

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТНЫХ РЕПЕРОВ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ С ДЕФЕКТАМИ И ЗАХВАЧЕННЫХ ХОЛОДНЫХ АТОМОВ

Введение

Физические явления, лежащие в основе взаимодействия оптического излучения с охлажденными атомами, в последнее время активно изучаются как теоретически, так и экспериментально. Интерес к этим исследованиям [1 – 3] связан в первую очередь с тем, что реализация их результатов может позволить создать современные, компактные, измерительные устройства и вычислительные элементы и системы. Эти устройства (оптические частотные реперы) нужны для стабилизации частоты ТЛПН. Оптический частотный репер представляет собой среду, атомы или молекулы которой имеют узкие линии поглощения, частота которых совпадает со стабилизируемой частотой излучения лазера.

Первые оптические стандарты частоты использовали частотные реперы на основе газообразных сред, помещенных в оптические ячейки при определенной температуре. С расширением номенклатуры лазеров, частота которых должна быть стабилизирована, расширялся и список оптических реперов. В этот список стали включаться охлажденные практически до абсолютного нуля атомы и ионы [4], удержание которых осуществляется в вакуумных камерах с использованием охлаждающих лазерных лучей. Существующие устройства не относятся к компактным и малогабаритным частотным реперам, поэтому дальнейшее развитие условий использования охлажденных атомов направлено на создание компактных конструкций, в которых длительное время могут находиться в определенных условиях поглощающие атомы или ионы. Использование одиночных атомов требует специфических методов, например атомы должны быть охлаждены до температур эквивалентных нескольким микрокельвин, и устройств управления их положением в пространстве и сохранением стабильных условий взаимодействия оптического поля с поглощающими атомами или ионами.

В работе обсуждаются условия помещения одиночных атомов или ионов в дефекты фотонных кристаллов, в которых с помощью локальных полей атомы удерживаются от взаимодействия с поверхностью твердых тел. В дефектах фотонного кристалла должно быть возбуждено оптическое поле, с частотой, соответствующей зоне непропускания; именно это поле удерживает атомы в центре дефекта. Чтобы целенаправленно перемещать отдельные атомы на расстояния в сотни нанометров и помещать их в заданных местах, необходимо использовать лазерный пинцет, излучение которого должно быть согласовано с излучением в дефекте.

Также следует обратить внимание на то, что в последние годы в литературе активно обсуждается возможность создания квантовых компьютеров на основе взаимодействия оптического излучения с одиночными, охлажденными атомами. Предполагается, что размещение атомов в дефектах фотонных кристаллов позволит сформировать материальную структуру, которая будет использована в качестве запоминающей системы, благодаря чему будет организована память квантового компьютера.

Цель настоящей работы – установление условий использования фотонных кристаллов в качестве матрицы для размещения и удержания поглощающих атомов, которые, в свою очередь, должны использоваться в качестве оптического репера для стабилизации частоты лазерного излучения.

Свойства фотонных кристаллов

Теория фотонных кристаллов позволяет решать задачи по управлению распространением оптического излучения в средах с периодической структурой, период которой соизмерим

с длиной волны излучения. Фотонные кристаллы в зависимости от их внутренней структуры и частот взаимодействующего оптического излучения можно рассматривать как структуры, свойства которых соответствуют либо оптическим проводникам, либо изоляторам или оптическим полупроводникам и сверхпроводникам. Главная особенность такого разделения заключается в существовании разрешенных и запрещенных зон и их размеров. Фотонные «проводники» обладают широкими разрешенными зонами. Это прозрачные тела, в которых свет распространяется на большие расстояния, практически не поглощаясь. Другой класс фотонных кристаллов – фотонные изоляторы – обладают широкими запрещенными зонами (например, широкодиапазонные многослойные диэлектрические зеркала), в которых свет не затухает, превращаясь в тепло, а создаются условия для непропускания света. Фотонные полупроводники обладают более узкими по сравнению с изоляторами запрещенными зонами.

Другая возможность, реализуемая в фотонных кристаллах [5], заключается в том, что, создавая дефекты (или резонансные полости) в фотонном кристалле, можно захватывать фотоны в ловушки запрещенной зоны, формируя таким образом локализованные поля. Эти локализованные поля могут взаимодействовать с атомами, ионами и молекулами, если их поместить в дефекты. В дефектах локализованные поля формируются с очень большими градиентами, которые обеспечивают удержание атомов в области максимальной интенсивности локализованного поля. В работе [6] обсуждался вопрос включения в дефекты фотонных кристаллов квантовых точек, как элементов активных сред.

С захваченными молекулами и атомами в дефектах фотонных кристаллов может взаимодействовать другое, информационное, поле (рис. 1). Фотонный кристалл с дефектами, в которых размещены атомы с поглощающими переходами, можно рассматривать в качестве частотного репера, который необходим для стабилизации частоты информационного поля. Конструкция такого частотного репера имеет значительные преимущества по отношению к уже известным и используемым конструкциям. Во-первых, для стабилизации используются охлажденные атомы, что означает минимальный доплеровский сдвиг частоты поглощения в поперечном направлении. Во-вторых, конструкция репера на фотонных кристаллах имеет явное преимущество в габаритах, а также в отсутствии большого числа удерживающих лазеров, что значительно упрощает и конструкцию, и условия эксплуатации.

Кроме того, когда атомы находятся в захваченном состоянии, они могут быть использованы в конструкции квантового компьютера или любого другого квантового устройства, при селективном взаимодействии с излучением.

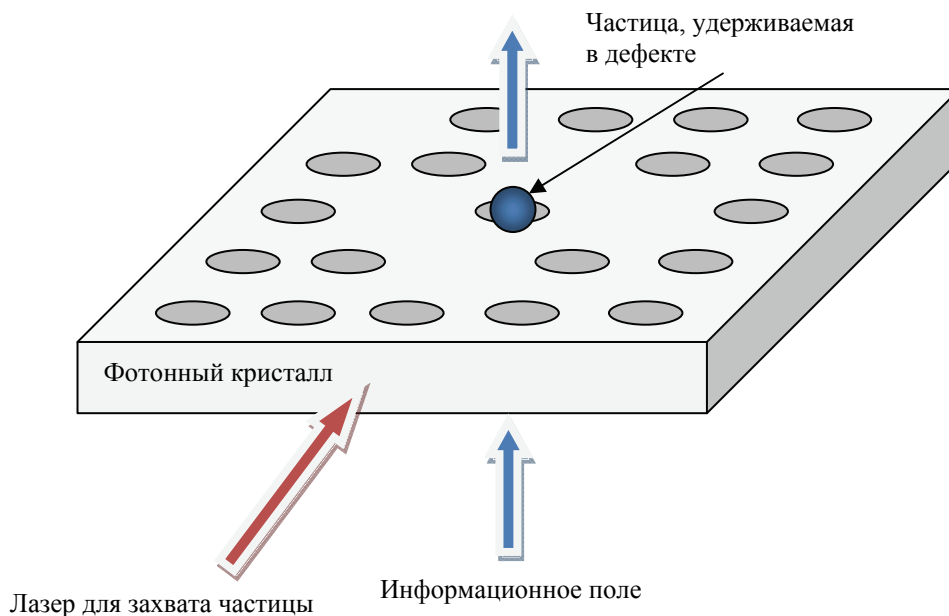


Рис. 1. Схема взаимодействия частицы в дефекте фотонного кристалла с двумя полями

В работе [7] была исследована возможность использования фотонных кристаллов с дефектом для лазерного управления охлажденными атомами, обсуждалось использование пучка атомов цезия, которые охлаждены в поперечном направлении. Рассматривалась возможность локализации атомов в дефекте фотонного кристалла, было рассчитано поле в дефекте в условиях проникновения лазерного излучения. Если в фотонном кристалле сформирован линейный дефект, то пучок атомов ориентируется вдоль дефекта и будет распространяться вдоль него. Поскольку интенсивность света в центре дефекта более чем на два порядка превышает периферийную интенсивность, то градиентная сила будет удерживать атомы в центре дефекта.

Расчет поля в дефекте фотонного кристалла был проведен в [7] с учетом граничных и начальных условий. Расчет осуществлялся благодаря численной процедуре, основанной на прямом интегрировании уравнений Максвелла методом конечных разностей (техника FDTD). Этот метод позволяет рассчитать распределение поля в двумерных фотонных кристаллах.

Необходимые параметры фотонного кристалла с дефектом могут быть достигнуты при использовании кремниевых технологий для изготовления фотонных структур. Интенсивность света в центре дефекта более чем в два порядка превышает интенсивность на границе дефекта, что обеспечивает очень высокий градиент поля в поперечном направлении, который оказывает влияние на удержание атомов в центре дефекта. Ориентируясь на распределение поля, формируемое в дефекте фотонного кристалла, чтобы поместить в дефект одиночный атом, необходимо воспользоваться полем лазерного пинцета. Если в фокусе лазерного пинцета захвачен атом, то переместить его в дефект можно только благодаря большей интенсивности поля в дефекте.

Анализ пространственного распределения электромагнитного поля показывает, что оно локализовано в центре дефекта. Диаметр пучка в дефекте оказывается порядка $\lambda/10$, что в пять раз меньше дифракционного предела для светового пучка, сфокусированного в воздухе. Интенсивность света в центре дефекта на два порядка выше интенсивности на краях канала [8]. Так как такой пучок имеет диаметр существенно меньший, чем длина волны, то это поле может быть использовано для локального удержания атомов или молекул.

Взаимодействие поля лазерного пинцета и поля в фотонном кристалле

В 1987 году А. Эшкин [9] продемонстрировал возможность удержания частицы в заданной области пространства при помощи сфокусированного пучка лазерного излучения. Благодаря большому поперечному градиенту интенсивности в сфокусированных лазерных пучках частица, находящаяся на оси этого пучка, захватывается и остается продолжительное время, при перемещении лазерного пучка в пространстве частица перемещается вместе с последним. На основе этих результатов были разработаны конструкции лазерных пинцетов.

В работе [10] была рассмотрена процедура загрузки атомов в дефекты периодической структуры, в качестве которой использовалось пустотелое фотонно-кристаллическое волокно. Рассматривался процесс подведения атомов к периодической структуре и процесс загрузки охлажденных атомов в эту структуру. В этой работе не рассматривалось использование лазерного пинцета для введения атомов в дефекты фотонно-кристаллического волокна, а осуществлялась локализация атомного облака в области над торцом фотонно-кристаллического волокна. Эта задача была решена экспериментально несколькими методами, воздействием магнитного поля и воздействием исключительно оптических полей. Однако фокусировка магнитными полями требует наличия пульсирующих токов в проводниках вблизи торца волокна, что приводит к вибрациям и усложняет загрузку атомов в волокно. Фокусировка с помощью исключительно оптических полей позволила избежать вибрации и поэтому оказалась более приемлемой для практического применения. Во время подведения атомного облака к торцу волокна формируется поле дипольной ловушки внутри периодической структуры. Вследствие того, что поле, выходящее из периодической структуры, расширяется, оно

образует градиент (рис. 2), что позволяет затягивать атомы из атомного облака, находящегося в непосредственной близости от торца волокна.

В работе [11] рассматривалось распределение среднего квадрата электрического поля на выходе из дефекта фотонно-запрещенной зоны (рис. 2). В условиях, представленных в [11], поле оказывается локализованным в поперечном направлении на пространственном масштабе менее длины волны излучения, спадая экспоненциально вдоль оси X.

Исходя из представленного графика (рис. 2) можно сделать вывод, что для загрузки атомов в дефекты фотонного кристалла необходимо использовать условия передачи атома, захваченного слабой ловушкой оптического пинцета, более сильному полю внутри дефекта фотонного кристалла. Локализованное поле E внутри дефекта фотонного кристалла имеет размер объема $V \sim \lambda^3$ (λ длина волны излучения), поэтому характерная величина амплитуды электрического поля $E \sim 1/\sqrt{V}$. Используя в качестве дефекта область фотонного кристалла с удаленным элементом, можно обеспечивать высокий градиент поля, благодаря чему и удерживаются атомы.

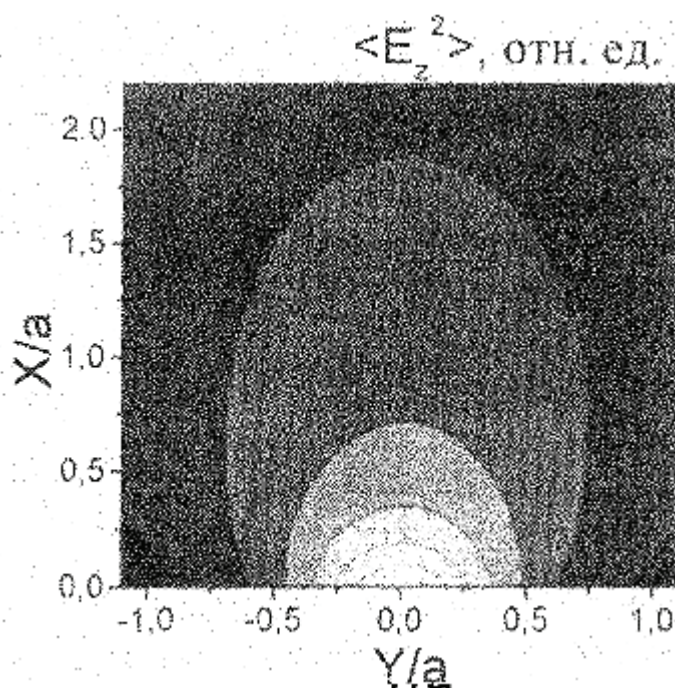


Рис. 2. Двумерная карта распределения среднего квадрата электрического поля на выходе ФЗЗ структуры с дефектом решетки, $a/\lambda=0,454$

При этом поле, сформированное в дефекте, будет втягивать, благодаря градиенту, атом в область своего максимума, если атом разместить в периферийной области поля в дефекте.

В работе [2] подробно рассмотрены вопросы взаимодействия захваченных атомов с полем в дефекте фотонного кристалла. Особое внимание уделено взаимодействию в наномасштабах между атомом и стенками дефекта. В таких условиях особую роль вблизи стенок играет Ван дер Ваальс – Казимир-Полдер взаимодействие, которое обеспечивает притяжение стенками атомов. Поэтому, чтобы преодолеть притягивающие силы Ван дер Ваальс – Казимир-Полдер необходимо сформировать поле с большой неоднородностью интенсивности и большими градиентами. Однако в [2] подробно не был рассмотрен вопрос передачи атома захваченного лазерным пинцетом в область дефекта.

Поэтому в настоящей работе рассмотрен процесс взаимодействия атома с двумя полями, сформированными в пинцете и дефекте. Ориентируясь на приведенные выше графики распределения интенсивности излучения на выходе из дефекта, можно оценить условия перехвата атома полем дефекта. Если на атом, захваченный пинцетом, оказывает воздействие сила, которая описывается выражением $F = (\alpha/2)\text{grad}E^2$, то в поперечном, по отношению к

оси пучка, направлении силы удерживают атом, а в продольном направлении атом может перемещаться, если на него будет оказывать воздействие другое неоднородное поле.

При аксиальной симметрии поля пинцета и сферической симметрии поля на выходе дефекта можно определить направление результирующей силы, которая обеспечивает втягивание атома в дефект, при этом необходимо учесть, что втягивание атома должно быть выполнено строго по оси дефекта. В этом случае влияние пристеночных сил будет сведено до минимума. В работе [12] исследован случай захвата двумя встречными пучками. Поэтому захват атома двумя полями в литературе уже был рассмотрен. Однако в нашем случае захват двумя полями приводит к результирующей силе, которая втягивает атом в дефект.

Такая схема реализации частотного репера имеет значительные преимущества по отношению к уже известным и используемым конструкциям. Благодаря использованию холодных атомов значительно уменьшается доплеровский сдвиг частоты поглощения в поперечном направлении. Поглощательный переход холодного атома используется непосредственно для стабилизации частоты другого лазера. В то же время реализация такой конструкции на дефектах фотонных кристаллов предоставляет явное преимущество в габаритных параметрах, а также в отсутствии необходимости использовать большое число лазеров, что значительно упрощает конструкцию и условия эксплуатации частотного репера.

Следуя изученным условиям захвата и удержания атома с помощью сфокусированного лазерного пучка, у которого наблюдается высокая степень пространственной неоднородности в поперечном направлении, можно предположить, что аналогичные условия могут быть сформированы для захвата и удержания атомов или ионов.

Выводы

Оптические частотные реперы являются основным элементом оптических стандартов частоты. Использование в качестве оптических реперов холодных атомов приводит к значительному уменьшению влияния доплеровского уширения, что повышает стабильность и воспроизводимость частоты стандарта.

В настоящее время развитие оптических стандартов частоты ограничено только технической возможностью реализации частотных реперов. Одной из самых перспективных технологий формирования частотного репера является лазерное охлаждение атомов и ионов. Однако осуществление такой технологии возможно только в условиях вакуума и только при наличии не менее шести лазерных лучей, частота излучения которых автономно управляется в зависимости от температуры охлаждаемых атомов (оптической патоки). В дальнейшем после охлаждения патоки до 10^{-6} К ее можно использовать в качестве частотного репера, однако применение в таком исполнении частотного репера заключается в том, что патока должна постоянно находиться в вакууме и под действием мощного лазерного излучения. Такой частотный репер представляет собой сложное и габаритное устройство.

В настоящей работе с целью формирования частотного оптического репера были установлены и исследованы условия использования фотонных кристаллов в качестве матрицы, в которой размещаются и удерживаются поглощающие атомы. Использование фотонных кристаллов для реализации оптических реперов позволяет реализовать значительное уменьшение и упрощение конструкции, что особенно важно при создании портативных стандартов частоты.

Чтобы обеспечить процесс загрузки атомов в дефекты, в работе предложено использовать лазерный пинцет.

Таким образом, первое поле, частота которого соответствует запрещенной зоне, предназначено для удержания атомов в дефекте фотонного кристалла, второе поле с частотой, совпадающей с частотой реперного перехода, захваченных атомов, является информационным. В рассматриваемом случае частота информационного поля стабилизируется по частоте оптического репера. Третье поле, лазерного пинцета, используется для захвата атомов и перемещения их в дефект.

Список литературы: 1. *Beugnon, J.* Two-dimensional transport and transfer of a single atomic qubit in optical tweezers / C. Tuchendler, H. Marion, Y. Miroshnychenko and other // Nature Physics. – 2007. – V. 3. – P. 696-699. 2. *Kuznetsova, E.* Single atom trapping and control inside a nanosize photonic crystal cavity / E. Kuznetsova, J. Feist, M. D. Lukin and other. – Режим доступа : www/ URL: http://arxiv.org/abs/1301.4559 – 19.01.2013. 3. *Browaeys, A.* Recent progress on the manipulation of single atoms in optical tweezers for quantum computing / A. Browaeys, J. Beugnon, C. Tuchendler and other. – Режим доступа : www/ URL: http://arxiv.org/abs/0708.3295 – 24.08.2007. 4. *Бакланов, Е.В.* Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры / Бакланов, Е.В. Покасов, П.В. // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33, №5. – С. 383-400. 5. *Zheltikov, A. M.* Controlled light localization and nonlinear-optical interactions of ultrashort laser pulses in micro- and nanostructured fibers with a tunable photonic band gap / A. M. Zheltikov, A. B. Fedotov, M. V. Alfimov, A. A. Ivanov, M. S. Syrchin, A. P. Tarasevitch, D. von der Linde // Laser Physics. – 2001. – V. 11, N. 10. – P. 1058-1068. 6. *Блохин, С.А.* Оптические исследования двумерного фотонного кристалла с квантовыми точками InAs/InGaAs в качестве активной области / Блохин, С.А. Усов, О.А. Нащекин, А.В. и т.д. // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – С. 833-838. 7. *Тарасишин, А. В.* Лазерное управление охлажденными атомами в фотонных кристаллах [Текст] / А. В. Тарасишин, А. М. Желтиков, С. А. Магницкий, В. А. Шуваев // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 9. – С. 843-846. 8. *Балыкин, В. И.* Охлаждение атомов давлением лазерного излучения / В. И. Балыкин, В. С. Летохов, В. Г. Миногин // УФН. – 1985. – Т. 147, № 1. – С. 117-156. 9. *Ashkin, A.* Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure / A. Ashkin // Phys. Rev. Lett. – 1970. – N. 24. – P. 156-159. 10. *Bajcsy, M.* Laser-cooled atoms inside a hollow-core photonic-crystal fiber / M. Bajcsy, S. Hofferberth, T. Peyronel et al. // Phys. Rev. A. – 2011. – V. 83. – p. 9. 11. *Желтиков, А. М.* Локализация и каналирование света в дефектных модах двумерных фотонных кристаллов / А. М. Желтиков, С. А. Магницкий, А. В. Тарасишин // Письма в ЖЭТФ. – 1999. – Т. 70. – С. 323-328. 12. *Tauro, S.* Dynamic axial stabilization of counter-propagating beam-traps with feedback control / S. Tauro, A. Vanas, D. Palima, J. Gluskstad // Optics express – 2010. – Vol.18, N. 17. – P. 18217-18223.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 15.02.2014