

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Физический факультет

Медленный свет

Реферат по физике
Студента 217 группы Торбенкова Н.
Научный руководитель: Сухоруков А.П.

Москва
2008

Содержание

1. Введение
2. Электромагнитно-индуцированная прозрачность
3. «Медленный свет» на основе эффекта ЭИП
4. Эффект «остановки света»
5. Заключение
6. Список литературы

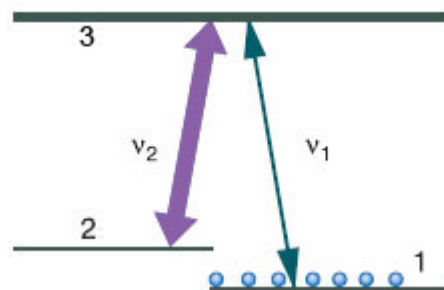
Введение

Ученым удалось остановить лучевой импульс без лишения его энергетической составляющей. Все мы знаем, что скорость света в вакууме - 300 тысяч километров в секунду - максимальная из возможных, и никакой сигнал, никакое движущееся тело не может ее превзойти. Но в любой среде, отличной от вакуума, имеются атомы с их электронами. Световая волна, омывая такие атомы, поглощается ими, ее энергия расходуется на возбуждение электронов, которые затем успокаиваются и отдают эту энергию в виде переизлученного света. Этот процесс занимает хоть и малое, но ненулевое время, и в результате свет в среде движется чуть медленней, чем в вакууме. Его скорость там зависит от плотности атомов, точнее - не просто от плотности, а от электромагнитных свойств этой совокупности атомов. Так что в принципе замедлить свет - пара пустяков: нужно просто создать очень плотную, но еще прозрачную среду, но замедлить его в 20 миллионов раз - это своего рода экспериментальный рекорд. Что же такое «медленный свет» в современном понимании этого термина? Чтобы понять, о чем идет речь, нам придется сначала вспомнить, что такое групповая скорость света. Что такое скорость волны или скорость любого волнового процесса? За время, равное одному периоду (T), волна перемещается на свою длину (l). Отсюда сразу получаем известную формулу для скорости волны v : $v = l/T$. Эта формула верна и для света, надо только учитывать, что длина волны света в среде меньше, чем в вакууме, в n раз, где n — показатель преломления среды. Это — фазовая скорость света. Для передачи информации важна так называемая групповая скорость света, которая, в частности, определяет скорость распространения в среде светового импульса. Если показатель преломления среды слабо зависит от длины световой волны, то групповая скорость мало отличается от фазовой. Однако при сильной спектральной зависимости показателя преломления, или, иначе говоря, при сильной дисперсии среды, скорость перемещения светового импульса начинает отличаться от скорости перемещения фазы волны внутри импульса.

Всё это — элементарный курс физики, а незначительные различия между фазовой и групповой скоростью света были важны только для специалистов, занимающихся расчетами и исследованиями распространения оптических сигналов в дисперсионных средах. Ситуация радикальным образом изменилась после первых демонстрационных опытов по «медленному свету». В этих экспериментах аномально высокая дисперсия среды достигалась с использованием недавно открытого эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности.

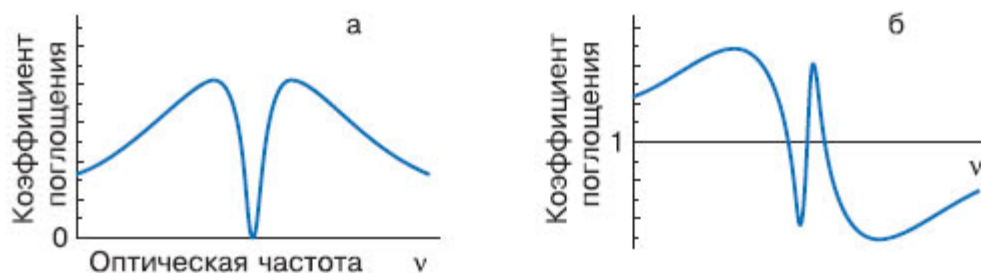
Электромагнитно-индуцированная прозрачность

Эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) наблюдается в условиях воздействия на атомную среду двух резонансных полей с различающимися частотами. Структура энергетических уровней называется Λ -схемой, это два близких нижних состояния и верхнее, которое отстоит от них на энергию кванта оптического диапазона. Поле накачки, или связывающее поле, действует между двумя незаселенными состояниями и считается сильным. Слабое поле с частотой в окрестности резонанса 1–3 играет роль зондирующего, или пробного. В этих условиях пробное поле с



удивлением «обнаруживает», что среда под действием накачки приобретает новые свойства. Например, исчезает поглощение на переходе из заселенного основного состояния 1 в возбужденное состояние 3. Точное частотное положение точки прозрачности определяется условием равенства разности частот двух оптических полей частоте перехода 1–2.

Другое интересное свойство системы касается спектральной ширины этой области прозрачности, которая, во-первых, зависит от мощности волны накачки, а во-вторых, может быть чрезвычайно малой. Типичный вид спектра пропускания, регистрируемого пробной волной в условиях эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности, изображен на рисунке:



схематичное изображение спектрального хода коэффициента поглощения (а) и показателя преломления (б) атомной среды, регистрируемых пробным пучком в условиях электромагнитно-индуцированной прозрачности. ν_0 — резонанс ЭИП прозрачности, то есть частота пробного пучка, при которой разность частот пробного пучка и пучка накачки сравнивается с частотой перехода 1–2

Здесь уместно заметить, что эффект ЭИП — это лишь один из семейства эффектов квантовой оптики, в которых на атомную систему воздействуют два поля с близкими частотами. Упрощенно суть этих явлений сводится к следующему. Два световых поля, действующие на атомную систему с энергетической структурой типа Λ -схемы (рис. 1), взаимодействуют с суперпозицией (наложением) состояний 1 и 2 и при достаточно высокой интенсивности опустошают соответствующее суперпозиционное состояние, сконструированное из состояний 1 и 2. В результате система становится прозрачной для комбинации двух световых полей, когда разность их частот сравнивается с частотой перехода между уровнями 1 и 2.

«Медленный свет» на основе эффекта ЭИП

Итак, эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности позволяет создать среду с чрезвычайно узким провалом в ее спектре поглощения. Волна накачки, которая радикальным образом влияет на оптические характеристики среды и от интенсивности которой эти характеристики зависят, в данном случае рассматривается как атрибут среды, свойства которой зондируются не возмущающим ее пробным светом. Теперь, если воспользоваться известными соотношениями Крамерса-Кронига, устанавливающими связь между спектром поглощения линейной среды и спектром ее показателя преломления, то мы увидим, что в области этого узкого провала среда демонстрирует чрезвычайно крутой ход показателя преломления. Если эти слова не вызвали у вас учащения пульса и сладостных воспоминаний об экзамене по курсу физики — придется поверить на слово.

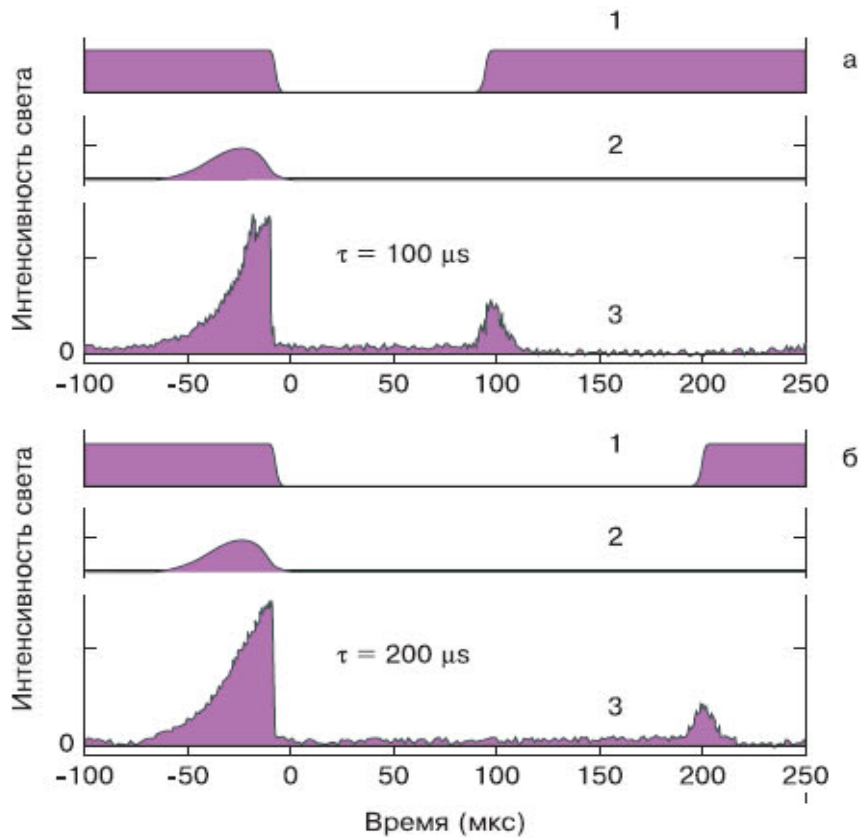
Дисперсия такого рода характерна для любых резонансов, и ничего необычного в самом этом нет. Но обычно узкие резонансы в оптических средах имеют вид пиков поглощения, и участок крутой дисперсии (с аномальной спектральной зависимостью) приходится на область сильного поглощения, и поэтому не представляет большого интереса. В эффекте ЭИП, напротив, спектральная особенность среды имеет характер антирезонанса и участок крутой дисперсии находится на частоте прозрачности. Типичная спектральная зависимость показателя преломления среды в области резонанса ЭИП показана на рис. 2б. Сочетание гигантской дисперсии среды с ее прозрачностью и определяет уникальность ситуации.

Эффект «медленного света» наблюдается, когда в качестве пробного поля, действующего в плече 1–3 Λ -схемы, используется световой импульс, спектр которого не выходит за пределы антирезонанса ЭИП. При этом высокая дисперсия среды в сочетании с ее нормальной спектральной зависимостью (то есть возрастанием показателя преломления в сторону роста частоты) обеспечит небывалое снижение групповой скорости света. Достигнутое снижение групповой скорости света вроде бы может представлять значительный интерес для практических приложений. Особую привлекательность этой технике придает возможность управления групповой скоростью пробного света путем изменения интенсивности поля накачки, от которой зависит ширина провала, а следовательно, и крутизна дисперсии. Однако надо учитывать, что снижение групповой скорости света за счет повышения дисперсии показателя преломления неизбежно сопровождается сужением рабочей полосы частот, а значит, и снижением информационной емкости соответствующего оптического канала связи. Это ограничивает перспективы практического использования «медленного света» в устройствах передачи и обработки информации.

Эффект «остановки света»

Нетрудно понять, что снижение групповой скорости на много порядков величины означает пространственное сжатие светового импульса в среде в такое же число раз. Поэтому световой импульс, имеющий в свободном пространстве длину в несколько сот метров, в среде с низкой групповой скоростью сожмется до нескольких десятков микрон. При этом может возникнуть ситуация, когда импульс пробного поля целиком находится внутри среды. Возникает интересный вопрос: что произойдет, если в этот момент выключить волну накачки?

То, что происходит в этом случае, часто называют «остановкой света», поскольку при повторном включении волны накачки после некоторой темновой паузы импульс пробной волны действительно выходит из среды. Однако не следует понимать эти слова буквально. Действительно, с уменьшением интенсивности волны накачки уменьшается ширина антирезонанса ЭИП, повышается крутизна дисперсии и снижается групповая скорость света. Поэтому можно думать, что, когда интенсивность волны накачки падает до нуля, ширина спектрального провала зануляется, групповая скорость обращается в нуль и свет останавливается. Но при сужении провала спектр пробного поля «вываливается» из него и его групповая скорость перестает следовать за шириной провала. Кроме того, к монохроматической волне вообще неприменимо понятие групповой скорости. Наконец, с уменьшением интенсивности накачки до определенной величины рушится исходная модель эффекта ЭИП, предполагавшая это поле сильным. Поэтому экспериментально наблюдаемый факт восстановления пробной волны после временного выключения поля накачки следует толковать иначе. Как именно?



Наблюдение эффекта «остановки света» в кювете с парами рубидия на временных интервалах 100 мкс (а) и 200 мкс (б): кривые 2 и 3 — интенсивности волны пробного импульса на входе и выходе, кривая 1 — интенсивность пучка накачки.

Мы уже отмечали, что две резонансные световые волны, действующие на трехуровневую систему рассматриваемого типа (рис. 1), создают нестационарное суперпозиционное состояние. Эта суперпозиция состояний 1 и 2, в отсутствие световых полей, способна жить длительное время (определяемое распадными свойствами долгоживущих состояний 1 и 2). Можно сказать иначе: в условиях резонанса ЭИП, после выключения полей, действующих на систему, их биения — то есть разность частот — продолжают существовать в виде осциллирующей поляризации среды. Волны выключены, но среда помнит, что в ней происходило, а именно — помнит «разность частот» в виде колебаний своего свойства, поляризации. Если теперь вновь включить поле накачки, то оно, взаимодействуя с этой осциллирующей поляризацией, окажется промодулированным на частоте энергетического зазора 1–2 и породит поле боковой частоты 1–3, которое мы называем пробным. Произойдет «высвобождение» пробного света светом накачки.

Заключение

Настала пора, наконец, ответить на сакраментальный вопрос - для чего это все нужно? В настоящее время бурно развивается новое направление исследований, связанное с квантовыми вычислениями и, соответственно, "квантовыми вычислителями" - квантовыми компьютерами. Слово "квантовый" означает здесь, что принципиальным является квантово-механический характер поведения системы. Квантовые компьютеры должны дать гигантский выигрыш в скорости вычислений по сравнению с обычными, классическими компьютерами. Для создания квантовых компьютеров необходимо, чтобы при переносе, записи, хранении и считывании информации не разрушалось квантовое состояние системы (идет "борьба за когерентность"). Фотоны являются наиболее быстрыми и удобными носителями

информации, однако проблема состоит в том, чтобы научиться "неразрушающим" образом локализовать и сохранять их. И описанные выше работы дают ключ к решению этой проблемы. Был, кстати, такой вариант экспериментов в группе Лизы Хау - "хранящийся" импульс света высвобождался ... по частям: управляющее поле включалось на небольшой промежуток времени, а затем снова выключалось. Таким образом можно было вывести импульс из кюветы в несколько приемов. По существу происходило неоднократное (и не нарушающее состояние системы) считывание хранящейся информации

Список литературы:

1. Е. Б. Александров, В. С. Запасский "Медленный свет: за фасадом сенсации"
2. Hau L.V., Harris S.E., Dutton Z., Behroozi C.H. "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas" // Nature, v. 397, p. 594–598 (1999).
3. Е.Онищенко. "Свет: остановка по требованию?"