

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Легенда об остановленном свете

Е.Б. Александров, В.С. Запасский

Показано, что сенсационная авторская интерпретация экспериментов, описанных в статье "Хранение света в атомных парах" ("Storage of light in atomic vapor", D.F. Phillips et al., Phys. Rev. Lett., 2001, v. 86, p. 783) является ошибочной. Сделанные в этой работе наблюдения элементарно объясняются в рамках стандартных представлений о светоиндуцированной анизотропии ансамбля атомов, способных к ориентации и выстраиванию основного состояния. Зарегистрированный авторами отклик атомной среды не имеет отношения к эффектам "хранения света", "динамического снижения групповой скорости" и "сжатия светового импульса". Настоящая статья представляет собой расширенную версию критической заметки, отвергнутой журналом "Physical Review Letters".

PACS numbers: 42.25.Ja, 42.50.Gy

Содержание

1. Введение (1105).
 2. Описание эксперимента (1106).
 3. Суть ошибки (1106).
 4. Авторская интерпретация результатов (1106).
 5. Исправление ошибок (1107)
 6. Что действительно "запасается" в среде? (1107).
 7. Заключение (1108).
- Список литературы (1108).

1. Введение

Проблема временной задержки световой волны актуальна для многих областей науки и техники. Без особых трудностей, с помощью обычных оптических линий задержки удается задерживать оптические сигналы на времена до $\sim 10^{-7}$ с. Дальнейшее продвижение в этом направлении затрудняется необходимостью создания линий задержки огромной длины. Именно поэтому описанные в [1] эффективные эксперименты, демонстрирующие возможность "остановки света" и задержки светового импульса на времена порядка 10^{-3} с в среде с линейными размерами порядка нескольких сантиметров вызвало большой интерес исследователей. Наше внимание к упомянутой работе было привлечено одним из наших коллег, который рассматривал открывающиеся возможности использования этого эффекта в системах обработки оптической информации. Результат нашего обстоятельного знакомства с этой

работой оказался неожиданным: стало очевидным, что претензии ее авторов на демонстрацию хранения света в среде с его последующим светоиндуцированным высвобождением не имеют ничего общего с реальными процессами, протекающими в исследованной ими системе.

Полагая, что критика опубликованной работы должна направляться в адрес издания, его опубликовавшего, мы представили для публикации в журнал *Physical Review Letters* краткую заметку в формате Comment. В этой заметке мы указывали на допущенную авторами [1] ошибку, которая полностью исключала возможность грамотной интерпретации описанных экспериментов. Заметка эта более года рассматривалась редакцией журнала. К сожалению, ни в одной из полученных нами пяти рецензий (начиная с ответа авторов работы [1] и кончая ответом Главного редактора Американского физического общества), основной (и, по сути, единственный) тезис нашей критики вообще не был затронут.

В настоящей статье, которая представляет собой расширенную версию той самой заметки, мы кратко описываем эксперимент [1], рассматриваем суть допущенной авторами ошибки, и показываем, что картина наблюдаемых в этом эксперименте сигналов не содержит ничего нового и полностью укладывается в традиционные представления физики оптической накачки 50-летней давности.

Одним из аргументов наших оппонентов, в дискуссии с редакцией журнала *Physical Review Letters*, служило отсутствие у нас теоретического моделирования эффекта. Нам казалось, что эта тема неуместна, поскольку речь идет о допущенной авторами элементарной ошибке, касающейся оптики анизотропных сред. Тем не менее мы выполнили это пожелание наших оппонентов. В публикации [2] приведено математическое моделирование зарегистрированных в [1] эффектов, показано, что они обязаны наблюдаться практически в любых фотохромных средах, и продемонстрировано полное качественное и количественное согласие расчетов с экспериментальными данными [1]. (Результат моделирования воспроизведен ниже на рис. 2 в сопоставлении с экспериментальной кривой.)

Е.Б. Александров, В.С. Запасский. Всероссийский научный центр "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", 199034 Санкт-Петербург, Биржевая линия 12, Российская Федерация
E-mail: zap@vz4943.spb.edu

Статья поступила 14 июня 2004 г.,
после доработки 8 сентября 2004 г.

2. Описание эксперимента

Схема использованной в [1] экспериментальной установки приведена на рис. 1. Атомные пары ^{87}Rb в нулевом магнитном поле возбуждались лазерным лучом в области резонансного перехода $5^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5^2P_{1/2}, F'=1$. Авторы рассматривали возбуждающий лазерный пучок (в общем случае эллиптически поляризованный) как суперпозицию из двух когерентных циркулярно поляризованных пучков: сильного "контрольного" пучка с поляризацией σ_+ и более слабого σ_- -поляризованного "сигнального" пучка, который включался всего на несколько десятков микросекунд. После прохождения через ячейку с парами рубидия свет вновь разделялся на две циркулярно поляризованные компоненты (σ_+ и σ_-), которые детектировались отдельными фотоприемниками. Существенно, что эти два пучка считались независимыми, т.е. σ_+ -компонента на выходе из среды всегда приписывалась "контрольному" пучку (с σ_+ -поляризацией на входе), а σ_- -компонента — "сигнальному" пучку (с σ_- -поляризацией на входе). Такой подход содержит простую (и фатальную!) ошибку, которая делает авторскую интерпретацию эксперимента [1] полностью неадекватной.

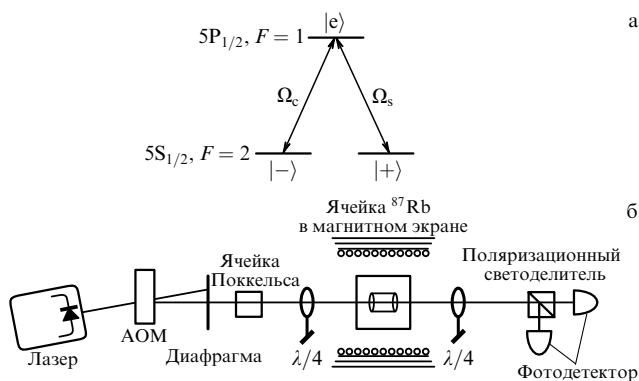


Рис. 1. (а) Упрощенная Λ -схема уровней ^{87}Rb , резонансно взаимодействующих с контрольным (Ω_c) и сигнальным (Ω_s) полями. Символами $|-\rangle$ и $|+\rangle$ помечены уровни основного состояния $F=2$, $m=0$ и $m=+2$ соответственно, символ $|e\rangle$ соответствует уровню $F=1$, $m=1$ возбужденного состояния. (б) Схема экспериментальной установки (АОМ — акустооптический модулятор). Рисунок заимствован из работы [1].

Мы рассмотрим описанные в [1] экспериментальные наблюдения в самом общем виде, опираясь на простейшие физические соображения, чтобы представить экспериментальную ситуацию работы [1] в максимально прозрачном виде. Мы не будем касаться приведенного в [1] теоретического рассмотрения, во-первых, потому что мы не считаем корректным моделирование ситуации с помощью простейшей трехуровневой Λ -схемы, в то время как исследуемый спектральный переход включает в себя 16 уровней, 11 из которых непосредственно формируют динамику возмущения системы через излучательные и столкновительные процессы релаксации. Кроме того, использованные в [1] сильные световые поля, связывая между собой 8 уровней, делают приближенные методы расчета неадекватными. И, наконец, что самое важное, даже самые изощренные и совершенные методы теоретического описания не освобождают авторов от необходимости учета простейших законов оптики анизотропных сред, о которых и пойдет речь.

3. Суть ошибки

В соответствии с вышесказанным, авторы [1] фактически исследовали отклик атомной системы на импульсную модуляцию поляризации света накачки. Примешивание к исходно циркулярно поляризованному "контрольному" пучку ортогонально поляризованной компоненты превращало действующее на среду излучение (на время действия "сигнального" импульса) из циркулярно поляризованного в эллиптически поляризованное (реально импульс поляризации создавался с помощью ячейки Погкельса). В принципиально нелинейном эксперименте (о котором идет речь) среда, возбуждаемая эллиптически поляризованным пучком с выделенной осью в плоскости волнового фронта, утрачивает свою аксиальную симметрию (которая первоначально обеспечивалась отсутствием внешнего магнитного поля и циркулярной поляризацией накачки), циркулярно поляризованные волны перестают быть собственными волнами среды, и авторский подход, подразумевающий взаимную независимость "контрольного" и "сигнального" пучков, становится неправомерным. Теперь "контрольный" циркулярно поляризованный пучок, распространяющийся в среде, будет испытывать эллиптическое двулучепреломление и дихроизм (последний — наиболее важен). При этом его поляризационное состояние будет меняться по мере распространения через среду, и на выходе из среды "контрольный" (исходно σ_+ -поляризованный) пучок окажется эллиптически поляризованным. Будучи разложенным на выходном светоделителе на базисные циркулярные поляризации, он внесет вклад в сигнал второго детектора, который, по мысли авторов, способен регистрировать только "сигнальный" σ_- -поляризованный пучок. То же самое можно сказать и про "сигнальный" пучок, который будет также регистрироваться и в "контрольном" и в "сигнальном" каналах. Это, вкратце, — суть ошибки работы [1].

4. Авторская интерпретация результатов

Рассмотрим более детально наблюдавшуюся авторами [1] динамику интенсивности "сигнального" пучка.

На рисунке 2 приведена одна из экспериментальных временных зависимостей интенсивности "сигнального" пучка, демонстрирующая "задержку" и "остановку" света. В верхней части рисунка показаны временные зависимости интенсивностей "контрольного" и "сигнального" пучков (штриховая и пунктирная кривые соответственно), а нижняя (зашумленная) кривая показывает временную зависимость интенсивности "сигнального" пучка на выходном детекторе. Начальные условия среды формируются длительным воздействием на нее "контрольного" пучка. Представленные временные зависимости включают три характерных временных участка (обозначены на рисунке цифрами 1, 2 и 3), каждый из которых, по мнению авторов, обнаруживает необычное поведение "сигнального" пучка на выходе из среды.

На участке 1 (до темновой паузы) на среду воздействуют и "контрольный", и "сигнальный" пучки, причем, как легко видеть, "сигнальный" пучок на выходе из среды оказывается сильно задержанным относительно времени входа (на входе "сигнальный" импульс уже завершился, а на выходе он еще не достиг своего максимума). По оценкам авторов, эта задержка составила ~ 30 мкс, что при длине кюветы в несколько сантиметров соответствует групповой скорости "сигнального" импульса $\sim 1 \text{ км с}^{-1}$.

Участок 2 — это темновая пауза, когда нет ни "контрольного", ни "сигнального" пучков (выключение и

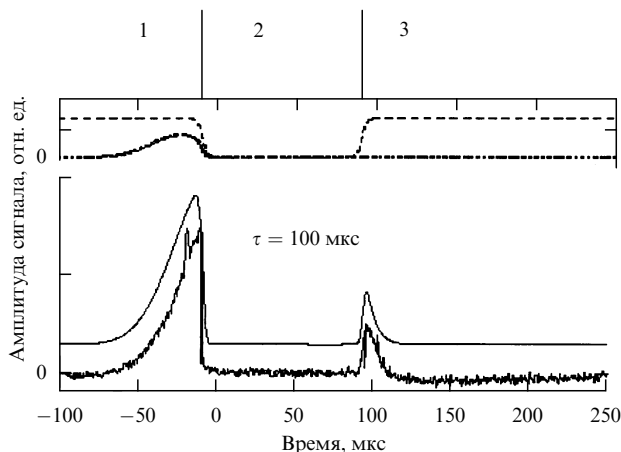


Рис. 2. Фрагмент рисунка из работы [1], демонстрирующий эффект "хранения света" в ячейке с парами ^{87}Rb . Время "хранения" 100 мкс. В верхней части рисунка представлено изменение во времени интенсивности входных "контрольного" (штриховая кривая) и "сигнального" (сплошная кривая) лучей. В нижней части рисунка показано поведение во времени интенсивности выходного "сигнального" луча. На зашумленный экспериментальный график из [1] наложен (со сдвигом по вертикали) результат математического моделирования из работы [2].

включение исходного пучка производится *адиабатически*). Авторы специально подчеркивают тот (с их точки зрения нетривиальный!) факт, что во время темновой паузы никакого выходного сигнала в канале σ_- не наблюдается: "Note that no output signal was observed as long as the control field was off". По их мнению этот факт свидетельствует о том, что крайне медленно распространявшийся в парах рубидия "сигнальный" пучок полностью остановился в момент выключения "контрольного" света.

На участке 3 "контрольный" σ_+ -пучок включается вновь и, как полагают авторы, хвост "сигнального" импульса, "хранившегося" в течение всего времени темновой паузы в среде в пространственно сжатом состоянии, "высвобождается" и регистрируется фотоприемником. Изменяя длительность темновой паузы (до 0,5 мс), авторы варьировали время "хранения" света в среде.

Так выглядят экспериментальные наблюдения работы [1] в истолковании ее авторов, без учета меняющегося во времени характера анизотропии среды. При учете последнего факта, большая часть утверждений авторов теряет смысл, и вся картина наблюдений лишается какой-либо новизны или парадоксальности.

5. Исправление ошибок

На участке 1 среда, предварительно ориентированная сильным "контрольным" пучком, подвергается импульсному воздействию эллиптически поляризованного света, что приводит к частичному выстраиванию атомной системы. Ввиду сопоставимости длительности "сигнального" импульса с характерным временем выстраивания среды, выстраивание следует с некоторым запозданием за импульсом эллиптичности действующего на среду света. Аналогичным образом ведет себя и доля контрольного пучка, детектируемая в "сигнальном" канале σ_- . Это запаздывание, очевидно, не имеет ничего общего с заявленным уменьшением (в 300 000 раз!) групповой скорости света. Рост сигнала на участке 1 отражает не форму переднего фронта "сигнального" импульса, а процесс

накопления выстраивания спинов атомов в основном состоянии. Его задержка связана с *динамикой анизотропии среды*, а не с низкой групповой скоростью света.

На участке 2 (темновая пауза) накопленное в среде спиновое выстраивание релаксирует с характерным временем порядка 1 мс. Вопреки утверждению авторов никакой энергии в среде не запасено, и отсутствие выходного сигнала при отсутствии света на входе представляется вполне естественным.

На участке 3, вновь включенный "контрольный" σ_+ -поляризованный пучок продолжает детектировать остаточную эллиптическую анизотропию среды (частично релаксировавшую во время темновой паузы), которая, как и раньше, проявляется в неортогональности циркулярных поляризаций в среде и в ответвлении части "контрольного" пучка в "сигнальный" канал. Авторы ошибочно принимают сигнал в канале регистрации σ_- за хвост давно выключенного "сигнального" импульса. Однако подобие кинетик этого хвоста и наблюдаемого σ_- -сигнала имеет случайную природу: кинетика спада выстраивания может сколь угодно отличаться от кинетики давно прошедшего сигнального импульса, поскольку определяется интенсивностью "контрольного" пучка, разрушающего (наряду с релаксационными процессами) выстраивание системы.

Таким образом, если учесть проигнорированный авторами работы [1] эффект выстраивания атомной системы в поле эллиптически поляризованной накачки, то все наблюдения, описанные в [1], становятся тривиальными.

6. Что действительно "запасается" в среде?

В определенном смысле, "контрольный" пучок, включенный после темновой паузы, действительно *считывает* информацию об относительной фазе и энергии действовавшего ранее "сигнального" пучка. Эта информация содержится в величине и направлении выстраивания и определяет (через поляризацию выходящего света) фазу и амплитуду волны, проектируемой в "сигнальный" канал. Однако, во-первых, авторы не интересуются фазой сигнальной волны, а, во-вторых, эта запасенная анизотропия, разумеется, не имеет никакого отношения к "запасанию света" (storage of light), физический смысл которого авторы объясняют совершенно недвусмысленно: "Световой импульс, длиной в несколько километров в свободном пространстве, сжимается [в кювете] до длины в несколько сантиметров и преобразуется в спиновое возбуждение паров атомов рубидия. Через некоторый промежуток времени контролируемой длительности процесс инвертируется, и атомная когерентность вновь преобразуется в световой импульс". На наш взгляд, описанный в [1] эксперимент настолько прост, что не оставляет места для подобных спекуляций. Заметим также, в дополнение ко всему сказанному выше, что в отсутствие магнитного поля (как это было в эксперименте [1]) атомная когерентность не несет энергии: запасенная в среде спиновая "когерентность" сводится к пространственно однородной анизотропии среды.

Бессодержательность разговоров об "остановленном свете" можно сделать совсем очевидной с помощью мысленной модификации эксперимента [1], при которой атомный пар заменяется оптически нелинейной средой, светоиндуцированная анизотропия которой вообще не деградирует со временем. Пусть пластинка такого материала облучается линейно поляризованным световым импульсом произвольной длительности. Очевидно, что такой свет может рассматриваться как когерентная суперпозиция σ_+ -поляризованного "контрольного" пучка и σ_- -

поляризованного "сигнального" пучка. После облучения пластинка становится линейно анизотропной. Пусть она стала, например, четвертьволновой. Теперь после "темновой паузы" произвольной длительности мы можем облучить пластинку "контрольным" циркулярно поляризованным пучком и получить на выходе "сигнальный" пучок σ_- -поляризации (отсутствующий на входе!). Именно это авторы называют "хранением" света и его "высвобождением" под действием "контрольного" пучка. В терминологии авторов любая четвертьволновая пластинка хранит в себе "запасенный" циркулярно поляризованный свет, который может быть "высвобожден", например, путем ее освещения циркулярно поляризованным светом противоположной спиральности.

7. Заключение

В ходе нашей полемики с журналом *Physical Review Letters*, наши оппоненты настаивали, что мы не понимаем роли когерентности двух воздействующих полей (вырожденной) Λ -схеме и сводим процесс к оптической накачке в понимании А. Кастлера. Считаем нужным специально подчеркнуть, что конкретный механизм возникновения выстраивания для нашего рассмотрения не имеет никакого значения (это также демонстрируют расчеты, проведенные в работе [2]). Единственно важным является неоспоримый факт возникновения в системе (под действием "сигнального" импульса) эллиптической анизотропии вместо исходной круговой (это — тот самый ключевой момент нашей критики, который не был прокомментирован ни одним из наших оппонентов). В публикации [2] мы показываем, что зарегистрированные авторами [1] эффекты способны универсальным образом проявляться практически в любых фотохромных средах.

Еще один мотив отклонения нашей статьи был таков: критикуемая статья [1] породила множество последующих публикаций, и нам следует рассмотреть их все. Не вступая здесь в полемику по поводу обоснованности такой претензии, заметим только, что мы не ставили себе столь масштабной задачи и, более того, не относим нашу критику ко всей этой области исследований, которая, несомненно, имеет реальные достижения. Вместе с тем, по нашему мнению, ажиотаж, поднятый в последние годы вокруг эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности и так называемых "темных состояний", едва ли оправдан. Так, эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности известен уже более 40 лет [3]. Тот факт, что групповая скорость света может сильно отличаться от скорости света в вакууме также известен уже лет сто [4]. Многократно наблюдалось изменение формы импульса при его распространении в нелинейной среде, что толкова-

лось как изменение в широких пределах его скорости — в том или ином понимании (в одной из первых таких работ [5] сообщалось, что скорость импульса, распространяющегося в инвертированной среде, превышала скорость света в 6–9 раз). Детальный теоретический анализ множества ситуаций такого рода был проведен Вайнштейном [6] (см. также библиографию по этому вопросу к главе 10 сборника [7]; заметим, что во всех цитированных публикациях авторы подчеркивают, что наблюдаемые эффекты не покушаются на принцип причинности).

Что касается возможности остановки и хранения светового возбуждения в среде, то в различной форме эти явления также известны, — например, в виде фотонного эха, хранения света в резонаторах, а также в эффектах статической и динамической голографии (не говоря уже о некогерентных способах запасаения света при фото- и термолюминесценции, фосфоресценции и т.д.). Светоиндуцированную анизотропию при желании тоже можно рассматривать как хранилище света или, по крайней мере, как факсимиле света, который ее создал. Наши возражения касаются не терминологии, а адекватности интерпретации наблюдаемых явлений.

Итак, интерпретация полученных в работы [1] результатов содержит очевидные ошибки, а приведенные в ней экспериментальные наблюдения (сами по себе вполне корректные) не содержат никаких свидетельств "хранения" и "высвобождения" света. Эта работа, по нашему мнению, не только вводит читателей в заблуждение, но и порождает серьезные сомнения в отношении многих других публикаций, касающихся этой модной в последнее время тематики и рассматривающих работу [1] как одну из основополагающих. По этой причине мы считаем важной адекватную оценку работы [1], имеющей необычайно высокий индекс цитируемости и даже восторженные отзывы в СМИ. В правоте нашей оценки мы дополнительно утвердились, получив отклики на нашу публикацию в Интернете [8].

Список литературы

1. Phillips D F et al. "Storage of light in atomic vapor" *Phys. Rev. Lett.* **86** 783 (2001)
2. Козлов Г Г, Запасский В С, Александров Е Б *Онтика и спектроск.* (в печати)
3. Bell W E, Bloom A L *Phys. Rev. Lett.* **6** 280 (1961)
4. Brillouin L *Wave Propagation and Group Velocity* (New York: Academic Press, 1960)
5. Басов Н Г и др. *ДАН СССР* **165** 58 (1976)
6. Вайнштейн Л А *УФН* **118** 339 (1976)
7. Chiao R Y (Ed.) *Amazing Light: A Volume Dedicated to Charles Hard Townes on His 80th Birthday* (New York: Springer, 1996)
8. Alexandrov E B, Zapasskii V S, quant-ph/0304192

A fairy tale of stopped light

E.B. Aleksandrov, V.S. Zapasskii

*All-Russian Research Center "Vavilov State Optical Institute",
Birzhevaya liniya 12, 199034 St.-Petersburg, Russian Federation
Tel. (7-812) . Fax (7-812)
E-mail: zap@vz4943.spb.edu*

It is shown that the sensational interpretation of the experiments described in the paper "Storage of light in atomic vapor" (D.F. Phillips et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2001, v. 86, p. 783) is erroneous. The observations presented in this paper are easily explained in the framework of standard concepts of the light-induced anisotropy of an ensemble of atoms amenable to optical orientation and alignment. The response of the atomic medium detected in [1] has nothing to do with the authors' claims about 'storage of light', 'dynamic reduction of the group speed of light', and 'compression of the light pulse'. This paper is an extended version of our critical comment rejected by *Physical Review Letters*.

PACS numbers: 42.25.Ja, 42.50.Gy
Bibliography — 8 references

Received 14 June 2004, revised 8 September 2004