

Гетеродинный прием.

Ранее мы упоминали о гетеродинном приеме сигналов ЗСП и фотонного эха при штарковском переключении частоты. Обсудим теперь преимущества гетеродинного приема сигналов.

Направим на приемник света две световые волны с частотами ω_1 и ω_2 . Пусть амплитуда одной волны гораздо больше амплитуды второй волны $\mathcal{E}_{01} \gg \mathcal{E}_{02}$. Этот способ регистрации называется гетеродинным приемом слабого сигнала.

Рассмотрим интенсивность суммарной волны, которая пропорциональна среднему по времени квадрату напряженности суммарного светового поля:

$$\begin{aligned} I &\sim \left\langle E^2(t) \right\rangle_t = \left\langle \left(\mathcal{E}_{01} \cos(\omega_1 t) + \mathcal{E}_{02} \cos(\omega_2 t) \right)^2 \right\rangle_t = \\ &= \mathcal{E}_{01}^2 \left\langle \cos^2(\omega_1 t) \right\rangle_t + \mathcal{E}_{02}^2 \left\langle \cos^2(\omega_2 t) \right\rangle_t + \\ &\quad + \mathcal{E}_{01} \mathcal{E}_{02} \left\langle \cos((\omega_1 + \omega_2)t) \right\rangle_t + \mathcal{E}_{01} \mathcal{E}_{02} \left\langle \cos((\omega_1 - \omega_2)t) \right\rangle_t \end{aligned}$$

Здесь квадрат каждого косинуса в среднем равен половине, а косинус суммарной оптической частоты в среднем равен нулю. Косинус разностной частоты усреднять не следует, если эту разностную частоту позволяет зарегистрировать быстродействие приемника света. Тогда получим

$$I \sim \frac{1}{2} \mathcal{E}_{01}^2 + \frac{1}{2} \mathcal{E}_{02}^2 + \mathcal{E}_{01} \mathcal{E}_{02} \cos((\omega_1 - \omega_2)t).$$

Предположим теперь, что первая световая волна имеет постоянную амплитуду, а амплитуда второй световой волны мала и представляет собой интересующий нас сигнал ЗСП или фотонного эха. В таком случае в фототоке приемника образуются три слагаемых пропорциональные трем слагаемым интенсивности света, падающего на приемник.

Первое слагаемое $\frac{1}{2} \mathcal{E}_{01}^2$ постоянно и не несет никакой информации.

Второе слагаемое $\frac{1}{2} \mathcal{E}_{02}^2$ пропорционально интенсивности интересующего нас сигнала, третье слагаемое фототока на частоте $\omega_1 - \omega_2$ имеет амплитуду пропорциональную амплитуде интересующей нас волны и тоже несет информацию об интересующем нас сигнале. С учетом неравенства $\mathcal{E}_{01} \gg \mathcal{E}_{02}$ оказывается, что третье слагаемое гораздо больше второго. Следовательно, постоянная засветка приемника света световой волной с большой, но очень стабильной амплитудой \mathcal{E}_{01} , позволяет регистрировать оптические сигналы с малой амплитудой \mathcal{E}_{02} . Отношение амплитуд третьего $\mathcal{E}_{01} \mathcal{E}_{02}$ и второго \mathcal{E}_{02}^2 слагаемых показывает, что гетеродинный прием позволяет увеличить слабый сигнал в $\frac{\mathcal{E}_{01}}{\mathcal{E}_{02}}$ раз.

Множественное увеличение в $\frac{\mathcal{E}_{01}}{\mathcal{E}_{02}}$ раз электрического сигнала с приемника света позволяет регистрировать слабые сигналы так, чтобы они не тонули в шумах приемника. То есть гетеродинный прием сигнала позволяет множественно увеличить отношение сигнал — шум.

Быстрое адиабатическое прохождение.

Название явления нужно понимать, как быстрое, но медленное прохождение (смотрите, например, адиабатические инварианты). Имеется ввиду, что рассматриваемый процесс быстрый по сравнению с одним характерным временем задачи $\frac{1}{\gamma}$, но медленный по сравнению с другим временем $\frac{1}{R}$.

Будем называть свипированием частоты (swipe — удар) именно такое (быстрое, но медленное) сканирование частоты света, при котором частота света проходит широкий диапазон частот, в котором линия поглощения помещается вместе со своими достаточно далекими крыльями.

Рассмотрим с помощью вектора Блоха, что происходит со средой при свипировании частоты света.

Пусть до взаимодействия со светом среда не инвертирована, и вектор Блоха направлен вертикально вниз.

При взаимодействии со светом вектор Блоха вращается вокруг вектора $\vec{R}_\Omega = \begin{pmatrix} R \\ 0 \\ \Omega \end{pmatrix}$ в левую сторону. Здесь $R = \frac{p\mathcal{E}_0}{\hbar}$ — частота Раби, $\Omega = \omega - kV_z - \omega_{21}$

— расстройка частоты светового поля относительно частоты перехода в системе отсчета молекулы.

Как изменяется вектор \vec{R}_Ω при свипировании частоты? Расстройка Ω изменяется от $-\infty$ до $+\infty$ или наоборот. При таком изменении третьей координаты вектора \vec{R}_Ω можно сказать, что сам вектор как бы поворачивается на угол π при одновременном изменении длины вектора в процессе поворота.

Пусть для определенности свипирование происходит при изменении Ω от $-\infty$ до $+\infty$. Тогда в начальный момент времени третья координата вектора \vec{R}_Ω равна $\Omega = -\infty$, и сам вектор \vec{R}_Ω направлен вертикально вниз, как и вектор Блоха \vec{B} .

Если вектор \vec{R}_Ω поворачивается достаточно медленно, а вектор Блоха \vec{B} , соответственно, вращается вокруг вектора \vec{R}_Ω достаточно быстро, то вектор Блоха \vec{B} во все время свипирования остается рядом с вектором \vec{R}_Ω .

В результате такого свипирования вектор Блоха поворачивается снизу вверх, как и вектор \vec{R}_Ω .

Рассмотрим теперь одно свипирование, но в обратном направлении, при изменении Ω от $+\infty$ до $-\infty$. Начальное состояние вектора Блоха по-прежнему будем считать таким, что вектор Блоха направлен вертикально вниз.

Вектор \vec{R}_Ω теперь при свипировании поворачивается сверху вниз, но вектор Блоха снова поворачивается снизу вверх, так как можно считать, что он вращается в правую сторону вокруг вектора $-\vec{R}_\Omega$, а вектор $-\vec{R}_\Omega$ поворачивается снизу вверх.

То есть при свипировании частоты в любую сторону, если вначале процесса вектор Блоха направлен вниз, то в конце процесса вектор Блоха будет направлен вверх.

Такой поворот вектора Блоха похож на результат воздействия на среду π импульса света. И действительно, поворот снизу вверх равен повороту на угол π вокруг оси 1. Но есть и отличие свипирования от воздействия π импульса света.

Разница в том, что свипирование частоты нечувствительно к амплитуде света. Результат свипирования не зависит от амплитуды светового поля, если амплитуда остается достаточно большой. Если же рассматривать воздействие на среду светового π импульса, то при увеличении амплитуды света вдвое π импульс света превращается в 2π импульс, результат воздействия которого на среду совсем другой (никакой).

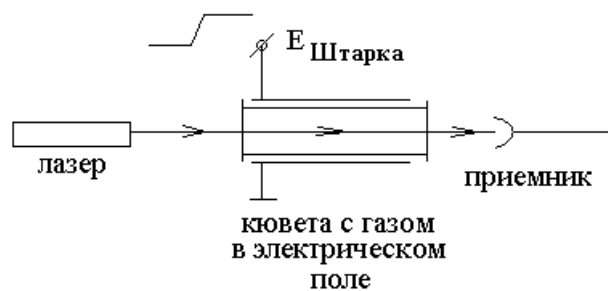
Рассмотрим теперь, что будет происходить с вектором Блоха, если провести два свипирования с небольшой задержкой по времени.

Мы выяснили, что от направления свипирования результат не зависит, поэтому второе свипирование можно проводить в обратном направлении.

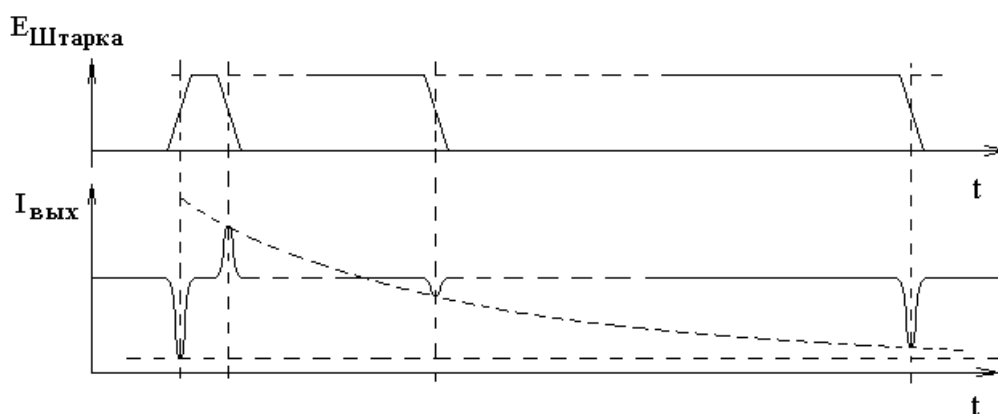
При первом свипировании вектор \vec{R}_Ω поворачивается снизу вверх, и вектор Блоха поворачивается вместе с ним. Пусть второе свипирование происходит сразу за первым без задержки по времени. Тогда при втором свипировании вектор \vec{R}_Ω поворачивается сверху вниз, и вектор Блоха возвращается вниз вместе с ним.

Если же второе свипирование произвести после значительной задержки по времени, то за время этой задержки вектор Блоха из состояния вверх может вернуться в обычное для него состояние вниз в результате релаксации. Первое свипирование будет забыто. В таком случае второе свипирование снова переводит вектор Блоха снизу вверх, а не сверху вниз, как при нулевой задержке между двумя свипированиями.

Свипирование удобно производить штарковским переключением частоты. Ниже на рисунке приведена оптическая схема эксперимента:



На следующем рисунке приведены две зависимости. Первая зависимость — это зависимость напряженности штарковского поля от времени с тремя вариантами временной задержки между двумя свипированиями. Вторая зависимость — это зависимость интенсивности света на приемнике, как функция времени.



На левом краю первого графика изображен линейный рост штарковского поля $E_{Штарка}$, которым протягивают линию поглощения мимо неподвижной частоты генерации лазера. При этом для набора молекул с каждым значением лучевой скорости V_z в результате первого свипирования $\Omega = \omega - kV_z - \omega_{21}$ изменяется от $\Omega = -\infty$ до $\Omega = +\infty$, а вектор Блоха переходит из состояния направленности вниз в состояние направленности вверх. Для каждой лучевой скорости V_z поворот вектора Блоха происходит в свое время, когда $\Omega(t) = \omega - kV_z - \omega_{21} = 0$. Среда при этом запасает энергию. Энергия забирается из проходящего среду светового поля. В результате мощность света на приемнике повторяет доплеровский контур линии поглощения.

Если второе свипирование происходит сразу после первого, то вектор Блоха возвращается сверху вниз. При этом среда отдает энергию, запасенную при первом свипировании, и свет усиливается. Зависимость интенсивности на выходе кюветы опять повторяет контур доплеровской линии поглощения, только вместо поглощения света происходит его усиление.

На рисунке приведены три возможных варианта времени второго свипирования.

Если второе свипирование происходит с большой задержкой, то вектор Блоха успевает вернуться вниз в результате релаксации безо всякого взаимодействия со светом. В этом случае второе свипирование снова переводит вектор Блоха снизу вверх, а среда поглощает свет.

При некоторой промежуточной длительности задержки между двумя свипированиями импульс в интенсивности света на выходе кюветы меняет знак.

Амплитуда этого импульса в интенсивности света, как функция задержки между двумя свипированиями имеет вид:

$$S \sim (e^{-\gamma_1 \tau} + e^{-\gamma_2 \tau} - 1).$$

Измерение этой зависимости позволяет определить константы затухания γ_1 и γ_2 , а через них получить информацию о молекулярных столкновениях.

Казалось бы, амплитуда импульса должна релаксировать к стационарному значению с постоянной времени затухания верхнего уровня γ_2 , но в приближении составленных уравнений для матрицы плотности релаксация верхнего и нижнего уровней идет на третьи уровни.

Запаздывающая оптическая нутация.

Амплитуда изменения интенсивности света для первого полупериода оптической нутации равна изменению интенсивности при ненасыщенном поглощении света. Это поглощение определяется разностью заселенностей двух уровней без светового поля:

$$S \sim (N_1^0 - N_2^0).$$

Амплитуду первого полупериода оптических нутаций S будем называть амплитудой оптических нутаций.

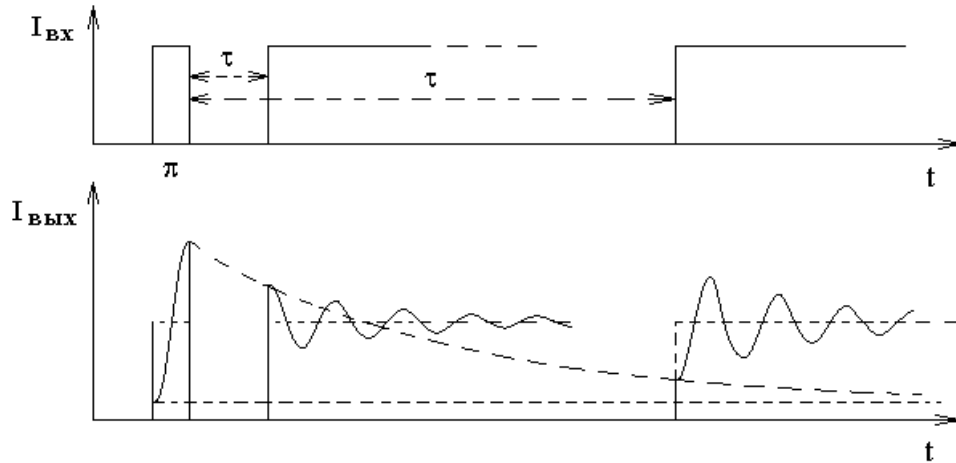
Если предварительно до начала нутаций изменить разность заселенностей $(N_1 - N_2)$, то пропорционально этой разности изменится и амплитуда нутаций.

Рассмотрим два варианта такого изменения и два соответствующих им явления — явление двухимпульсной и явление одноимпульсной запаздывающей оптической нутации.

Для определенности приведем рисунки, поясняющие эти явления, при выполнении неравенства $R \ll kU$.

Двухимпульсная запаздывающая оптическая нутация.

В этом варианте предварительно перед ступенькой включения светового поля через среду пропускают π импульс света, который переводит вектор Блоха из состояния направленности вниз в состояние направленности вверх.



На верхнем рисунке после π импульса показаны два варианта задержки τ между π импульсом и ступенькой включения светового поля.

На нижнем рисунке показана зависимость интенсивности на выходе кюветы, как функция времени для этих же двух вариантов задержки τ . Интенсивность света на выходе кюветы во время π импульса искажена началом оптических нутаций.

Если задержка τ мала, то оптические нутации, возникающие после включения ступеньки интенсивности света, продолжают с отклонения вверх, а не вниз, как бы это было при обычной оптической нутации без предварительного π импульса света. Нутации связаны с вращением вектора

Блоха вокруг вектора $\vec{R}_\Omega = \begin{pmatrix} R \\ 0 \\ \Omega \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. Выключаем поле — прекращается

вращение вектора Блоха — вектор Блоха остается на месте. Включаем поле — вектор Блоха продолжает вращение из того положения, в котором он остановился. Нутации просто продолжают с той фазы, в которой их застало временное выключение светового поля.

По-другому объяснить тот факт, что нутации начинаются в инвертированной полярности, можно тем, что предварительный π импульс света инвертирует заселенность среды, а амплитуда нутаций пропорциональна разности заселенностей.

Если задержка τ велика по сравнению со временем затухания вектора Блоха, то вектор Блоха после π импульса успевает снова вернуться к направлению вниз. В этом случае, как и обычная нутация, запаздывающая нутация начинается с отклонения вниз, но с несколько меньшей амплитудой.

Амплитуда двухимпульсной запаздывающей нутации в интенсивности прошедшего кювету с газом света имеет следующую зависимость от времени задержки τ между π импульсом света и ступенькой включения света:

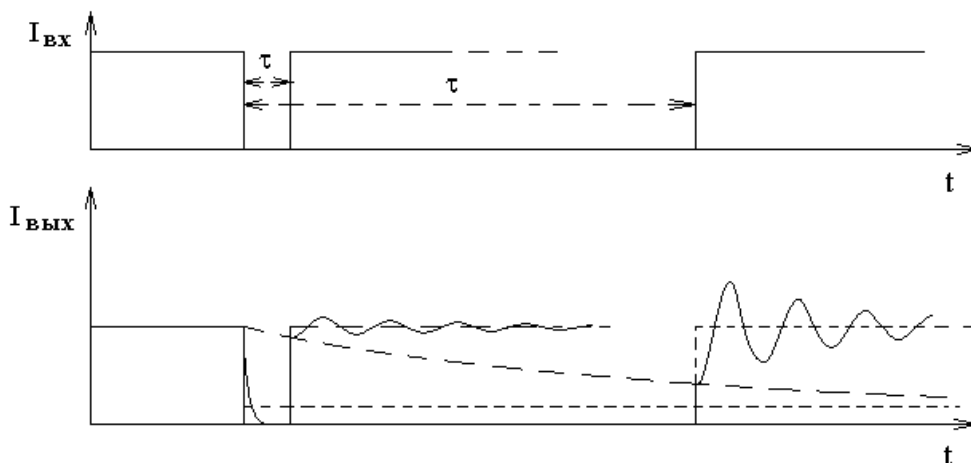
$$S \sim (e^{-\gamma_1 \tau} + e^{-\gamma_2 \tau} - 1).$$

Измерение этой зависимости на опыте позволяет определить величины скоростей затухания обоих уровней энергии γ_1 и γ_2 . Эти величины несут информацию о молекулярных столкновениях.

Одноимпульсная запаздывающая нутация.

В этом варианте наблюдения запаздывающей оптической нутации есть один импульс — это прямоугольный импульс выключения светового поля.

На нижеследующем рисунке рассмотрены варианты двух длительностей импульса выключения света:



Если длительность импульса выключения светового поля мала, то амплитуда оптических нутаций стремится к нулю, так как в предельном случае нет импульса выключения и нет нутаций.

При большой длительности импульса выключения света среда к моменту включения света успевает забыть, что ранее свет уже был. В таком случае наблюдаются оптические нутации практически с обычной амплитудой, как в случае ступеньки включения света без предварительной засветки.

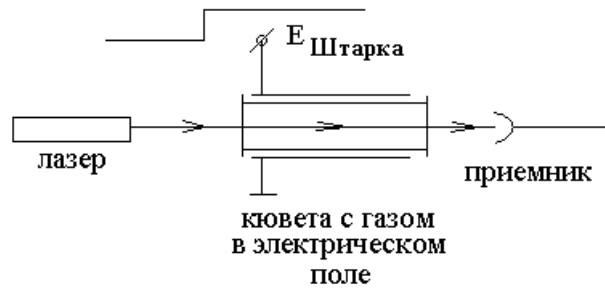
Зависимость амплитуды нутаций от длительности импульса выключения света имеет вид:

$$S \sim (e^{-\gamma_1 \tau} + e^{-\gamma_2 \tau} - 2).$$

Измерение этой зависимости на опыте позволяет определить скорости затухания уровней γ_1 и γ_2 , которые несут информацию о молекулярных столкновениях.

Биения когерентного комбинационного рассеяния.

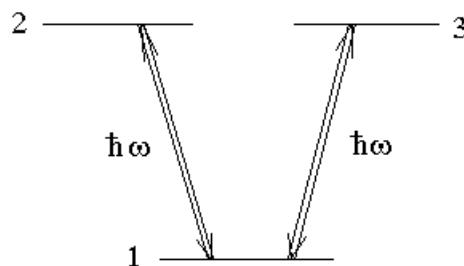
Рассмотрим оптическую схему опыта со штарковским переключением частоты:



Интересующий нас сигнал биений когерентного комбинационного рассеяния наблюдается в трехуровневой схеме с общим нижним или общим верхним уровнем энергии.

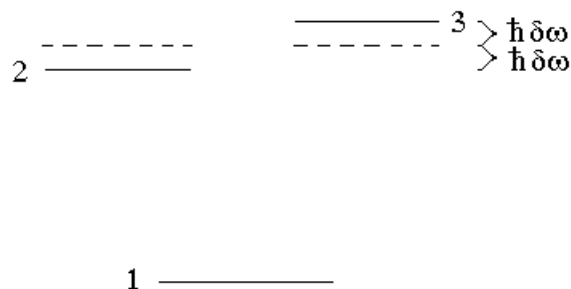
Рассмотрим схему с общим нижним уровнем энергии.

Пусть без штарковского поля два верхних уровня энергии вырождены:



Мощное лазерное излучение с частотой ω осуществляет оптическую накачку уровней энергии 2 и 3.

Пусть при штарковском переключении частоты уровни 2 и 3 сдвигаются в разные стороны на одинаковую величину $\hbar\delta\omega$, и пусть уровень 1 не сдвигается:



В интенсивности света на приемнике излучения после штарковского переключения частоты наблюдаются три сигнала разной природы.

1). Оптические нутации.

Обычно оптические нутации наблюдаются при включении светового поля.

Частоты переходов ω_{21} и ω_{31} изменяются при включении штарковского поля. До включения штарковского поля оба перехода взаимодействовали с набором молекул с одной лучевой скоростью V_z :

$$\Omega = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega - kV_{z_{старое}} - \omega_{21_{старое}} = 0 \quad \Rightarrow$$

$$V_{z_{старое}} = \frac{\omega - \omega_{21_{старое}}}{k}.$$

После включения штарковского поля частоты переходов ω_{21} и ω_{31} сдвигаются в разные стороны, и со световым полем начинают взаимодействовать два новых набора молекул:

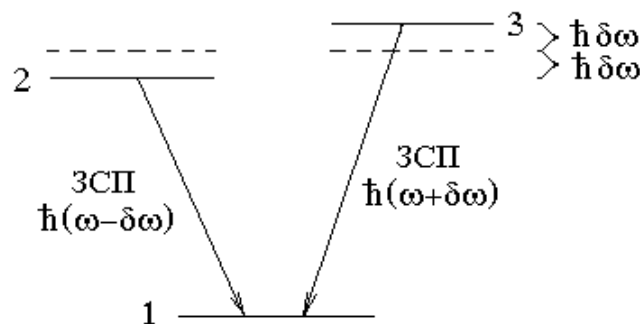
$$V_{z_{новое}} = \frac{\omega - \omega_{21_{новое}}}{k} \quad \text{и} \quad V_{z_{новое}} = \frac{\omega - \omega_{31_{новое}}}{k}.$$

Для этих двух наборов световое поле включается, следовательно, на этих наборах наблюдаются сигналы оптических нутаций.

2). Затухание свободной поляризации.

Для набора молекул с лучевой скоростью $V_{z_{старое}} = \frac{\omega - \omega_{21_{старое}}}{k}$ световое поле выключается. Следовательно, на этом наборе молекул должен наблюдаться сигнал затухания свободной поляризации (ЗСП).

Для этого набора световое поле выключается, а раскачанные полем диполи молекул остаются и продолжают излучать. Только эти диполи излучают на новых частотах $\omega_{21_{новое}} = \omega - \delta\omega$ и $\omega_{31_{новое}} = \omega + \delta\omega$.



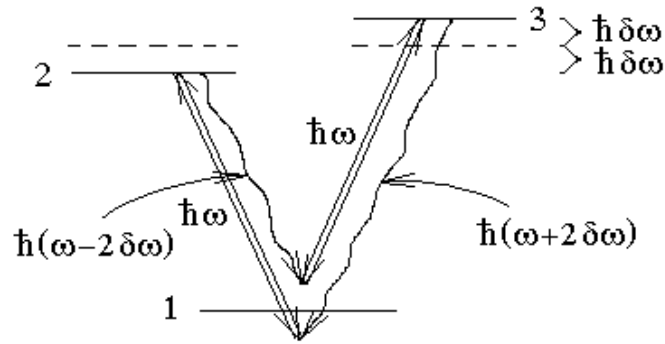
Вместе с излучением сигналов ЗСП на частотах $\omega - \delta\omega$ и $\omega + \delta\omega$ на приемник попадает лазерное излучение с частотой ω . Наличие лазерного излучения с частотой ω приводит к так называемому гетеродинному приему слабых сигналов ЗСП. В результате гетеродинного приема фототок приемника имеет полезный сигнал на частоте биений $\delta\omega$ слабого оптического сигнала ЗСП $\omega \pm \delta\omega$ и сильного опорного оптического сигнала лазерного поля ω .

Сигнал ЗСП быстро затухает примерно за то же время $\frac{1}{R}$, что и сигнал оптических нутаций.

3). Биения когерентного комбинационного рассеяния.

Это новый для нас сигнал, который затухает гораздо медленнее, чем ЗСП и оптические нутации.

Сильное лазерное поле разрешает двухфотонные переходы, в которых первый фотон — это фотон спонтанного излучения, а второй фотон — поглощение света из сильной лазерной волны. Эти двухфотонные переходы представлены на нижеследующем рисунке:



Как видно из рисунка, частоты фотонов спонтанных излучений, которые участвуют в двухфотонных процессах, равны $\omega - 2\delta\omega$ и $\omega + 2\delta\omega$.

Гетеродинный прием этого спонтанного излучения на частотах $\omega - 2\delta\omega$ и $\omega + 2\delta\omega$ с опорным излучением на частоте ω создает фототок приемника на частоте $2\delta\omega$.

Рассматриваемые двухфотонные переходы не уменьшают суммарной заселенности уровней 2 и 3, поэтому двухфотонные переходы продолжаются в течение всего времени затухания $\frac{1}{\gamma}$ уровней энергии 2 и 3. Это время гораздо

больше времени $\frac{1}{R}$ затухания ЗСП и оптических нутаций.

Регистрируемый фототок называют сигналом биений когерентного комбинационного рассеяния. Фототок затухает, как

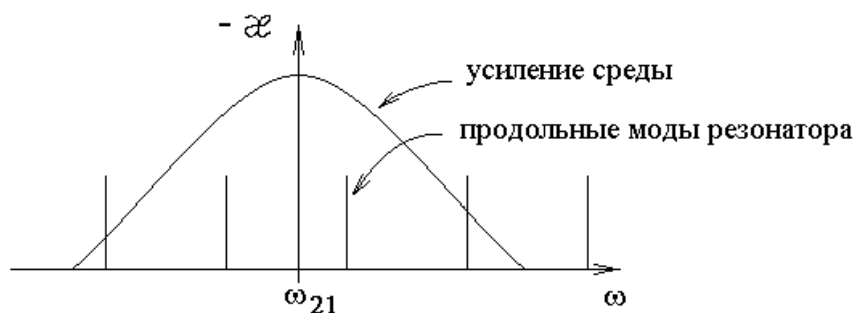
$$S \sim \left(e^{-\gamma_2 t} + e^{-\gamma_3 t} \right).$$

Нелинейная комб-спектроскопия высокого разрешения.

1 Иванов В С , Пулькин С А , Фрадкин Э Е , Кузьмин А И Нелинейные резонансы в спектре поляризации и восприимчивости двухуровневой атомной системы в трехмодовом световом поле // Вестник СПбГУ Сер.4, 2007, Вып.3, С.125-129.

2. Рустамаева Т.О., Савельева С.В., Уварова С.В., Калиничев А.А., Пулькин С.А. Метод бездоплеровской комб-спектроскопии на примере биомаркера окиси азота NO. IX Международная конференция молодых ученых и специалистов "Оптика – 2015", 12-16 октября 2015 года, Санкт-Петербург, Россия.

Идея состоит в том, чтобы использовать в спектроскопии насыщения поглощения излучение импульсного лазера в режиме генерации периодических импульсов с частотой межмодового интервала продольных мод лазера. Периодические импульсы раскладываются в ряд Фурье в виде спектра равноотстоящих частотных линий с межмодовым частотным интервалом.



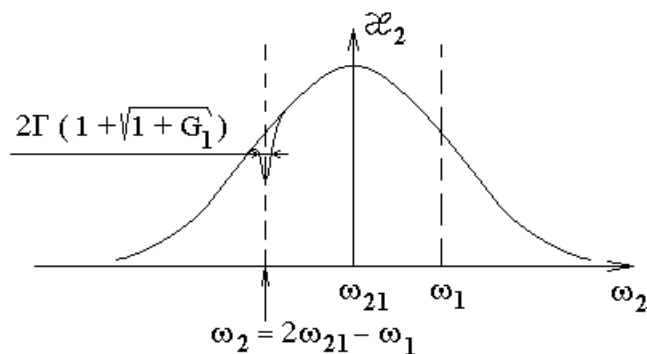
Для наблюдения спектрально узких резонансов насыщения поглощения световое поле должно быть достаточно слабым.

Можно считать, что излучение каждой частоты присутствует непрерывно. В таком случае резонанс насыщения поглощения встречных волн будет наблюдаться в двух случаях.

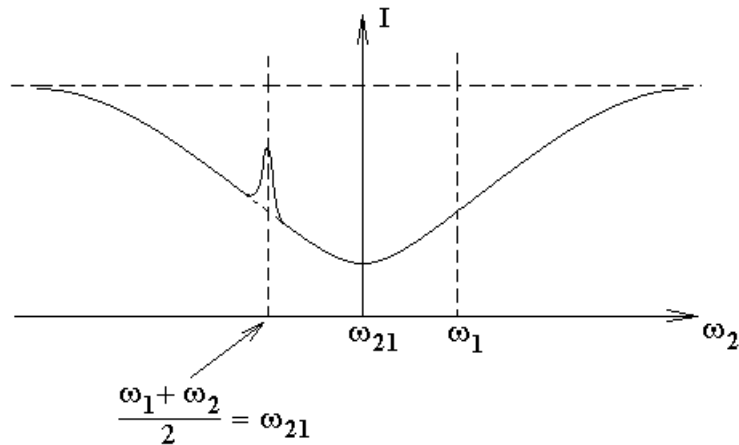
1. Одна из мод лазера совпадает с центром линии поглощения.

2. Центр линии поглощения находится ровно посередине между двумя соседними продольными модами генерации лазера, так как в спектроскопии насыщения поглощения встречных световых волн разных частот резонанс образуется, когда полусумма частот встречных волн совпадает с центром линии поглощения газа.

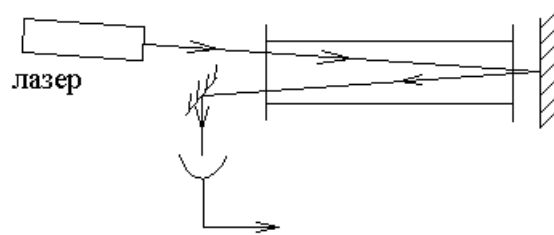
Для непрерывных лазеров при фиксированной частоте одной из встречных волн ω_1 коэффициент поглощения второй волны, как функция ее частоты ω_2 имеет следующий вид.



Соответственно мощность второй волны на приемнике излучения после прохождения кюветы имеет следующий вид.



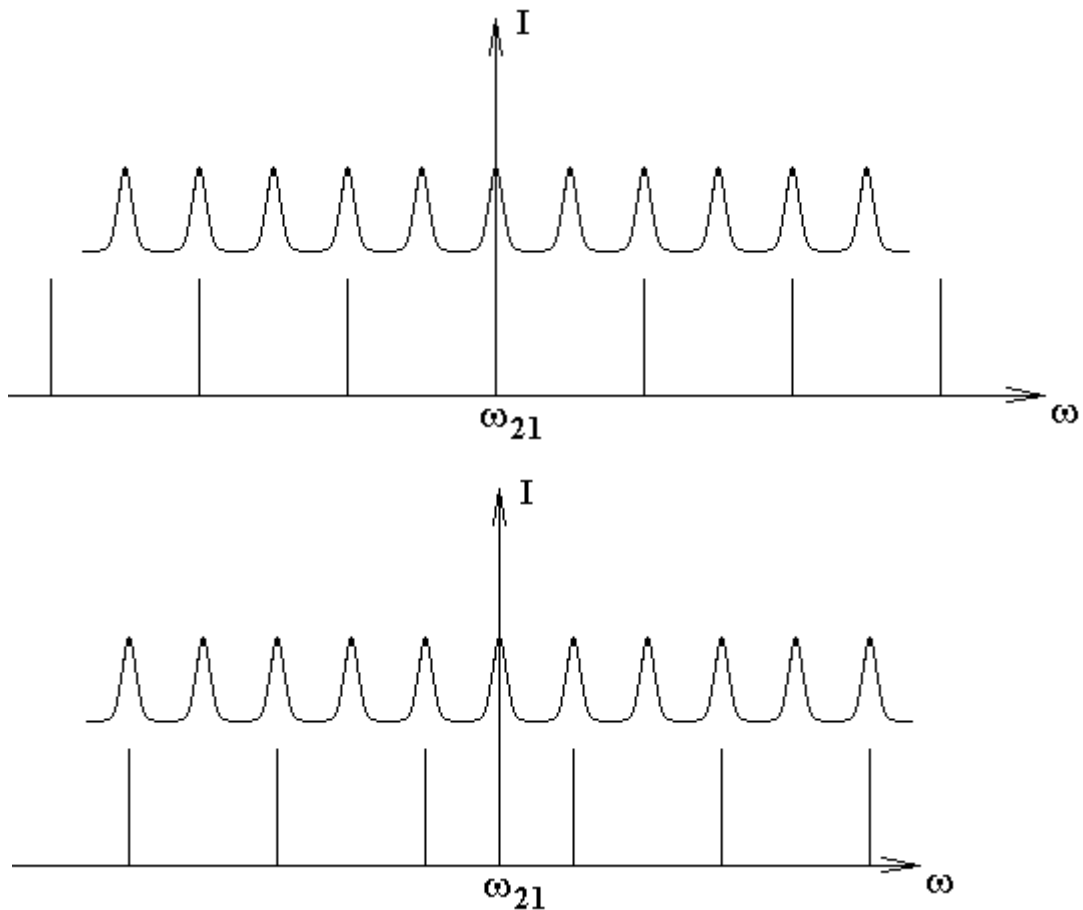
Рассмотрим традиционную схему спектроскопии насыщения поглощения, в которой излучение лазера проходит кювету с газом низкого давления, отражается зеркалом, проходит кювету с газом во встречном направлении и попадает на приемник излучения. Только будем рассматривать излучение импульсного лазера. Регистрируется резонансное увеличение мощности на приемнике при изменении несущей частоты лазерных импульсов.



В многомодовом случае каждая пара симметрично расположенных относительно центра линии поглощения мод генерации будет участвовать в формировании одного и того же резонанса во встречных световых волнах. Резонанс формируется в двух случаях: когда одна из мод лазера совпадает с центром линии поглощения, и когда центр линии поглощения оказывается ровно посередине между соседними модами лазера.

Поскольку в формировании сигнала участвуют все моды, при изменении несущей частоты импульса на величину межмодового интервала сигнал на приемнике будет повторяться.

Если учесть оба механизма формирования резонанса насыщения поглощения встречных волн, то при изменении несущей частоты лазерного импульса резонансы будут регистрироваться вдвое чаще частотного расположения продольных мод.



На рисунках приведена зависимость мощности на приемнике света, как функция несущей частоты спектрального комба — гребенки разрешенных продольных мод импульсного лазера, но эти графики лучше воспринимать не в обычном смысле. Пусть гребенка частот излучения лазера двигается по горизонтальной оси, тогда можно считать, что график зависимости мощности на приемнике движется вместе с гребенкой, а мощность на приемнике в каждый момент равна значению мощности в точке пересечения графика мощности и вертикальной оси графика. Максимумы мощности на приемнике соответствуют симметричным расположениям мод, как это изображено на двух рисунках. Резонансы могут быть очень узкими (не как на рисунке), на несколько порядков уже частотного интервала между модами.

Вопросы к экзамену 2023-2024 учебного года для качественного рассмотрения без математических выкладок.

1. Провал и пик Беннетта. Что по осям? Светоиндуцированный дрейф и разделение изотопов.
2. Резонанс насыщения поглощения с одинаковыми частотами встречных волн. Оптическая схема эксперимента. При каких условиях ширина резонанса много меньше доплеровской ширины линии поглощения? Оптическая развязка.
3. Лазерное охлаждение. Доплеровское охлаждение (радиационное давление), объяснить механизм охлаждения. Оптическая патока. Охлаждение методом боковой полосы.

4. Резонанс плотности возбужденных частиц. Оптическая схема. Что по осям? Почему резонансно уменьшается плотность возбужденных частиц? Оптогальванический метод регистрации.

5. Фемтосекундный (титан-сапфировый) лазер. Синхронизация мод, наведенная светом линза, изменение длительности импульса диафрагмированием луча. Измерение длительности импульса. Чирпирование импульса.

6. Резонанс двухфотонного поглощения без доплеровского уширения. Оптическая схема. Объяснить форму сигнала в виде суммы широкого и узкого контуров. В чем разница между каскадным и двухфотонным возбуждением? Когда каскадным возбуждением можно пренебречь по сравнению с двухфотонным возбуждением?

7. СРТ-резонанс (КПН — резонанс когерентного пленения населенности). В зависимости чего от чего наблюдается резонанс. Почему СРТ-резонансы могут быть очень узкими. Лазеры без инверсии. Остановка света.

8. Физический смысл компонент вектора Блоха. Два смысла первых двух компонент.

9. Динамический эффект Штарка или эффект Штарка в световом поле. Объяснить расщепление уровней. Характер сдвига уровней в слабом поле. Расщепление уровней и правила отбора в сильном поле.

10. Оптические нутации. Частота нутаций, характерное время затухания нутаций. Объяснить причину быстрого спада амплитуды пульсаций интенсивности.

11. Затухание свободной поляризации. Характерное время затухания. Почему сигнал затухает быстрее, чем затухает излучение одной молекулы? Сверхизлучение.

12. Площадь светового импульса. Пи-пополам, пи, 2-пи импульсы. Самоиндуцированная прозрачность.

13. Двухимпульсное фотонное эхо. Объяснить возникновение сигнала эха.

14. Трехимпульсное фотонное эхо. Объяснить эхо эха и индуцированное эхо.

15. Цуг эха Карра-Парселла. Соотношение площадей импульсов и задержек между импульсами.

16. Быстрое адиабатическое прохождение. Отличие и сходство с пи-импульсом. Что наблюдается в эксперименте?

17. Запоздывающая оптическая нутация (двухимпульсная и одноимпульсная).

18. Биения когерентного комбинационного рассеяния. Рассмотреть три сигнала в реальной схеме эксперимента.