

# ПРОЗРАЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ

**Э**лектромагнитно-индуцированная прозрачность (EIT) – это способность лазерного луча определенной длины волны проходить через непрозрачный конденсат Бозе-Эйнштейна (БЭК) почти прозрачно. Фокус, осуществляемый с помощью двух лазеров, при котором непрозрачная среда становится прозрачной, можно осуществить в системах, состоящих из крошечных оптических резонаторов. Этот фокус потенциально может иметь огромное значение для оптической связи и оптической обработки информации. Об этом идет речь в заметке, опубликованной авторами в журнале *Nature* [1].

Исследование *электромагнитно-индуцированной прозрачности* – необычного явления, при котором два лазерных луча взаимодействуют в оптическом материале, – и использование новейших технологий для производства структур еще меньшего размера для управления светом – результат последних исследований и разработок в области оптической физики. В своей статье [2] Ксу (Xu) с коллегами, умело объединив теорию (EIT) и практику (микроструктуры управления), продемонстрировал полностью оптический аналог EIT, созданный на основе связанных оптических микрорезонаторов. Этот результат, возможно, откроет новые непроторенные дороги в фотонике, предлагая более эффективные и меньшие (в перспективе) по размерам приборы для управления светом и его передачей.

При первоначальной реализации EIT [3] использовалось взаимодействие лазерного луча с "облаком" атомов. Оно было основано на том, что если падающий фотон имеет "резонансную" энергию, равную разности энергий двух уровней какого-то атома, то фотон будет поглощен этим атомом. Энергия фотона используется при этом для возбуждения данного атома, то есть перевода его в более высокое энергетическое состояние. Когда два независимых лазерных луча возбуждают два таких атомных перехода, которые имеют один и тот же верхний уровень (рис.1), то наличие деструктивной интерференции между полями, соответствующими различным направлениям распро-

странения фотонов от верхнего уровня к нижним уровням, допускает (с точки зрения квантовой механики) определенную вероятность исчезновения этого атома с верхнего уровня. Как только на этом верхнем уровне не останется ни одного атома, то исчезнет и поглощение приложенных полей. Поэтому такой атом инициирует возникновение "прозрачности" для приложенных лазерных полей в исключительно узкой частотной области (рис.2). Этот процесс интерференции имеет аналогию в классической физике, где наличие связи между двумя генераторами приводит к уменьшению амплитуды их генерации [4].

Явление EIT можно использовать для значительного усиления нелинейных оптических эффектов. Например таких, как зависимость показателя преломления (ПП) вещества от интенсивности падающего света. От этого эффекта зависит работа многих фотонных приборов. В общем случае, такие нелинейные оптические эффекты могут наблюдаться при использовании настраиваемого по частоте лазера в качестве источника приложенного поля, если он настраивается близко к частоте какого-то атомного перехода. К сожалению, поглощение лазерного луча при этом также возрастает на тех же частотах. Поэтому во многом польза от работы вблизи резонанса снижается. Если применяются два лазерных источника, то можно воспользоваться упомянутой квантовой интерференцией, чтобы быть уверенным, что атомное поглощение устраняется, а значительный нелинейный отклик в то же время сохраняется.

## Эффект ЕИТ

Для возникновения обычного эффекта ЕИТ в атомной системе мощное поле накачки  $\omega_p$  настраивается на разность атомных уровней энергии первого перехода (1–2), рис. 1, и создает "окно прозрачности" для поля сигнала  $\omega_s$ , которое настраивается на второй переход (1–3).

Деструктивная интерференция между двумя путями поглощения при распространении полей приводит к появлению узкого пика возрастания передачи (рис. 2) внутри широкой линии поглощения. Показатель преломления материала быстро меняется в очень узком частотном диапазоне. Возрастающая при этом дисперсия может привести к сверхмедленному распространению света. Этот узкий пик можно рассматривать так же, как точно определенный частотный маркер, удобный для прецизионных измерений.

В системе с микрорезонаторами, изученной Ксу и его коллегами [2], явление ЕИТ возникает в результате деструктивной интерференции между двумя полями, выходящими из двух разнесенных на определенное расстояние колец в направлении порта отражения (рис. 3). Ширина полосы поглощения определяется общими потерями в системе с кольцевыми микрорезонаторами (часто определяемыми главным образом связью с прямолинейным волноводом), тогда как ширина окна прозрачности определяется внутренними потерями кольцевых микрорезонаторов [2].

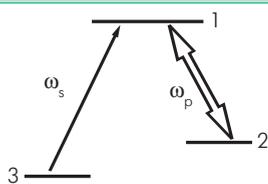


Рис. 1 Схема трехуровневой атомной структуры с ЕИТ

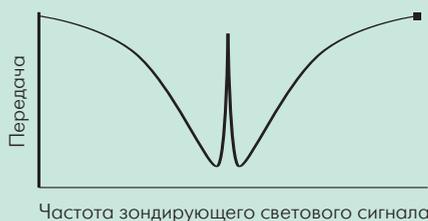


Рис. 2 Вид узкого пика передачи в широкой линии поглощения

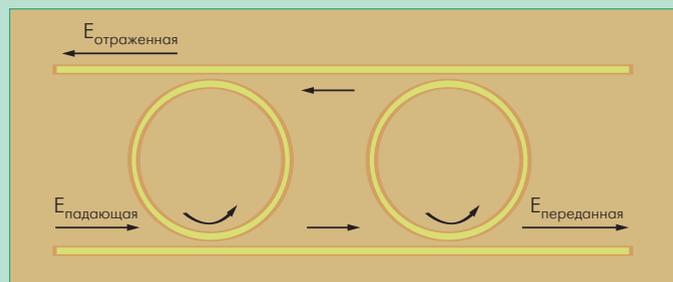


Рис. 3 Схема системы со связанными микрорезонаторами

Недостаток "традиционного" явления ЕИТ (а в общем случае нелинейной оптики, основанной на атомных резонансах) в том, что оно может быть реализовано для света в очень узком диапазоне частот вблизи фиксированных атомных переходов. Альтернативный путь достижения характеристик передачи, свойственных ЕИТ (как было исследовано Ксу и его коллегами [2]), – использование микроприборов, названных оптически микрорезонаторами [5] (рис. 3), резонансные характеристики которых зависят от их физических размеров. В таких

приборах резонансные частоты возникают каждый раз, когда внутри резонатора укладывается целое число длин волн падающего светового излучения. Более того, деструктивная интерференция возникает между светом, выходящим из двух связанных резонаторов.

На ранней стадии микрорезонаторами служили аэрозоли, содержащие частицы различных размеров. Однако современные технологии изготовления позволяют создавать отдельные резонаторы с жестким контролем получаемых резонансных частот [5]. Формы производимых резонаторов при этом самые различные. Это могут быть кольца, диски или сферы, в которых свет скользит по внешней поверхности, аналогично тому, как звук распространяется в "галерее шепота" (расположенный вдоль основания внутреннего купола собора св. Павла в Лондоне. – Прим. ред.). Микрорезонаторы могут иметь вид дефектов, намеренно вносимых в упорядоченную структуру фотонного кристалла. Их малые размеры идеально подходят для осуществления над потоком фотонов тех же операций, что выполняются в кремниевых чипах над электронами. Микрорезонаторы применяются в целом ряде приложений [6–8].

В 2004 году было предложено несколько методов "объединения" явления ЕИТ с оптическими микрорезонаторами для получения ЕИТ-подобных резонансов в интегральных оптических системах [6, 9, 10]. В 2005 году были опубликованы результаты лабораторного эксперимента с системой такого типа [11]. В этом эксперименте наблюдался ЕИТ-подобный спектр перехода для двух взаимодействующих микрорезонаторов (имеющих форму стеклянных сфер диаметром примерно 400 мкм), которые демонстрировали резонансы типа наблюдаемых в "галерее шепота".

Ксу и его коллеги [2] воспользовались результатами этого опыта и продвинулись дальше. Используя современные процедуры получения наноразмерных структур, они изготовили пару кольцевых микрорезонаторов, связанных с параллельными волноводами, выращенными на подложке по типу структур "кремний на изоляторе", характерных для электронных интегральных схем. Показатель преломления кремния, из которого был сделан волновод и кольца (равный 3,45), был значительно больше, чем ПП оксида кремния (1,46), окружающего кремниевые структуры со всех сторон. Это означало, что свет будет полностью локализован внутри колец очень малого диаметра, благодаря эффекту полного внутреннего отражения. В результате созданная система продемонстрировала ЕИТ-подобное поведение при измерении характеристики передачи для различных частот лазерного излучения, вводимого в систему. Авторы сделали несколько таких устройств, изменяя расстояние между кольцевыми микрорезонаторами. Это позволяло смещать (подстраивать) спектральное положение ЕИТ-подобного пика характеристики передачи.

## СЛОВАРЬ

**ВЕС** – Bose-Einstein Condensate – *конденсат Бозе-Эйнштейна* – квантовое состояние вещества (например, холодного газа из частиц типа бозонов), которое может быть достигнуто при температуре порядка 10–100 нанокельвинов, когда атомы вещества заморожены; среда с веществом в этом состоянии может значительно уменьшить скорость света (до десятков м/с или см/с) или даже остановить свет.

**ЕИТ** – Electromagnetically Induced Transparency – *электромагнитно-индуцированная прозрачность* – способность лазерного луча определенной длины волны проходить через конденсат Бозе-Эйнштейна (ВЕС) почти прозрачно (проходит примерно 25% импульсов), испытывая взаимодействие с атомами, "замерзшими" при температуре порядка  $50 \cdot 10^{-9}$  К.

зонансной линии, то сужение резонансной линии само по себе полезно при проведении точных оптических измерений таких величин, как напряженность магнитного поля [15]. Возможность синтезировать такие компоненты на оптических интегральных микросхемах, предложенная Ксу и его коллегами [2], нужно рассматривать как самый важный шаг в развитии таких интегрированных оптических устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Boyd R.W., Gauthier D.J. Transparency on an optical chip. – Nature, Vol. 441, June 2006, p.701–702.
2. Xu Q. et al. – Physical Review Letters, Vol.96, 2006, p.123901.
3. Harris S.E. et al. – Physical Review Letters, Vol.64, 1990, p.1107.
4. Alzar C.L.G. et al. – Am. Journal Physics, Vol.70, 2002, p.37.
5. Vahala K.J. – Nature, Vol.424, 2003, p.839.
6. Yanik M.F. et al. – Physical Review Letters, Vol.93, 2004, p.233903.
7. Scheuer J. & Yariv A. – Physical Review Letters, Vol.96, 2006, p.053901.
8. Heebner J. et al. – Optics Letters, Vol.29, 2004, p.769.
9. Smith D.D. et al. – Physical Review A, Vol. 69, 2004, p.063804.
10. Maleki L., Matsko A.B. et al. – Optics Letters, Vol.29, 2004, p.626.
11. Naweed A. et al. – Physical Review A, Vol. 71, 2005, p.043804.
12. Hau L.V. et al. – Nature. Vol. 397, 1999, p.594.
13. Boyd R.W., Gauthier D.J. – Prog. Optics, Vol.43, 2002, p.497.
14. Bigelow M.S. et al. Physical Review Letters, Vol.90, 2003, p.113903.
15. Scully M.O. & Fleischhauer M. – Physical Review Letters, Vol.69, 1992, p.1360.

Что же полезного во всем этом? Как указывает само название, эффект ЕИТ служит для создания прозрачности в материале, который исходно имеет исключительно высокое поглощение. Это значит, что он внесет свой вклад при использовании в таких приложениях, как оптические линии передачи дальней связи. Дисперсионные характеристики, получаемые в результате действия эффекта ЕИТ, допускают распространение "медленного света" при скоростях, составляющих небольшую часть от нормальной скорости света [12–14]. Очевидным применением такой технологии медленного света будут оптические буферные устройства для временного хранения световых импульсов.

Самое важное, возможно, в том, что ЕИТ-резонансы могут быть намного уже тех резонансов, которые получаются либо от атомных переходов, либо от микрорезонаторов. Так как резонансная частота может быть измерена, как правило, только с точностью до какой-то фиксированной доли от ширины ре-

## ОБ АВТОРАХ

**Доктор Роберт Бойд (Robert W. Boyd)** – сотрудник института Institute of Optics и кафедры физики и астрономии университета Rochester University, Rochester, New York, 14627, USA.

**Доктор Даниэль Гаутиер (Daniel Gautier)** – сотрудник кафедры физики университета Duke University, Durham, North Carolina 27708, USA