



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012119687/07, 12.05.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.05.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.05.2012

(45) Опубликовано: 20.08.2013 Бюл. № 23

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 8049162 B2, 01.11.2011. RU 95907 U1, 10.07.2010. Балькин В.И. Ультрахолодные атомы и атомная оптика. - Успехи физических наук, 2011, т.181, №8, с.875-878, рис.2. US 6303928 B1, 16.10.2001.

Адрес для переписки:

191124, Санкт-Петербург, пл. Растрелли, 2,
ОАО "РИРВ", генеральному конструктору
Б.В. Шебшаевичу

(72) Автор(ы):

**Вершовский Антон Константинович (RU),
Жолнеров Вадим Степанович (RU),
Рождественский Юрий Владимирович (RU),
Харчев Олег Прокопьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Открытое акционерное общество
"Российский институт радионавигации и
времени" (RU)****(54) ЗЕЕМАНОВСКИЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ АТОМНОГО ПУЧКА**

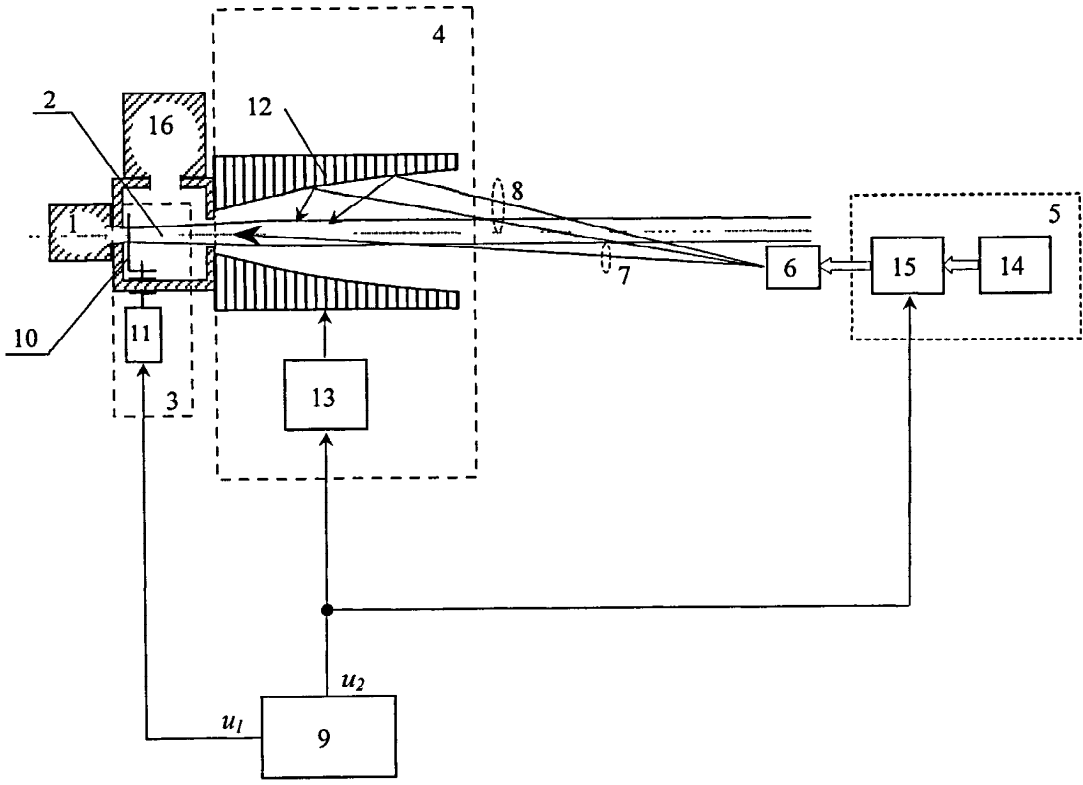
(57) Реферат:

Изобретение относится к области квантовой электроники и может быть использовано в атомно-лучевых стандартах частоты на пучках атомов рубидия или цезия. Технический результат заключается в создании зеемановского замедлителя атомного пучка с уменьшенными габаритами и энергопотреблением. Устройство содержит расположенные вдоль оси распространения атомного пучка источник атомного пучка и блок формирования неоднородного магнитного поля, а также последовательно включенные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор. Между выходом источника атомного пучка и входом блока формирования неоднородного магнитного поля размещен прерыватель атомного пучка, управляющий вход которого

соединен с первым выходом блока управления, второй выход которого соединен с управляющим входом блока формирования неоднородного магнитного поля и с управляющим входом источника встречного оптического излучения. Блок управления выполнен таким образом, что длительности управляющих импульсов $T_{имп1}$ и $T_{имп2}$, формируемых синхронно и с одинаковым периодом на первом и втором его выходах, подчиняются условию $T_{имп1} < T_{имп2}$. Источник встречного оптического излучения содержит последовательно соединенные стабилизированный лазерный источник и прерыватель луча, при этом управляющий вход прерывателя луча образует управляющий вход источника встречного оптического излучения. 2 з.п. ф-лы, 3 ил.

RU 2 490 836 C1

RU 2 490 836 C1



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H05H 3/02 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2012119687/07, 12.05.2012**

(24) Effective date for property rights:
12.05.2012

Priority:

(22) Date of filing: **12.05.2012**

(45) Date of publication: **20.08.2013 Bull. 23**

Mail address:

**191124, Sankt-Peterburg, pl. Rastrelli, 2, OAO
"RIRV", general'nomu konstrukturu B.V.
Shebshaevichu**

(72) Inventor(s):

**Vershovskij Anton Konstantinovich (RU),
Zholnerov Vadim Stepanovich (RU),
Rozhdestvenskij Jurij Vladimirovich (RU),
Kharchev Oleg Prokop'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo "Rossijskij
institut radionavigatsii i vremeni" (RU)**

(54) **ZEEMAN ATOMIC BEAM RETARDER**

(57) Abstract:

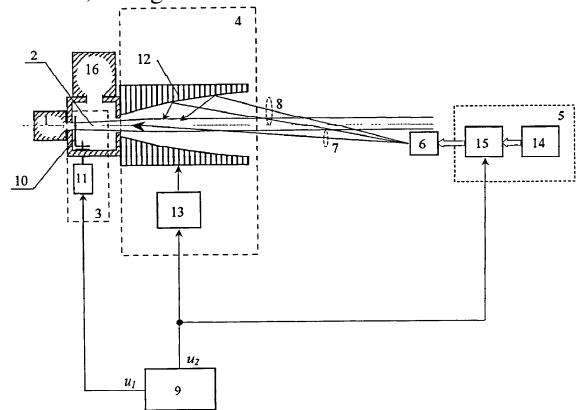
FIELD: physics.

SUBSTANCE: device has, along the axis of propagation of an atomic beam, an atomic beam source and a unit for generating an inhomogeneous magnetic field, as well as series-connected backward optical radiation source and acoustooptical modulator. Between the output of the atomic beam source and the input of the unit for generating an inhomogeneous magnetic field there is an atomic beam shutter, the control input of which is connected to the first output of the control unit, the second output of which is connected to the control input the unit for generating an inhomogeneous magnetic field and the control input of the backward optical radiation source. The control unit is designed such that the duration of control pulses T_{imp1} and T_{imp2} , generated synchronously and with the same period at the first and second outputs of said control unit, satisfy the condition $T_{imp1} < T_{imp2}$.

The backward optical radiation source has series-connected stabilised laser source and beam shutter, wherein the control input of the beam shutter forms the control input of the backward optical radiation source.

EFFECT: design of a Zeeman atomic beam retarder with smaller size and power consumption.

3 cl, 3 dwg



Фиг. 1

RU 2 490 836 C1

RU 2 490 836 C1

Изобретение относится к области квантовой электроники и может быть использовано в атомно-лучевых стандартах частоты на пучках атомов, например, рубидия или цезия.

Метрологические характеристики таких стандартов частоты, в частности воспроизводимость частоты, нестабильность частоты и пр., определяются шириной линии микроволнового перехода в атомах пучка рабочего вещества. Для улучшения метрологических характеристик необходимо уменьшать ширину линии атомного перехода, что возможно, например, за счет замедления скорости движения атомов пучка рабочего вещества (см. работу [1] - Ф. Риле / Стандарты частоты. Принципы и приложения // М.: Физматлит, 2009, с.166-174).

В настоящее время приготовление пучка замедленных («холодных») атомов рабочего вещества из теплового пучка, формируемого тепловым источником атомного пучка, реализуется следующими тремя основными методами.

В первом методе, реализованном, например, в патенте США [2] - US 6303928, H05H 3/02, 16.10.2001, происходит контролируемое истечение атомов пучка из магнитооптической ловушки, процедура загрузки которой может использовать, например, предварительное охлаждение атомов с использованием лазерного замедления. Атомы, попадающие в область совместного воздействия световых лучей и неоднородного магнитного поля, замедляются при взаимодействии с околорезонансным светом и конденсируются в области минимального значения модуля магнитного поля, т.е. в центре ловушки. Использование специальной геометрии охлаждающих лучей, например перекрытие центральной зоны одного луча, позволяет обеспечить непрерывный поток охлажденных в ловушке атомов по направлению к зоне их регистрации.

Второй метод, описанный, например, в работе [3] - Ho Seong Lee, Sang Eon Park, Taeg Yong Kwon, Sung Hoon Yang, Hyuck Cho / Toward a cesium frequency standard based on a continuous slow atomic beam: preliminary results // IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.50, 2001, pp.531-534, использует замедление атомов теплового пучка встречным воздействием лазерного излучения. При этом происходит компенсация доплеровского сдвига, изменяющегося вследствие взаимодействия с оптическим излучением, выполняемая таким образом, чтобы удерживать атомы в постоянном резонансе с лазерным излучением и таким образом обеспечить эффективность охлаждения. Указанная компенсация реализуется изменением частоты лазерного излучения по мере пролета атомов через область взаимодействия.

Третий метод, описанный, например, в работе [4] - P.N. Melentiev, P.A. Borisov and V.I. Balykin / Zeeman laser cooling of Rb-85 atoms in transverse magnetic field // Journal of experimental and theoretical physics. Vol.98, No.4, 2004, pp.667-677, использует зеэмановский замедлитель. В этом случае для компенсации доплеровского сдвига используется изменение частоты оптического атомного перехода во внешнем магнитном поле соленоида, неоднородном вдоль оси распространения атомного пучка. В результате зеэмановский сдвиг вдоль направления распространения атомного пучка компенсирует доплеровский сдвиг, изменяющийся вследствие охлаждения атомов. Для достижения непрерывного замедления в области взаимодействия атомного пучка с полем оптического излучения пространственное изменение магнитного поля должно соответствовать градиенту доплеровского сдвига.

Если v_0 - начальная скорость атомов в пучке, то расстояние до полной остановки атомов равно:

$$z_0 = v_0^2 / 2a,$$

где a - ускорение атомов в пучке (имеющее отрицательное значение).

В процессе замедления скорость атома $v(z)$ в точке z вдоль направления распространения пучка равняется:

$$5 \quad v(z) = \sqrt{2a(z_0 - z)}.$$

Соответственно, доплеровский сдвиг $f_D(z)$ в точке z равен:

$$f_D(z) = -v(z)/\lambda = -\sqrt{2a(z_0 - z)}/\lambda^2,$$

где λ - длина волны излучения замедляющего лазера.

10 При этом градиент доплеровского сдвига равен:

$$\frac{df_D(z)}{dz} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{2(z_0 - z)}}.$$

15 Пространственное изменение сдвига частоты $\omega_B(z)$ за счет зеемановского расщепления атомных уровней в магнитном поле $B(z)$ определяется как

$$\omega_B(z) = (m_i g_i - m_k g_k) \mu_B B(z) / \hbar,$$

где: m_i, m_k - магнитные квантовые числа,

g_i, g_k - факторы Ланде для i, k магнитных подуровней;

20 \hbar - приведенная постоянная Планка.

В технике зеемановского замедлителя градиент доплеровского сдвига за счет охлаждения атомов должен быть равен градиенту зеемановского расщепления за счет пространственного изменения магнитного поля:

$$25 \quad \frac{df_D(z)}{dz} = - \frac{d\omega_B(z)}{dz}.$$

Из этого условия следует пространственная зависимость магнитного поля для компенсации доплеровского сдвига:

$$30 \quad B(z) = B(z_0) [\lambda (m_i g_i - m_k g_k)]^{-1} \frac{\hbar}{\mu_B} \sqrt{\frac{a}{2} (z_0 - z)},$$

где $B(z_0)$ - значение магнитного поля в точке z_0 .

35 При этом начальное значение магнитного поля должно выбираться из условия настройки частоты лазерного излучения вблизи максимума теплового распределения (или за максимумом, если ставится цель охлаждения большего числа атомов).

Максимальное ускорение, которое может получить атом при взаимодействии с полем лазерного излучения, равно:

$$a = \hbar k \gamma / M,$$

40 где $k = 2\pi/\lambda$,

2γ - естественная ширина линии атомного перехода,

M - масса атома.

Соответственно, минимальное расстояние L_{\min} , на котором тепловой пучок может 45 быть остановлен за время t_{\min} , равен:

$$t_{\min} = \frac{v_0}{a} = \frac{M \bar{v}}{\hbar k \gamma}, \text{ есть } L_{\min} = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{M \bar{v}^2}{2 \hbar k \gamma}.$$

50 Для теплового пучка атомов рубидия, замедляемых на переходе с длиной волны $\lambda = 780$ нм и временем жизни 27 нс, минимальная длина замедления составляет $L_{\min} = 75$ см, время охлаждения $t_c = 3,7$ мс.

Примером реализации зеемановского замедлителя атомного пучка является устройство, представленное в патенте [5] - US 8049162, H01S 1/00, H01S 3/00, H05H 3/02,

01.11.2011, Fig.5, выбранное в качестве прототипа.

Зеемановский замедлитель атомного пучка, выбранный в качестве прототипа, содержит расположенные вдоль оси распространения атомного пучка источник атомного пучка и блок формирования неоднородного магнитного поля, а также последовательно включенные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор, формирующий на своем выходе прямой и смещенные лучи.

Блок формирования неоднородного магнитного поля состоит из соленоида, предназначенного для формирования неоднородного магнитного поля, и источника его питания, работающего в непрерывном режиме. Источник встречного оптического излучения содержит стабилизированный лазерный источник. Акустооптический модулятор представляет собой, например, сборку из двух акустооптических модуляторов, отклоняющих лучи в направлениях, перпендикулярных друг другу и оси системы. Сечения результирующих траекторий смещенных лучей в плоскости, перпендикулярной оси системы, описываются фигурами Лиссажу. Прямой луч представляет собой нулевой порядок дифракции, не отклоняемый акустооптическим модулятором.

Источник атомного пучка и соленоид блока формирования неоднородного магнитного поля располагаются в вакуумированном объеме, необходимая степень давления в котором поддерживается вакуумным насосом. В случае, когда акустооптический модулятор вынесен за пределы вакуумированного объема, ввод формируемых акустооптическим модулятором прямого и смещенных лучей осуществляется через соответствующее окно. Источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор смещены относительно общей оси распространения атомного пучка, что исключает осаждение атомов пучка на окне, через которое осуществляется ввод в вакуумированный объем лучей, поступающих с выхода акустооптического модулятора.

Устройство-прототип работает следующим образом. Расходящийся пучок атомов, созданный тепловым источником атомного пучка, взаимодействует с полем оптического излучения, формируемым источником встречного оптического излучения. При этом оптическое излучение, с которым взаимодействуют атомы, состоит из основного лазерного луча, направленного навстречу продольной оси пучка, и смещенных лазерных лучей, формируемых акустооптическим модулятором и имеющих поперечные составляющие. Конечная конфигурация поля оптического излучения формируется за счет отражения от внутренней поверхности соленоида, представляющей собой зеркальный конус. В результате, в каждой пространственной точке пучка атом взаимодействует с двухкомпонентным оптическим полем, продольная компонента которого уменьшает проекцию скорости атомов на ось системы, а поперечная компонента осуществляет коллимацию атомов в поперечном направлении.

Для достижения резонансного взаимодействия между атомами в пучке и оптическим излучением, обеспечивающим уменьшение продольных скоростей атомов, используется метод изменения частоты атомного перехода посредством приложения магнитного поля, неоднородного вдоль оси пучка, т.е. метод зеемановского охлаждения. Конструктивно это осуществляется за счет использования соленоида с переменным числом витков, создающего неоднородный по оси распространения атомного пучка профиль магнитного поля. Намотка соленоида производится полым медным проводом, внутри которого под давлением подается охлаждающая жидкость.

Требования к размеру соленоида зависят от типа атомов, а также от начальной и конечной скоростей пучка. В прототипе длина соленоида варьируется в пределах от 20 до 50 см, при этом диаметр входного отверстия соленоида варьируется в диапазоне от 2 до 25 см, а диаметр выходного отверстия - в диапазоне от 2,5 до 45 см. Мощность, потребляемая соленоидом, находится в диапазоне от 1 до 30 кВт, оптимальная мощность составляет 14 кВт. Избыток тепла при таком энергопотреблении отводится посредством водяного охлаждения системы.

Очевидным недостатком зеемановского замедлителя атомного пучка, выбранного в качестве прототипа, является значительный размер соленоида, и как результат - большое энергопотребление и обусловленная этим необходимость водяного охлаждения. Указанные факторы делают невозможным применение прототипа в системах с ограниченными габаритами и энергопотреблением, в частности, в бортовых системах.

Техническим результатом, на достижение которого направлено заявляемое изобретение, является создание зеемановского замедлителя атомного пучка с уменьшенными габаритами и энергопотреблением, что достигается за счет применения предложенного циклически-импульсного режима работы.

Сущность изобретения заключается в следующем. Зеемановский замедлитель атомного пучка содержит расположенные вдоль оси распространения атомного пучка источник атомного пучка и блок формирования неоднородного магнитного поля, а также последовательно включенные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор. В отличие от прототипа, между выходом источника атомного пучка и входом блока формирования неоднородного магнитного поля размещен прерыватель атомного пучка, управляющий вход которого соединен с первым выходом блока управления, второй выход которого соединен с управляющим входом блока формирования неоднородного магнитного поля и с управляющим входом источника встречного оптического излучения. При этом блок управления выполнен таким образом, что длительности управляющих импульсов $T_{имп1}$ и $T_{имп2}$, формируемых синхронно, в один и тот же момент времени и с одинаковым периодом на первом и втором его выходах, подчиняются условию $T_{имп1} < T_{имп2}$.

В частных случаях выполнения прерыватель атомного пучка содержит исполнительную часть, выполненную в виде вращающейся пластины, и управляющую часть, выполненную в виде управляемого привода магнитной передачи, управляющий вход которого образует управляющий вход прерывателя атомного пучка, а источник встречного оптического излучения содержит последовательно соединенные стабилизированный лазерный источник и прерыватель луча, при этом управляющий вход прерывателя луча образует управляющий вход источника встречного оптического излучения.

Сущность изобретения и его реализуемость поясняются иллюстративными материалами, представленными на фиг.1-3, где:

на фиг.1 представлена структурная схема предлагаемого зеемановского замедлителя атомного пучка;

на фиг.2 - временные диаграммы, поясняющие циклически-импульсный характер работы зеемановского замедлителя атомного пучка (2а - диаграмма управляющих импульсов u_1 на первом выходе блока управления, 2б - диаграмма управляющих импульсов u_2 на втором выходе блока управления, 2в - диаграмма тока $i_{сол}$ в соленоиде, 2г - диаграмма, иллюстрирующая количество атомов $N_{ам-вх}$ на входе соленоида, 2д - диаграмма, иллюстрирующая количество атомов $N_{ам-вых}$ на выходе из

соленоида, 2e - диаграмма, иллюстрирующая среднюю скорость атомов $v_{ам-ср}$ на выходе соленоида);

на фиг.3. - зависимости распределения числа атомов (n) по скоростям (v) на выходе соленоида в характерные периоды времени (3a - при $t=t_0$, 3б - при $t_1 < t < t_2$, 3в - при $t_3 > t > t_2$).

Заявляемый зеемановский замедлитель атомного пучка содержит, см. фиг.1, источник 1 атомного пучка, формирующий пучок 2 атомов, прерыватель 3 атомного пучка и блок 4 формирования неоднородного магнитного поля, расположенные вдоль оси распространения атомного пучка, а также последовательно включенные источник 5 встречного оптического излучения и акустооптический модулятор 6, формирующий на своем выходе прямой 7 и смещенные 8 лучи.

Управляющий вход прерывателя 3 атомного пучка соединен с первым выходом блока 9 управления, второй выход которого соединен с управляющим входом блока 4 формирования неоднородного магнитного поля и с управляющим входом источника 5 встречного оптического излучения. При этом блок 9 управления выполнен таким образом, что длительности управляющих импульсов $T_{имп1}$ и $T_{имп2}$, формируемых синхронно, в один и тот же момент времени и с одинаковым периодом на первом и втором его выходах, подчиняются условию $T_{имп1} < T_{имп2}$.

Прерыватель 3 атомного пучка содержит исполнительную часть, выполненную в виде вращающейся пластины 10, периодически открывающей и закрывающей путь для пучка 2 атомов, и управляющую часть, выполненную в виде управляемого привода магнитной передачи 11, управляющий вход которого образует управляющий вход прерывателя 3 атомного пучка. Управляемый привод магнитной передачи 11 обеспечивает бесконтактную передачу усилия вращения к находящейся в вакуумированном объеме вращающейся пластине 10. Вариант конструктивного выполнения прерывателя 3 атомного пучка с вращающейся пластиной и управляемым приводом магнитной передачи представлен, например, в работе [6] - С.Я. Хмель, Р.Г. Шарафутдинов / Времяпролетные измерения в молекулярном пучке, выделенном из струи конденсирующегося углекислого газа // ЖТФ, т.68, вып.8, 1998, стр.120-124.

Блок 4 формирования неоднородного магнитного поля состоит из соленоида 12, предназначенного для формирования неоднородного магнитного поля, и управляемого источника 13 питания, управляющий вход которого образует управляющий вход блока 4 формирования неоднородного магнитного поля.

Источник 5 встречного оптического излучения содержит последовательно соединенные стабилизированный лазерный источник 14 и прерыватель 15 луча, при этом управляющий вход прерывателя 15 луча образует управляющий вход источника 5 встречного оптического излучения. Прерыватель 15 луча может быть выполнен, например, в виде двухпроходного акустооптического модулятора с блокирующим излучение неподвижным экраном. Стабилизированный лазерный источник 14 может быть выполнен, например, в виде полупроводникового лазера, стабилизированного по резонансу насыщенного поглощения в атомной среде, например, аналогично лазеру, описанному в работе [7] - Р.А. Borisov, P.N. Melentiev, S.N. Rudnev, V.I. Balykin / Simple System for Active Frequency Stabilization of a Diode Laser in an External Cavity // Laser Physics, Vol.15, No.11, 2005, pp.1-5. Внешнего управления лазерным источником 14 не требуется, но схема его питания и стабилизации параметров должна включать алгоритм поиска и захвата резонанса насыщенного поглощения. В практических схемах в качестве лазерного источника 14 целесообразно использовать составной источник, состоящий из маломощного лазера с вертикальной

эмиссией (VECSEL) и полупроводникового усилителя лазерного излучения.

Источник 1 атомного пучка, исполнительная часть прерывателя 3 атомного пучка и соленоид 12 блока 4 формирования неоднородного магнитного поля располагаются в вакуумированном объеме с вакуумным насосом 16.

В рассматриваемом случае акустооптический модулятор 6 находится за пределами вакуумированного объема, при этом ввод формируемых акустооптическим модулятором 6 лучей 7 и 8 осуществляется через соответствующее окно (на фиг.1 не показано).

В рассматриваемом случае источник 5 встречного оптического излучения и акустооптический модулятор 6 смещены, как и в прототипе, относительно общей оси распространения атомного пучка 2, что исключает осаждение атомов пучка на окне, через которое осуществляется ввод в вакуумированный объем формируемых акустооптическим модулятором 6 лучей 7 и 8, что положительно сказывается на ресурсе работы. Возникающая при этом асимметрия оптической схемы, а именно, наклон луча 7 по отношению к оси распространения пучка 2 атомов, компенсируется асимметрией пространственно-временного распределения лучей 8, аналогично прототипу.

Акустооптический модулятор 6 представляет собой, например, сборку из двух акустооптических модуляторов, отклоняющих лучи 8 в направлениях, перпендикулярных друг другу и оси системы. Сечения результирующих траекторий смещенных лучей 8 в плоскости, перпендикулярной оси системы, описываются фигурами Лиссажу. Прямой луч 7 при этом представляет собой нулевой порядок дифракции, не отклоняемый акустооптическим модулятором 6.

Оптическое излучение на вход акустооптического модулятора 6 может подаваться как непосредственно с прерывателя луча 15 и стабилизированного лазерного источника 14, так и с помощью оптоволокну (на фиг.1 не показано), что позволяет размещать в этом случае источник 5 встречного оптического излучения в произвольной области пространства.

Работа заявляемого зеемановского замедлителя атомного пучка происходит следующим образом.

Источник 1 атомного пучка (например, тепловой источник пучка атомов рубидия) формирует на своем выходе пучок 2 атомов, который через прерыватель 3 атомного пучка поступает на вход блока 4 формирования неоднородного магнитного поля, а именно, на вход соленоида 12.

Блок 9 управления формирует на своих первом и втором выходах последовательности управляющих импульсов u_1 и u_2 длительностью $T_{имп1}$ и $T_{имп2}$ соответственно, где $T_{имп1} < T_{имп2}$. Управляющие импульсы формируются синхронно, в один и тот же начальный момент времени t_0 и повторяются с периодичностью T (фиг.2а, б).

Управляющие импульсы u_1 поступают на управляющий вход прерывателя 3 атомного пучка (т.е. на управляющий вход управляемого привода магнитной передачи 11, осуществляющего поворот вращающейся пластины 10), а управляющие импульсы u_2 - на управляющий вход блока 4 формирования неоднородного магнитного поля (т.е. на управляющий вход управляемого источника 13 питания соленоида 12) и управляющий вход источника 5 встречного оптического излучения (т.е. на управляющий вход прерывателя 15 луча).

Под действием управляющего импульса u_2 через обмотку соленоида 12 начинает протекать ток $i_{с.о.л}$ (фиг.2в), под действием которого во внутреннем пространстве

соленоида 12 формируется неоднородное магнитное поле.

Под действием управляющего импульса u_1 в момент времени t_0 прерыватель 3 атомного пучка начинает пропускать атомный пучок 2 в соленоид 12 (фиг.2а, 3а), где на него одновременно воздействует неоднородное магнитное поле и поле встречного оптического излучения.

В момент времени t_1 (фиг.2а) прерыватель 3 атомного пучка закрывается, что приводит к прерыванию атомного пучка 2. Благодаря этому быстрые атомы пучка первыми покидают соленоид 12 и столкновения с ними не препятствуют процессу охлаждения остальных атомов с меньшими скоростями (фиг.2г, д, е, 3б).

Оптическое излучение, с которым взаимодействуют атомы пучка 2, состоит из прямого луча 7, направленного навстречу пучку 2 атомов, и смещенных лучей 8, имеющих поперечные составляющие. Конечная конфигурация поля оптического излучения внутри соленоида 12 формируется за счет отражения от внутренней поверхности соленоида 12. В результате, в каждой пространственной точке атомы пучка 2 взаимодействует с двухкомпонентным оптическим полем, продольная компонента которого уменьшает проекцию скорости атомов на ось системы, а поперечная компонента осуществляет коллимацию атомов в поперечном направлении. При этом напряженность магнитного поля на каждом участке соленоида 12 подобрана так, чтобы компенсировать доплеровское смещение частоты атомного резонанса в пучке пролетающих атомов, и, тем самым, на всей длине соленоида 12 обеспечить максимально эффективное торможение выбранной скоростной группы атомов встречным лучом света.

В отличие от прототипа, частота лазерного излучения (встречного оптического излучения) изначально настраивается так, чтобы обеспечить эффективное торможение не всех атомов, пролетающих через соленоид 12, а наиболее медленной их части, имеющей скорость $v \leq v_0$ (фиг.3б). Эти медленные атомы, охлажденные в соленоиде 12 до скоростей (1-10) м/с, начинают покидать соленоид 12 в момент времени t_2 (фиг.2д, е). При этом быстрые атомы, характеризующиеся скоростями $v > v_0$, не затрагиваются взаимодействием со светом и к моменту времени $t_2 = t_1 + l/v_0$ (здесь и далее l - длина соленоида 12) покидают соленоид 12 (фиг.2е, 3в).

Группа атомов, имеющая скорости $v \leq v_0$, эффективно охлаждается в соленоиде 12 лучами 7 и 8 аналогично прототипу. При этом необходимая длина l соленоида 12 пропорциональна квадрату скорости атомов v_0 : $l \sim v_0^2$, а величина максимального магнитного поля при постоянной величине градиента пропорциональна длине l соленоида 12: $B_{\max} \sim l \sim v_0^2$. Таким образом, при $B_{\max} \gg B_{\min}$ рассеиваемая на соленоиде 12 мощность $P \sim l \cdot (B_{\max} + B_{\min}) / 2 \sim v_0^4$, и уже двукратное снижение скорости v_0 приводит к 4-кратному уменьшению длины соленоида 12 (что для теплового пучка атомов рубидия составляет 18,75 см), и к 16-ти кратному снижению рассеиваемой на нем мощности.

Процесс охлаждения атомов заканчивается к моменту времени t_3 , когда медленные атомы, характеризующиеся распределением скоростей, представленным на фиг.3в, покидают соленоид 12 (фиг.2д, е). В этот момент выключается источник 5 встречного оптического излучения и отключается питание от соленоида 12 (фиг.2б). После этого, по прошествии времени $t_4 - t_3 = T_{\text{инд}} < 1$ мс, определяемого индуктивностью соленоида 12 и внутренним сопротивлением управляемого источника 13 питания, медленные атомы оказываются в условиях, свободных от каких-либо возмущающих воздействий.

С момента времени t_4 и до окончания периода циклического переключения

длительностью T замедленные атомы пучка пролетают вдоль оси распространения ту часть пространства, которая предназначена для «регистрации» параметров атомов пучка.

Рассмотренный циклически-импульсный режим работы обеспечивает следующее.

Во-первых, он позволяет предотвратить разогрев медленных атомов ($v \leq v_0$) столкновениями с быстрыми атомами ($v > v_0$).

Во-вторых, он позволяет разделить по времени быстрые атомы, прошедшие соленоид 12 без торможения, и медленные атомы, охлаждаемые в соленоиде 12 до скоростей (1-10) м/с, и в дальнейшем использовать только медленные атомы.

В-третьих, он позволяет в несколько раз снизить значение рассеиваемой на соленоиде 12 мощности.

В-четвертых, он позволяет исключить возмущающее влияние резонансного оптического излучения и магнитного поля соленоида на последующий процесс измерения резонансной частоты замедленных атомов.

Таким образом, в заявляемом зеемановском замедлителе атомного пучка, в отличие от прототипа, охлаждению подвергаются не все атомы, а только те, скорость которых не превышает v_0 (фиг.3б, в). При выборе $v_0 < v_{cp}$, где v_{cp} - средняя, наиболее вероятная, скорость движения атомов теплового пучка на входе соленоида 12, длина соленоида 12 может быть уменьшена в $(v_0/v_{cp})^2$ раз по сравнению с прототипом. Это приводит к уменьшению количества охлаждаемых атомов, например, при $v_0 = v_{cp}/2$ количество охлаждаемых атомов составит 2,65% от общего числа атомов в пучке, а при $v_0 = v_{cp}/4$ количество охлаждаемых атомов составит 0,18% от общего числа атомов в пучке. Указанная потеря числа атомов в метрологическом смысле компенсируется, во-первых, возможностью их глубокого охлаждения до скоростей (1-10) м/с, и соответствующим уменьшением ширины линии атомного резонанса, и во-вторых, высокой степенью изолированности атомного перехода от внешних воздействий.

Рассмотренное показывает, что заявляемое изобретение осуществимо и обеспечивает достижение технического результата, заключающегося в создании зеемановского замедлителя атомного пучка с уменьшенными габаритами и энергопотреблением.

Так, в практически значимом случае, соответствующем рассмотренному выше двукратному уменьшению скорости ($v_0 = v_{cp}/2$), длина соленоида 12 уменьшается в четыре раза и составляет для пучка атомов рубидия всего 18,75 см.

При этом снижение мощности, рассеиваемой на соленоиде 12, только за счет уменьшения длины соленоида 12 достигает шестнадцати раз, а с учетом циклически-импульсного режима работы - еще большую величину. Так, цикл охлаждения атомов (интервал времени с t_0 до t_3) при конечной скорости атомов 1 м/с и указанной длине соленоида 12 (18,75 см) не превышает 0,2 с. При величине периода цикла, равном одной секунде ($T=1$ с), средняя мощность, рассеиваемая на соленоиде 12, дополнительно уменьшается еще в шесть раз. Таким образом, потребляемая соленоидом 12 мощность составляет всего (100-200) Вт, что существенно ниже, чем в прототипе.

Источники информации

1. Ф. Риле / Стандарты частоты. Принципы и приложения // М.: Физматлит, 2009, с.166-174.

2. US 6303928, H05H 3/02, опубл. 16.10.2001.

3. Ho Seong Lee, Sang Eon Park, Taeg Yong Kwon, Sung Hoon Yang, Hyuck Cho / Toward a cesium frequency standard based on a continuous slow atomic beam: preliminary results // IEEE

Trans. Instrum. Meas., Vol.50, 2001, pp.531-534.

4. P.N. Melentiev, P.A. Borisov and V.I. Balykin / Zeeman laser cooling of Rb-85 atoms in transverse magnetic field // Journal of experimental and theoretical physics, Vol.98, No.4, 2004, pp.667-677.

5. US 8049162, H01S 1/00, H01S 3/00, H05H 3/02, опубл. 01.11.2011, Fig.5.

6. С.Я. Хмель, Р.Г. Шарафутдинов / Времяпролетные измерения в молекулярном пучке, выделенном из струи конденсирующегося углекислого газа // ЖТФ, т.68, вып.8, 1998, стр.120-124.

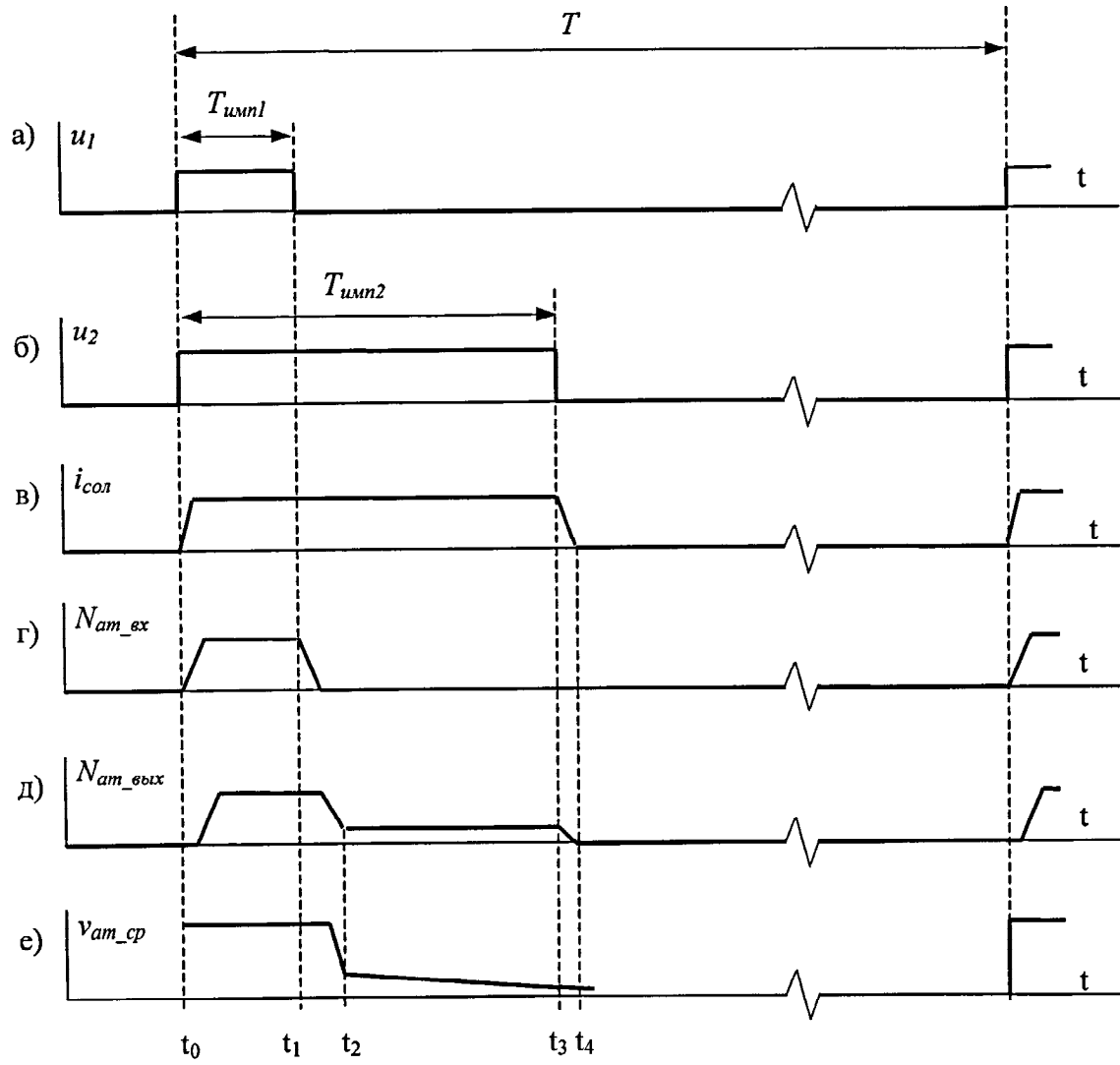
7. P.A. Borisov, P.N. Melentiev, S.N. Rudnev, V.I. Balykin / Simple System for Active Frequency Stabilization of a Diode Laser in an External Cavity // Laser Physics, Vol.15, No.11, 2005, pp.1-5.

Формула изобретения

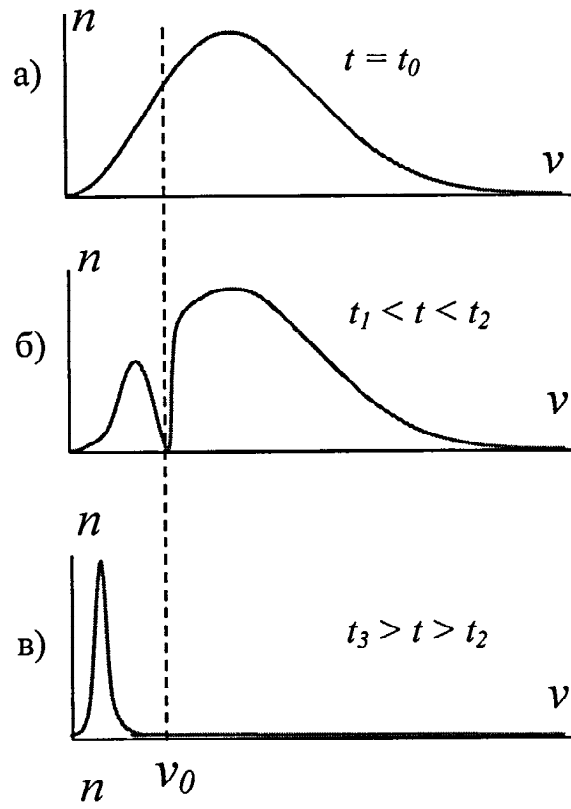
1. Зеемановский замедлитель атомного пучка, содержащий расположенные вдоль оси распространения атомного пучка источник атомного пучка и блок формирования неоднородного магнитного поля, а также последовательно включенные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор, отличающийся тем, что между выходом источника атомного пучка и входом блока формирования неоднородного магнитного поля размещен прерыватель атомного пучка, управляющий вход которого соединен с первым выходом блока управления, второй выход которого соединен с управляющим входом блока формирования неоднородного магнитного поля и с управляющим входом источника встречного оптического излучения, при этом блок управления выполнен таким образом, что длительности управляющих импульсов $T_{имп1}$ и $T_{имп2}$, формируемых синхронно, в один и тот же момент времени и с одинаковым периодом на первом и втором его выходах подчиняются условию $T_{имп1} < T_{имп2}$.

2. Зеемановский замедлитель атомного пучка по п.1, отличающийся тем, что прерыватель атомного пучка содержит исполнительную часть, выполненную в виде вращающейся пластины, и управляющую часть, выполненную в виде управляемого привода магнитной передачи, управляющий вход которого образует управляющий вход прерывателя атомного пучка.

3. Зеемановский замедлитель атомного пучка по п.1, отличающийся тем, что источник встречного оптического излучения содержит последовательно соединенные стабилизированный лазерный источник и прерыватель луча, при этом управляющий вход прерывателя луча образует управляющий вход источника встречного оптического излучения.



Фиг. 2



Фиг. 3