

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Об электромагнитно-индуцированной прозрачности в вырожденной Λ -схеме

В.С. Запасский

На примере экспериментальной работы по "остановке света" показано, как классическое явление линейной оптики — интерференция поляризованных пучков — способно имитировать эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности.

PACS numbers: 42.25.Hz, 42.50.Gy, 42.65.-k

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902e.0197

После первых впечатляющих опытов по наблюдению так называемого медленного света [1, 2] появились работы, в которых столь же эффектные результаты достигались в значительно более простых экспериментальных условиях. Широкую известность, в частности, приобрела работа [3], в которой симптомы заторможенного поляризационно-оптического отклика атомной среды были приписаны проявлениям эффектов "медленного" и "остановленного" света. Критика этой работы содержится в публикации [4]. В настоящей заметке мы хотим обратить внимание на один поучительный аспект допущенной в [3] ошибки, сводящийся, по сути, к тому, что эффект интерференции поляризованных лучей там представлен как эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП).

Напомним, что эффект ЭИП [5] в своём простейшем виде обнаруживается в условиях воздействия достаточно сильного резонансного поля на трёхуровневую квантовую систему со структурой уровней типа Λ -схемы (рис. 1). Оказывается, что действие поля накачки E_c (управляющего поля) в одном плече схемы (при том, что и исходный, и конечный уровни соответствующего перехода не заселены) делает систему прозрачной для слабого пробного (сигнального) поля E_s , действующего во втором плече, при условии, что разность частот двух полей совпадает с частотой перехода между двумя нижними уровнями Λ -схемы.

Формирующийся таким образом узкий провал в спектре поглощения системы (в канале пробного света $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$) (см. рис. 1)) обеспечивает высокую крутизну дисперсии показателя преломления вблизи точки про-

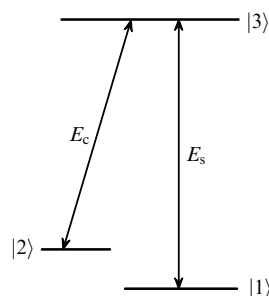


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней (Λ -схема), иллюстрирующая общую конфигурацию наблюдения резонанса когерентности состояний $|1\rangle$ и $|2\rangle$. Эффект ЭИП отличается тем, что наблюдается в условиях $E_c \gg E_s$ и является линейным по пробному полю E_s , а эффекты когерентного пленения населённости и светоиндуцированной спиновой прецессии наблюдаются в полях сопоставимых амплитуд (точнее, сопоставимых частот Раби на переходах $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ и $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$).

зрачности и может проявляться, в частности, в гигантском снижении групповой скорости света, распространяющегося в такой среде. В этом и состоит суть явления "медленного света", основанного на эффекте ЭИП.

Если обратиться к физическому содержанию эффекта ЭИП, то можно вспомнить, что он представляет собой, по сути, предельно асимметричный (по интенсивностям двух полей) случай явления когерентного пленения населённости [6], наблюдаемого обычно по провалу в спектре возбуждения люминесценции при сопоставимых интенсивностях полей. В свою очередь, эффект когерентного пленения населённости — это прямое развитие идеологии светоиндуцированной спиновой прецессии [7], когда нижними уровнями Λ -схемы служат магнитные подуровни основного состояния. А эффект светоиндуцированной спиновой прецессии — это не что иное, как эффект оптической ориентации (или оптического выстраивания) во вращающейся системе координат [8]. Так что, не умаляя оригинальности эффекта ЭИП — единственного "линейного" эффекта среди перечисленных резонансов когерентности, можно сказать, что он

В.С. Запасский. Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, ул. Ульяновская 1, 198504 Петродворец, Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел. (812) 428-45-66
E-mail: zap@vz4943.spb.edu

Статья поступила 14 ноября 2008 г.

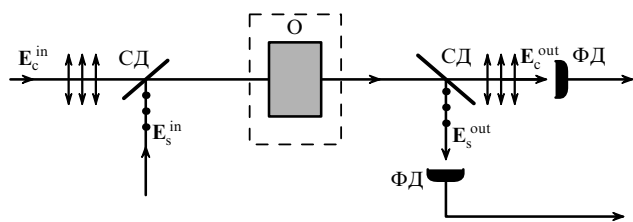


Рис. 2. Упрощённая схема эксперимента по наблюдению ЭИП в вырожденной Λ -схеме. E_c и E_s — управляющий (контрольный) и пробный (сигнальный) пучки, СД — поляризационные светоделители, ФД — фотодетекторы, О — объект исследования.

является одной из модификаций эффекта обобщённого оптического выстраивания. В работе [3] была сделана попытка реализовать эффект ЭИП, так сказать, на нижней ступеньке приведённой иерархии — когда нижними уровнями Λ -схемы являются *вырожденные магнитные подуровни* основного состояния.

Описанные в работе [3] эксперименты проводились в парах атомов ^{87}Rb на переходе $5^2S_{1/2}$, $F = 2 \rightarrow 5^2P_{1/2}$, $F = 1$ с использованием перестраиваемого полупроводникового лазера в качестве источника излучения и ячейки Поккельса для управления поляризацией пучка. Важная особенность эксперимента состояла в том, что в качестве управляющего и сигнального пучков использовались ортогональные поляризационные составляющие одного лазерного пучка. Иначе говоря, реальные изменения поляризации проходящего через кювету света производились с помощью управляющей ячейки Поккельса и рассматривались как результат примешивания к исходному управляющему пучку пробного пучка ортогональной поляризации. Упрощённая схема эксперимента показана на рис. 2. Сильный управляющий и слабый пробный пучки суммируются на входном поляризационном делителе, а после прохождения через атомную систему вновь разделяются по тому же поляризационному признаку и поступают на фотодетекторы.

Самый первый экспериментальный факт, который отмечают авторы статьи и который, по их мнению, служит прямым свидетельством проявления эффекта ЭИП, состоит в том, что исследуемая система непрозрачна для пробного света в отсутствие управляющего света и становится практически полностью прозрачной при его наличии. Разумеется, авторы рассматривают это явление как эффект нелинейной оптики, эффект оптического управления пропусканием среды. На первый взгляд это кажется убедительным.

Но так ли это? Должен ли оптический элемент, заключённый в отмеченный на рис. 2 штриховым прямоугольником "чёрный ящик", быть *нелинейным* для демонстрации описанного эффекта? Покажем, что вовсе нет.

Будем считать, что управляющий и пробный пучки поляризованы не циркулярно (как в статье [3]), а линейно. Это ровным счётом ничего не меняет с точки зрения физики (поскольку рассматриваемая система поддается и ориентации, и выстраиванию), но делает рассмотрение более наглядным.

Будем также полагать, что взаимно когерентные поля находятся в фазе и при сложении на входном светоделителе образуют линейно поляризованный свет. Плоскость поляризации этого света будет, очевидно, составлять с плоскостью поляризации пробной волны угол φ , равный

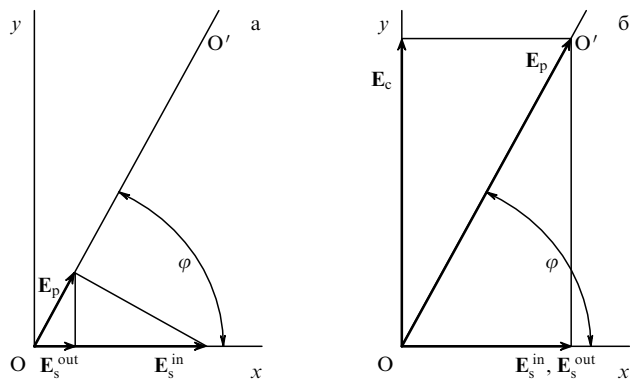


Рис. 3. Векторная диаграмма, описывающая преобразование поля пробной волны E_s в схеме рис. 2 с поляризатором в "чёрном ящике" при отсутствии (а) и наличии (б) управляющего поля E_c . Поля E_s и E_c поляризованы вдоль осей x и y соответственно. Прямая OO' направлена вдоль поляризующего направления поляризатора. E_s^{in} и E_s^{out} — векторы пробного поля на входе и выходе оптической схемы, E_p — вектор поля на выходе из поляризатора.

$\arctan(E_c/E_s)$, где E_c и E_s — амплитуды управляющей (control) и пробной (signal) волн (рис. 3).

Давайте поместим вместо кюветы с парами рубидия простой линейный поляризатор, ось пропускания которого составляет с плоскостью поляризации пробного света тот же самый угол φ . В результате при отсутствии управляющего поля пробный пучок на пути к детектору будет сначала ослаблен установленным нами поляризатором (по закону Малюса, фактор ослабления $\cos^2 \varphi$), а затем в той же мере — выходным светоделителем (рис. 3а). Понятно, что полное ослабление пробного пучка, определяемое фактором $\cos^4 \varphi$, формально может быть сколь угодно большим, если угол φ достаточно близок к 90° .

Итак, пробный свет проходит через чёрный ящик плохо. Включаем управляющий свет. Теперь из входного светоделителя выходит линейно поляризованный свет, плоскость поляризации которого точно совпадает с поляризующим направлением поляризатора в "чёрном ящике", и свет проходит через него без ослабления и изменения своего состояния поляризации. Иначе говоря, при включении управляющего пучка "чёрный ящик" становится прозрачным для всего падающего света и, в том числе — что для нас важно, для его горизонтально поляризованной составляющей, т.е. для пробного света.

Это практически точная копия описанного в работе эффекта ЭИП (без учёта динамики процесса). На самом деле, исследованная в [3] среда действительно нелинейна, и свет как-то осуществляет её оптическое выстраивание и тем самым управляет её анизотропией. Это означает, что азимут пропускающего направления поляризатора "чёрного ящика" реально устанавливается не вручную, как мы предполагали в нашем умозрительном эксперименте, а светом. Отсюда возникают некоторые расхождения между описанной нами картиной и наблюдениями работы [3]. Например, в нашей упрощённой схеме при включённом управляющем свете на выходе схемы регистрируется пробный свет даже при отсутствии его на входе. Однако легко видеть, что именно это авторы [3] наблюдают в опытах по "остановке света", где после предварительных манипуляций с поляризацией пучка и

последующей темновой паузы сигнал в канале пробного света наблюдается при его отсутствии на входе. В эксперименте сигнал не может наблюдаться долго, поскольку через некоторое время контрольный пучок выстроит атомную систему вдоль своей плоскости поляризации, т.е. установит нужным образом поляризатор чёрного ящика ($\varphi = 90^\circ$) (см. рис. 3), и проекция контрольного пучка на канал пробного света обратится в нуль. В нашей модели положение поляризатора чёрного ящика фиксировано и поэтому сигнал пробного света не исчезает.

Таким образом, мы видим, как легко эффект ЭИП имитируется интерференцией поляризованных лучей, если в качестве "управляющего" и "пробного" полей используются ортогональные компоненты одного и того же пучка.

Возникает, однако, вопрос: а может быть, это не имитация эффекта ЭИП, а самый настоящий эффект ЭИП или, точнее, то, во что он превратился в вырожденной Λ -схеме? В определённом смысле так оно и есть. Но, во-первых, нет никаких оснований переобозначать старые, хорошо известные эффекты классической оптики, если мы не открыли ничего нового. А во-вторых, и это самое главное, в вырожденной Λ -схеме при "замораживании" фазы пробного света (относительно фазы контрольной волны) меняется *симметрия* задачи. В стандартном невырожденном случае ЭИП анизотропия среды формируется исключительно управляющим светом и слабый пробный свет зондирует её невозмущающим образом. В рассматриваемом здесь случае вырожденной Λ -схемы пробный свет со сколь угодно малой интенсивностью изменяет характер анизотропии среды (как именно — зависит от значения "замороженной" фазы) и по этой причине принципиально не может выполнять свои функции. Кроме того, по отношению к пробному свету, поляризованному вдоль оси x , оптическую среду с осью анизотропии OO' вообще нельзя охарактеризовать какими-либо оптическими констан-

тами, а свету соответственно нельзя приписать какую-либо определённую групповую или фазовую скорость [4, 9]. Критерием неприменимости стандартной модели ЭИП является сопоставимость обратного частотного интервала между уровнями $|1\rangle$ и $|2\rangle$ со временем измерения.

Заметим в заключение, что кажущийся эффект воздействия света на свет в одном, "отдельно взятом" порядке интерференции — явление вполне тривиальное. Применительно к рассмотренной здесь поляризационной геометрии опыта оно исчерпывающим образом описывается стандартной операцией умножения матрицы линейного поляризатора на вектор Джонса входного излучения. Тем не менее распознавание этого явления в конкретных экспериментальных ситуациях иногда оказывается не столь простым. По крайней мере работа [3], в которой была допущена ошибка именно такого рода, получила безоговорочное признание научного сообщества и до сих пор остаётся широко цитируемой в публикациях по "медленному свету". Именно поэтому мы сочли описанную историю поучительной и заслуживающей дополнительного внимания.

Автор благодарен Е.Б. Александрову за многочисленные полезные дискуссии.

Список литературы

1. Kasapi A et al. *Phys. Rev. Lett.* **74** 2447 (1995)
2. Hau L V et al. *Nature* **397** 594 (1999)
3. Phillips D F et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 783 (2001)
4. Александров Е Б, Запасский В С *УФН* **174** 1105 (2004) [Aleksandrov E B, Zapasskii V S *Phys. Usp.* **47** 1033 (2004)]
5. Harris S E *Phys. Today* **50** (7) 36 (1997)
6. Агапьев Б Д и др. *УФН* **163** (9) 1 (1993) [Agap'ev B D et al. *Phys. Usp.* **36** 763 (1993)]
7. Bell W E, Bloom A L *Phys. Rev. Lett.* **6** 280 (1961)
8. Happer W *Rev. Mod. Phys.* **44** 169 (1972)
9. Козлов Г Г, Александров Е Б, Запасский В С *Оптика и спектроскоп.* **97** 969 (2004) [Kozlov G G, Aleksandrov E B, Zapasskii V S *Opt. Spectrosc.* **97** 909 (2004)]

On electromagnetically induced transparency in the degenerate Λ -scheme

V.S. Zapasskii

Physics Department, Saint-Petersburg State University,
ul. Ul'yanovskaya 1, 198504 Petrodvorets, St.-Petersburg, Russian Federation
Tel. (7-812) 428-45 66
E-mail: zap@vz4943.spb.edu

How the classical phenomenon of linear optics, the interference of polarized beams, can imitate the effect of electromagnetically induced transparency is demonstrated using the light stopping experiment as an example.

PACS numbers: 42.25.Hz, 42.50.Gy, **42.65. - k**

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200902e.0197

Bibliography — 9 references

Received 14 November 2008

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (2) 197–199 (2009)

Physics – Uspekhi **52** (2) (2009)