

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.

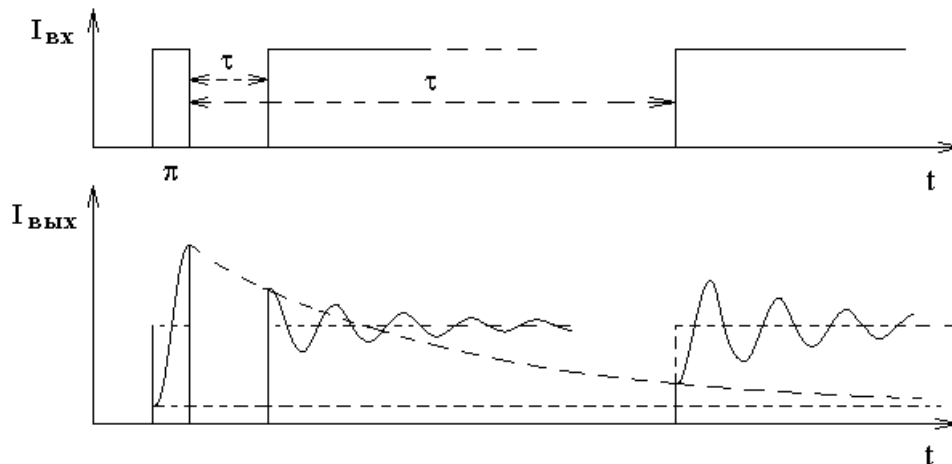
Если предварительно до начала нутаций изменить разность заселенностей $(N_1 - N_2)$, то пропорционально этой разности изменится и амплитуда нутаций.

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, начинаются с отклонения вверх, а не вниз, как бы это было при обычной оптической нутации без предварительного π импульса света. Нутации просто продолжают с той фазы, в которой их застало временное выключение светового поля.

Иначе 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 имеет следующую зависимость от времени задержки τ между π импульсом света и ступенькой включения света:

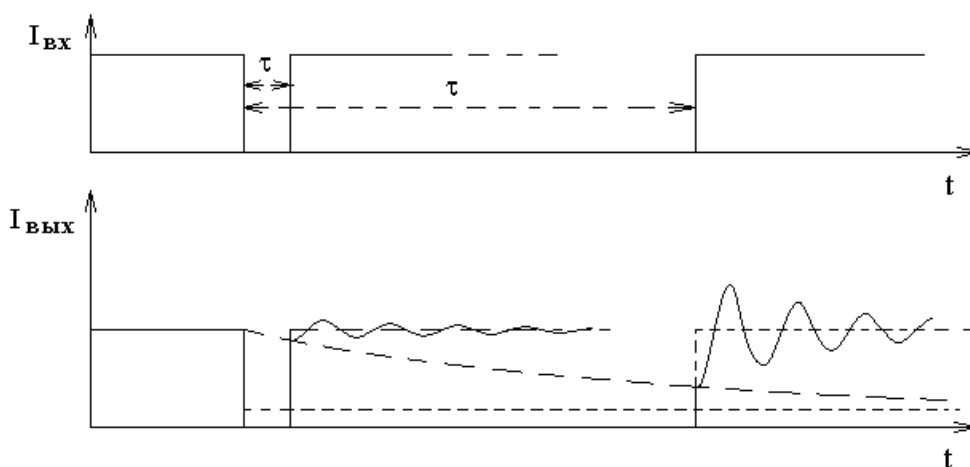
$$S \sim (e^{-\gamma_1\tau} + e^{-\gamma_2\tau} - 1).$$

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.

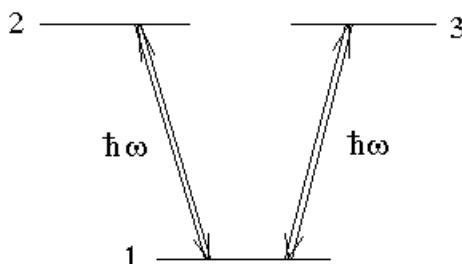
Рассмотрим оптическую схему опыта со штарковским переключением частоты:



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

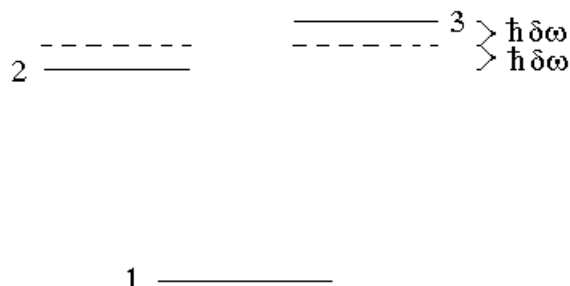
Рассмотрим схему с общим нижним уровнем энергии.

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 :

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

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

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:

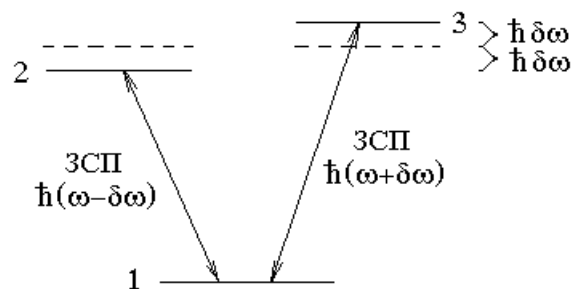
$$V_{z_{\text{новое}}} = \frac{\omega - \omega_{21_{\text{новое}}}}{k} \quad \text{и} \quad V_{z_{\text{новое}}} = \frac{\omega - \omega_{31_{\text{новое}}}}{k}.$$

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 $V_{z_{\text{старое}}} = \frac{\omega - \omega_{21_{\text{старое}}}}{k}$ световое поле выключается. Следовательно, на этом наборе молекул должен наблюдаться сигнал ЗСП.

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



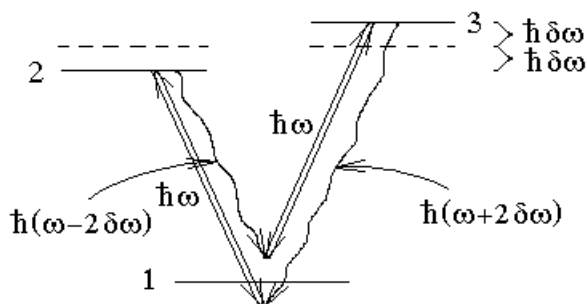
Вместе с излучением сигналов ЗСП на частотах $\omega - \delta\omega$ и $\omega + \delta\omega$ на приемник попадает лазерное излучение с частотой ω . Наличие лазерного излучения с частотой ω приводит к так называемому гетеродинному приему слабых сигналов ЗСП. В результате гетеродинного приема фототок 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 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

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

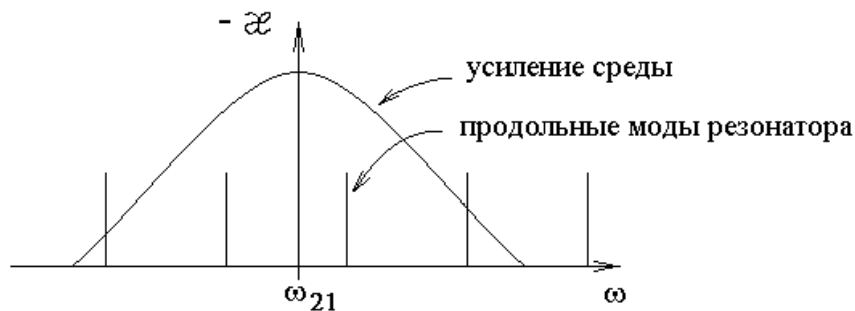
Нелинейная комб-спектроскопия высокого разрешения.

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.

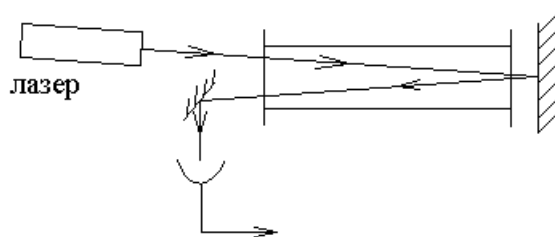
2. Рустамаева Т.О., Савельева С.В., Уварова С.В., Калиничев А.А., Пулькин С.А. Метод бездоплеровской комб-спектроскопии на примере биомаркера окиси азота NO. IX Международная конференция молодых ученых и специалистов "Оптика – 2015", 12-16 октября 2015 года, Санкт-Петербург, Россия.

Идея состоит в том, чтобы использовать в спектроскопии насыщения поглощения встречные волны излучения 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.



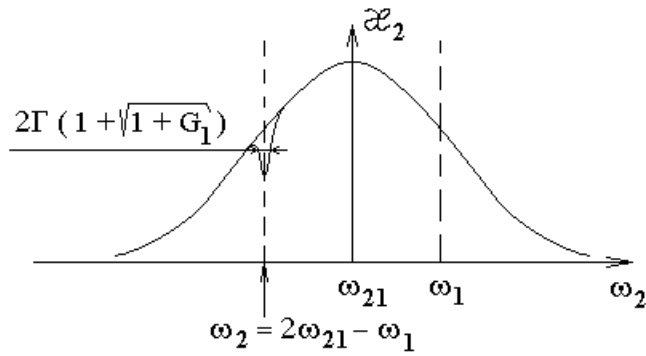
Рассмотрим традиционную схему спектроскопии насыщения поглощения, в которой излучение лазера проходит кювету с газом низкого давления, отражается зеркалом, проходит кювету с газом во встречном направлении и попадает на приемник излучения. Только рассматривается излучение импульсного лазера. Регистрируется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



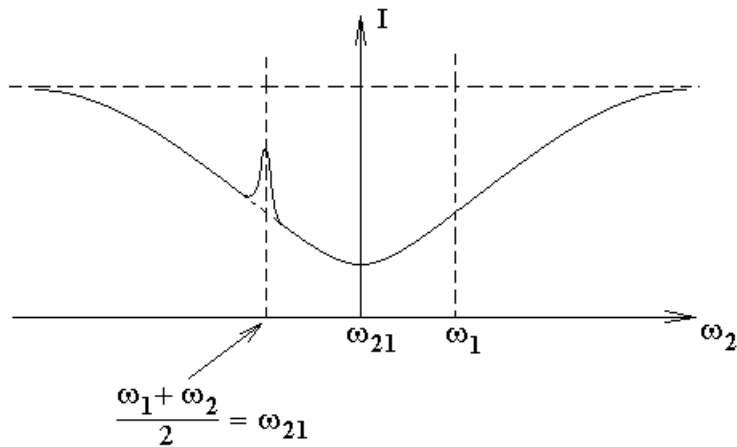
Для наблюдения спектрально узких резонансов насыщения поглощения световое поле не должно быть слишком сильным. В таком случае можно считать, что излучение каждой частоты присутствует непрерывно. Резонанс насыщения поглощения будет наблюдаться в двух случаях.

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

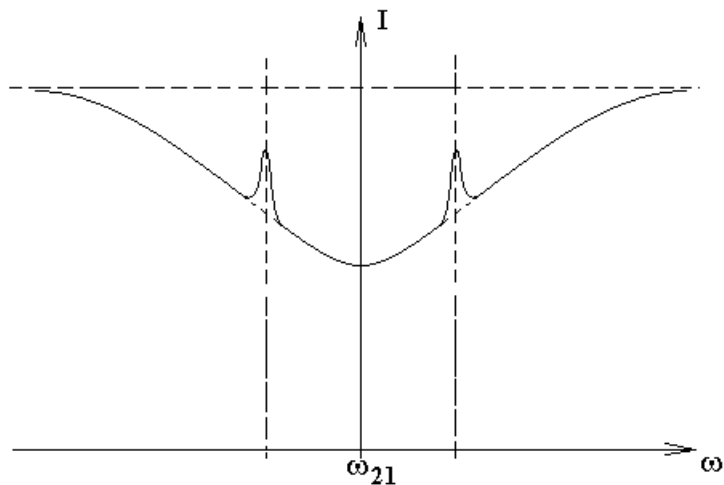
При фиксированной частоте одной из встречных волн ω_1 коэффициент поглощения второй волны, как функция ее частоты ω_2 имеет следующий вид.



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



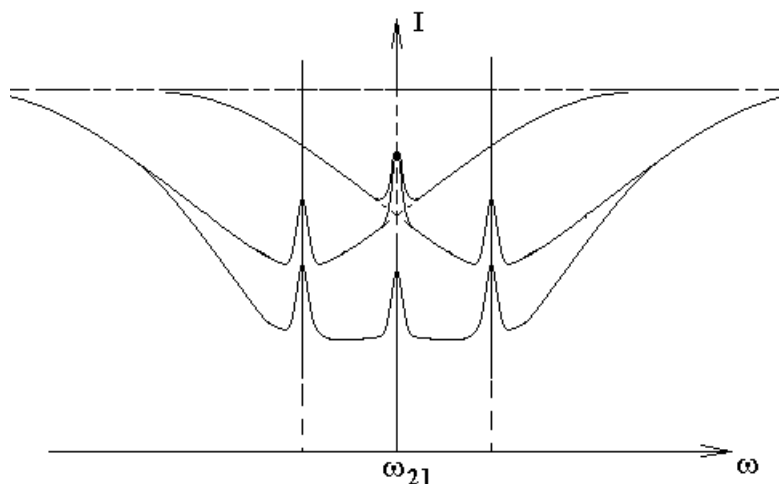
Если частоты встречных волн двигаются вместе, оставляя фиксированным значение разности частот, то мощность каждой прошедшей кювету волны будет иметь зависимость от своей частоты в виде широкого доплеровского провала с пиком просветления. Только для высокочастотной волны пик просветления будет справа от центра линии поглощения ω_{21} , а для низкочастотной — слева, как это показано на нижеследующем рисунке.



Если строить зависимость мощности каждой волны на приемнике, как функцию средней частоты двух волн, то для каждой из волн зависимость сдвинется на половину межмодового интервала. Для высокочастотной моды —

влево, для низкочастотной — вправо. При этом два выше приведенных пика в зависимости от средней частоты двух мод регистрируются одновременно.

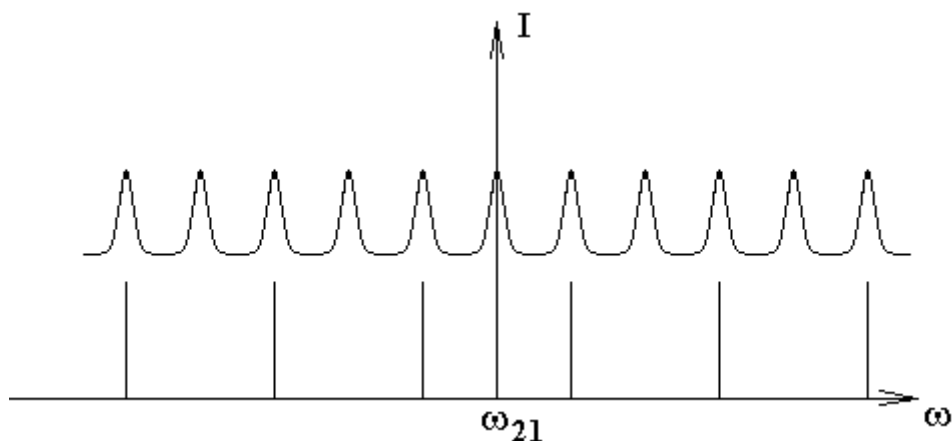
Кроме того, каждая из двух мод будет просветлять среду сама для себя при совпадении частоты моды с центром линии поглощения. Если строить зависимость мощности на приемнике при регистрации обеих мод, как функцию средней частоты двух мод, то надо сложить уменьшения мощности для каждой из двух волн (нижняя зависимость на следующем рисунке).



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.

Поскольку в формировании сигнала участвуют все моды, при изменении несущей частоты импульса сигнал на приемнике будет меняться периодически с периодом равным межмодовому интервалу.

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.



Вопросы к экзамену для качественного рассмотрения без математических выкладок.

1. Провал и пик Беннетта. Светоиндуцированный дрейф и разделение изотопов.

2. Резонанс насыщения поглощения. При каких условиях ширина резонанса много меньше доплеровской ширины линии поглощения? Оптическая развязка.

3. Лазерное охлаждение. Радиационное давление, оптическая патока. Чем определяется предел охлаждения?

4. Резонанс плотности возбужденных частиц. 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. Чипирование импульса.

6. Резонанс двухфотонного поглощения без доплеровского уширения. 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 очень узкие.

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

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

10. Оптические нутации, частота нутаций. Объяснить причину быстрого спада амплитуды пульсаций интенсивности.

11. Затухание свободной поляризации. 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. Запаздывающая оптическая нутация (двухимпульсная и одноимпульсная).

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