В.В. Принципы голографии // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 7. С. 87–94.
2. Сэм М.В. Лазеры и их применение // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 6. С. 92–99.
3. Слабко В.В. Рентгеновский лазер: Возможности реализации // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1. С. 79–86.
4. Scully M.O., Fleischhauer M. Lasers without Inversion // Science. 1994. Vol. 263. P. 337–338.
5. Попов А.К. Усиление без инверсии и лазерно-индуцированная прозрачность на дискретных переходах и переходах в континуум // Изв. РАН. Сер. физ. 1996. Т. 60, вып. 6. С. 9–120.
6. Попов А.К. Введение в нелинейную спектроскопию. Новосибирск: Наука, 1983. 274 с.
7. Геллер Ю.И., Попов А.К. Лазерное индуцирование нелинейных резонансов в сплошных спектрах. Новосибирск: Наука, 1981. 160 с.
8. Levi B.G. Some Benefits of Quantum Interference Become Transparent // Phys. Today. 1992. May. P. 17–19.
9. Harris S.E. Electromagnetically Induced Transparency // Ibid. 1997. July. P. 36–42.

* * *

Александр Кузьмич Попов, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой Красноярского государственного университета, профессор Красноярского государственного технического университета и зав. лабораторией Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН, член-корреспондент Сибирского отделения Международной академии наук высшей школы. Область научных интересов – оптическая и лазерная физика, резонансная нелинейная оптика атомных, молекулярных и кластерных сред. Автор и соавтор трех монографий и более 200 научных публикаций.