

5-й Международный
радиоэлектронный форум
«Прикладная радиоэлектроника
Состояние и перспективы
развития»

МРФ-2014

Том 4

КОНФЕРЕНЦИЯ

**«ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БАЗА
НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»**

Украина, г. Харьков, 2014

СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Мачехин Ю.П., Хоролец Л.С.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина 14, каф. физических основ электронной техники,
тел (057)70-21-484

E-mail: horolec_lilija@mail.ru

In this work were investigated ways of creating a compact optical frequency standard based on Nd: YAG / I₂ laser which are chip lasers. One of the first practical applications of photonic crystals have been the so-called microchannel plate (MCP). Another interesting use of photonic crystals have become quantum photonic crystals, the structure of which introduced quantum dots. The most commonly used photonic crystals, that are artificial opals, which was introduced in the refractory insulators. It also assessed the ability to capture and download a single atom in a nano-sized cavity was also analyzed the development of methods for the use of photonic crystals with lattice defects in the final storage cooled iodine molecules and is a schematic diagram of a laser with photonic crystals.

Введение

Фотонные кристаллы активно изучаются не только для выявления особенностей распространения электромагнитного излучения в периодических структурах [1], но и для установления условий эффективного взаимодействия электромагнитного излучения с атомами и молекулами, введенными в дефекты фотонных кристаллов [2]. В работе [3] была сформулирована задача взаимодействия оптического излучения с охлажденными молекулами йода, помещенными в дефекты фотонного кристалла и удерживаемые в дефектах с помощью другого поля, частота которого совпадает с полосой частот запрещенной зоны.

В работе [4] был проведен расчет дисперсионных кривых электромагнитного излучения в фотонном кристалле с различными диаметрами глобул, заполненного парами йода. Введение в поры фотонных кристаллов различных веществ также вызывает изменения скорости электромагнитных волн. Анализ, проведенный в [4] позволяет утверждать, что дисперсионные кривые для фотонных кристаллов, заполненных молекулами и для фотонных кристаллов, заполненных парами йода, при различных размерах глобул практически не отличаются друг от друга.

Таким образом, если рассматривать фотонный кристалл с дефектом, в котором находятся молекулы йода, то поле рассчитывается, так же как и в пустом кристалле. При этом сформированное в дефекте кристалла, неоднородное поле, частота которого совпадает с частотами запрещенной зоны, позволяет за счет градиентной силы Лоренца удерживать охлажденные молекулы йода в центральной части дефекта. В таком состоянии молекулы йода можно использовать в качестве частотного репера, по которому будет осуществляться стабилизация частоты другого внешнего электромагнитного поля.

Целью настоящей работы было изучение условий применения фотонных кристаллов заполненными, охлажденными молекулами йода в качестве частотного репера в системе стабилизации частоты Nd:YAG/I₂ лазеров.

1. Физические условия формирования частотных реперов

В настоящее время применяемых в настоящее время оптических стандартов частоты (ОСЧ) лежат частотные реперы, свойства которых обуславливают условия стабилизации частоты лазеров. В таблице 1 приведены две группы частотных реперов, отличающихся условиями хранения и применения поглощающих веществ и газов в соответствии с последними рекомендациями СИРМ 2001 года.

К первой, основной, группе частотных реперов относятся вещества и газы (метан (C¹²H₄), пары рубидия, пары йода), помещаемые в оптические ячейки. В эти ячейки, после

тщательной вакуумной обработке, напускают поглощающий газ или помещают вещество (например, кристалл йода), над которым формируется в ячейке насыщающий газ. Температурные условия газа или паров в ячейке определяются минимальной температурой штенгеля ячейки и температурой стенок ячейки. Поддержание требуемой температуры осуществляется благодаря применению системы термостабилизации штенгеля ячейки при той температуре, которая рекомендована международными документами по определению метра [5]. Габариты этих ячеек в каждом конкретном случае могут иметь размеры от нескольких сантиметров до полуметра.

Таблица 1

| Атомы/молекулы/ионы | Длина волны | Частота (ГГц) | Неопределенность | |
|---|-------------|----------------------|------------------|-----------------------|
| | | | ±Гц | Дробная часть |
| CH ₄ | 3392.2 | 88.373 149 028 553 | 200 | 2×10 ⁻¹¹ |
| Rb-2 photon | 778.11 | 385.285 142 374 8 | 3000 | 8×10 ⁻¹² |
| I ₂ a ₁₆ or f R(127)11-5 | 632.99 | 473.612 353 604 | 10 kHz | 2,1×10 ⁻¹¹ |
| I ₂ a ₁₀ R(56) 32-0 | 532.24 | 563.260 223 513 | 2,6 kHz | 8,9×10 ⁻¹² |
| Sr ⁺ | 674.03 | 444.779 904 409 540 | 200 | 4×10 ⁻¹³ |
| Ca | 657.45 | 455.986 240 494 150 | 8 | 1,8×10 ⁻¹⁴ |
| Yb ⁺ | 466.88 | 642.121 496 772 6 | 1300 | 1,6×10 ⁻¹² |
| Hg ⁺ | 281.57 | 1064.721 609 899 140 | 10 | 3×10 ⁻¹⁵ |
| In ⁺ | 236.54 | 1267.402 452 899 920 | 230 | 3,6×10 ⁻¹³ |
| H 1S-2S | 243.13 | 1233.030 706 593 55 | 46 | 2×10 ⁻¹³ |
| H 2S-8S | 389.01 | 770. 649 561 581 1 | 5900 | 8×10 ⁻¹² |

В основе второй группы (таб. 1) частотных реперов, достаточно многочисленной применяются охлажденные, с помощью лазерного излучения до температур в несколько мкК, поглощающие атомы или ионы. Поглощающие атомы находятся в состоянии «оптической палочки» в вакуумной камере. Основное преимущество таких частотных реперов в высокой стабильности и воспроизводимости частот используемых переходов и их практическая независимость от термодинамических характеристик паров веществ. Вторая часть табл.1, которая начинается с ионов стронция, поясняет интерес к лазерам со стабилизацией по охлажденным атомам и ионам, поскольку стабильность частоты на 1-3 порядка превышает стабильность частоты у используемых ОСЧ.

2. Особенности использования йодных частотных реперов в составе осч на базе nd:yag/i₂ лазеров

Наиболее перспективным, с точки зрения применения в компактных и малогабаритных ОСЧ представляется Nd:YAG/I₂ лазер. С начала 90-х годов начали проводиться исследования свойств йодных реперов, которые могут влиять, как на стабильность, так и на воспроизводимость оптической частоты. Были исследованы сверхтонкие компоненты линий поглощения молекул йода в условиях паров йода в вакуумной ячейке. Практически во всех конструкциях твердотельных ОСЧ управление частотой излучения и ее модуляция, осуществлялась с помощью внешних акустооптических и электрооптических устройств. Поэтому конструкции этих ОСЧ, в которых используются электрооптические устройства имеют максимальные габариты, не позволяющие использовать их в составе измерительных средств.

Современные Nd:YAG лазеры с полупроводниковой накачкой, конструктивно представляют собой чип лазеры, использование которых позволило бы существенно уменьшить габариты ОСЧ на их основе. Тем не менее, создать на их основе малогабаритный ОСЧ до настоящего времени практически не удалось, поскольку

габариты используемых йодных ячеек изменяются от десяти сантиметров до полуметра. Поэтому для разработки малогабаритных ОСЧ, необходимо использовать уменьшенных размеров йодные ячейки. Одним из путей уменьшения размеров йодной ячейки является использование фотонного кристалла, насыщенного йодом.

3. Захват молекул йода в дефектах фк

В настоящей работе развиваются методы использования фотонных кристаллов с дефектом решетки для хранения в последнем охлажденных молекул йода. Удержанию молекул в дефекте способствует высокая степень локализации поля в нем. Существующие численные процедуры (FDTD) позволили проводить расчеты поля в дефектах и тем самым сконструировать потенциал в дефекте, который будет иметь изолированный экстремум внутри дефекта. Характерный масштаб градиента поля в дефекте определяется поперечным размером дефекта, т.е. размером сравнимым с расстоянием между элементами фотонной структуры.

Чтобы использовать фотонный кристалл, насыщенный парами йода, в качестве частотного репера необходимо, чтобы было выполнено два условия. Благодаря первому условию, электромагнитное поле используется для удержания молекулы йода в центре дефекта фотонного кристалла. Второе, оптическое поле, для которого фотонный кристалл должен быть прозрачным, с минимальными потерями на длине волны 532 нм, должно взаимодействовать с поглощательным переходом молекул йода на частоте одной из сверхтонких линий поглощения.

В отличие от работы [6] в настоящей работе рассматривался случай, когда рабочий переход молекул отстоит на большом частотном расстоянии от частот запрещенной зоны. Поэтому в предлагаемом в настоящей работе случае одно поле удерживает молекулы в центральной области дефекта. Другое поле взаимодействует с молекулами йода на частоте сверхтонкой линии поглощающего перехода.

Исследования лазерного управления охлажденными атомами в фотонных кристаллах проводятся уже второй десяток лет. Наиболее близкой к задаче, поставленной в настоящей работе, оказалась задача, рассмотренная в [6].

Главная особенность полученных в [6] результатов, заключается в том, что в полости учтены обе силы, воздействующие на атом, это сила Казимир-Полдера и градиентная сила моды электромагнитного поля в дефекте.

Учитывая особенности и свойства данной модели фотонного кристалла может быть предложена конкретная конструкция с определенными параметрами (рис. 3).

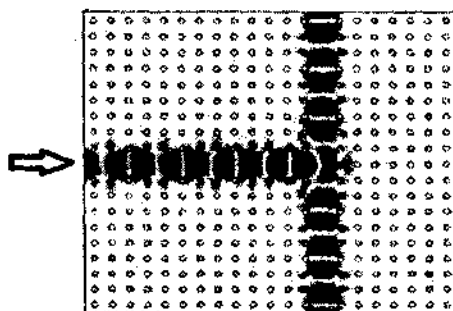


Рисунок 1 -Стационарное распределение электрического поля

На рисунке 1 показано распределение поля в T-образном волноводе, где красный и синий представляют положительные и отрицательные поля, в то время как белый представляет нулевое поле. Стрелкой указано направление, в котором запускают излучение и молекулы йода. Такие волноводы представляют собой 3-D фотонный

кристалл, изготовленный из квадратной решетки диэлектрических стержней, которые имеют щели в ТМ моде.

Такое распределение поля можно объяснить тем, что точечный дефект формируется с помощью удаления одной строки из идеального кристалла. Такой дефект создает локализованное состояние, обладающее полной симметрией. Поэтому локализованное состояние является парным для всех входных и выходных волноводов, по существу такой же прочности, в результате чего передача пика составляет 44 %.

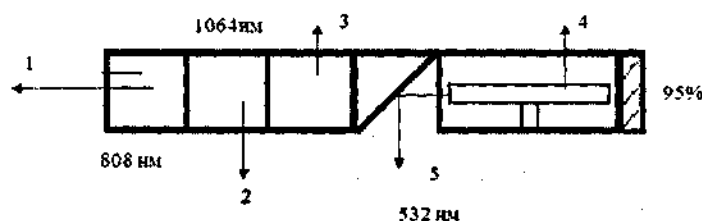


Рисунок 2 – Схема лазера с фотонным кристаллом

На рисунке 2 показано схему лазера с Т-образным фотонным кристаллом, где 1 – полупроводниковый лазер, 2 - Nd:YAG лазер, 3 – нелинейный элемент КДП, 4 - фотонный кристалл, 5 – указано выходное излучение.

После нелинейного элемента установлена призма под 45° , а затем фотонный кристалл. Из него было удалено одна строка в продольном и одна строка в поперечном направлении. Таким образом, был получен фотонный кристалл с двумя каналами. После фотонного кристалла располагается зеркало с коэффициентом пропускания 95%, а 5% излучения отражается. Излучение проходило обратно по фотонному кристаллу, отражалось от границ и было зарегистрировано. Электронные компоненты не обсуждались.

Выводы

В данной работе были рассмотрены свойства фотонных кристаллов, в том числе фотонные кристаллы с дефектом, в молекулах которых находится йод. Было установлено что они могут быть использованы для удержания охлажденных атомов внутри центра дефекта с помощью неоднородного поля. Также были исследованы условия применения фотонных кристаллов заполненных охлажденными молекулами йода в качестве частотного репера в системе стабилизации частоты Nd:YAG/I₂ лазеров.

Список литературы:

1. Закиров А.В., Левченко В.Д. Эффективный алгоритм для трехмерного моделирования распространения электромагнитных волн в фотонных кристаллах // Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук. – 2008.
2. Горелик В. С., Вошинский Е. А., Злобина Л. И. Структура и свойства фотонных кристаллов, заполненных квантовыми точками диэлектриков и металлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Естественные науки”. – 2012. – С.112-124.
3. Мачехин Ю.П., Меркулов Е.Г. Оптический частотный репер на основе атомов в дефектах в фотонных кристаллов // Радиотехника, Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2014. - № 178. - С. 181-186.
4. Gorbatshevich A.A., Gorelik V.S., Friman A.V. Optical properties of photonic crystals filled with iodine vapor // Kratkie Soobshcheniya po Fizike. – 2013. - V. 40, N. 2. – P.28–35.
5. Quinn T.J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiation of the other optical frequency standards // Metrologia. – 2003. - V.40. - P. 103-133/
6. Kuznetsova E., Feist J. Single atom trapping and control inside a nanosize photonic crystal cavity // Laser Physics. – 2013. - V.8, №3, - P 288-290.