



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015113843/07, 14.04.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.04.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.04.2015

(45) Опубликовано: 10.09.2016 Бюл. № 25

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 8049162B2, 01.11.2011. RU
2490836C1, 20.08.2013. RU 124846U1, 10.02.2013.
US 8237105B1, 07.08.2012.

Адрес для переписки:

192012, Санкт-Петербург, пр. Обуховской
Обороны, 120, лит. ЕЦ, АО "РИРВ",
генеральному директору Шебшаевичу Б.В.

(72) Автор(ы):

Агейчик Евгения Александровна (RU),
Бекентаев Ринат Ахметжанович (RU),
Вершовский Антон Константинович (RU),
Жолнеров Вадим Степанович (RU),
Рождественский Юрий Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

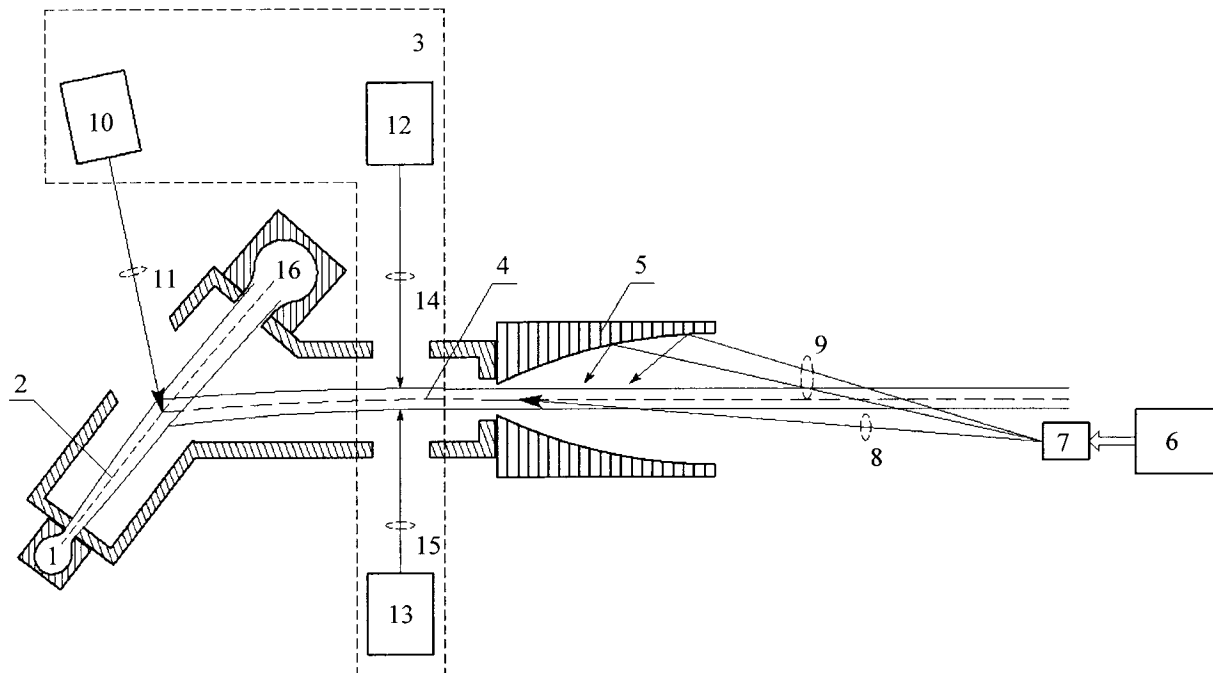
Открытое акционерное общество
"Российский институт радионавигации и
времени" (RU)

(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. Зеемановский замедлитель атомного пучка содержит источник атомного пучка, соленоид, предназначенный для формирования неоднородного магнитного поля, воздействующего на проходящий через него атомный пучок, а также оптически связанные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор, предназначенные для формирования прямого и смещенных лучей, воздействующих на проходящий через соленоид атомный пучок. В устройство введен оптический сепаратор атомного пучка, предназначенный для отклонения низкоскоростной части атомного пучка, созданного источником атомного пучка, и формирования из нее дополнительного проходящего через соленоид отклоненного

коллимированного атомного пучка. Оптический сепаратор атомного пучка содержит источник отклоняющего оптического излучения, предназначенный для отклонения низкоскоростной части атомного пучка, созданного источником атомного пучка, а также два источника поперечного оптического излучения, предназначенных для коллимирования этой отклоненной части атомного пучка. Технический результат - снижение энергопотребления и габаритов устройства. Результат достигается за счет пространственного разделения исходного атомного пучка на высокоскоростную и низкоскоростную части с помощью оптической сепарации атомов и последующим приложением встречного оптического воздействия к выделенной низкоскоростной части. 1 з.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2015113843/07, 14.04.2015

(24) Effective date for property rights:
14.04.2015

Priority:

(22) Date of filing: 14.04.2015

(45) Date of publication: 10.09.2016 Bull. № 25

Mail address:

192012, Sankt-Peterburg, pr. Obukhovskoj Oborony,
120, lit. ETS, AO "RIRV", generalnomu direktoru
SHebshaevichu B.V.

(72) Inventor(s):

Agejchik Evgeniya Aleksandrovna (RU),
Bekentaev Rinat Akhmetzhanovich (RU),
Vershovskij Anton Konstantinovich (RU),
ZHolnerov Vadim Stepanovich (RU),
Rozhdestvenskij YUrij Vladimirovich (RU)

(73) Proprietor(s):

Otkrytoe aktsionernoe obshshestvo "Rossijskij
institut radionavigatsii i vremeni" (RU)

(54) **ZEEMAN ATOMIC BEAM RETARDER**

(57) Abstract:

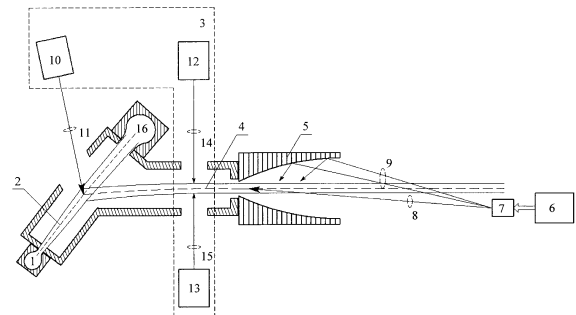
FIELD: electronics.

SUBSTANCE: invention relates to quantum electronics and can be used in atomic beam frequency standard on beams of rubidium or caesium atoms. Zeeman atomic beam retarder contains an atomic beam, solenoid intended for generating an inhomogeneous magnetic field, acting on an atomic beam passing through it, as well as optically-connected source of back optical radiation and acousto-optical modulator designed to generate direct and displaced beams, acting on atomic beam passing through solenoid. Apparatus includes an optical separator of atomic beam, intended for deflection of low-speed part of atomic beam, generated by atomic beam source, and formation therefrom of an additional deflected collimated atomic beam passing through solenoid. Optical separator of atomic beam has a deflecting optical radiation source, intended for deflection of low-speed part of atomic beam, generated by atomic beam source, as well as two sources of cross

optical radiation, intended for collimating said deflected part of atomic beam. Result is achieved due to spatial separation of initial atomic beam into high-speed and low-speed parts with help of optical separation of atoms and subsequent application of backward optical effect to selected low-speed part.

EFFECT: technical result is reduction of power consumption and overall dimensions.

1 cl, 2 dwg



Фиг. 1

RU 2 596 817 C1

RU 2 596 817 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, в частности, 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, в частности, 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, в частности, 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:

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

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.

При этом градиент доплеровского сдвига равен:

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

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;

\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:

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

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

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

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

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:

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

где: $k = 2\pi/\lambda$,

2γ - естественная ширина линии атомного перехода,

M - масса атома.

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

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

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 (оси пучка) источник атомного пучка и соленоид, предназначенный для формирования
5 неоднородного магнитного поля, воздействующего на проходящий через него атомный пучок, а также оптически связанные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор, предназначенные для формирования прямого и смещенных лучей, воздействующих на проходящий через соленоид атомный пучок.

Источник встречного оптического излучения представляет собой стабилизированный
10 лазерный источник. Акустооптический модулятор представляет собой, например, сборку из двух акустооптических модуляторов, формирующих прямой и смещенные лучи, при этом смещенные лучи имеют продольные и поперечные составляющие, а сечения результирующих траекторий смещенных лучей в плоскости, перпендикулярной оси пучка, описываются фигурами Лиссажу. Прямой луч представляет собой нулевой
15 порядок дифракции, не отклоняемый акустооптическим модулятором.

Источник атомного пучка и соленоид располагаются в вакуумированном объеме, необходимая степень давления в котором поддерживается вакуумным насосом. В случае, когда акустооптический модулятор вынесен за пределы вакуумированного
20 объема, ввод формируемых акустооптическим модулятором прямого и смещенных лучей осуществляется через соответствующее окно. Источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор смещены относительно оси 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,
25 созданный тепловым источником атомного пучка, взаимодействует во внутреннем пространстве соленоида с полем оптического излучения, формируемым источником встречного оптического излучения. При этом оптическое излучение, с которым взаимодействуют атомы, состоит из основного луча, направленного навстречу
30 продольной оси пучка, и смещенных 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 атомы пучка взаимодействуют с двухкомпонентным
35 оптическим полем, продольная компонента которого уменьшает проекцию скорости атомов на ось пучка, 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
40 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, внутрь которого под давлением подается охлаждающая жидкость.

45 Требования к размеру соленоида зависят от типа атомов, а также от начальной и конечной их скоростей в пучке. 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 40 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.

5 Очевидным недостатком зеemanовского 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.

10 Один из вариантов возможного решения задачи уменьшения габаритов и энергопотребления зеemanовского замедлителя атомного пучка представлен в патенте [6] - RU 2490836 C1, H05H 3/02, 20.08.2013, где применен циклически-импульсный режим работы, обеспечивающий разделение атомного пучка во времени на высокоскоростную и низкоскоростную части с последующим приложением встречного оптического воздействия к низкоскоростной части. Однако это решение требует периодического прерывания атомного пучка, что снижает энергетическую эффективность устройства, а применение для этих целей механического прерывателя атомного пучка снижает надежность устройства.

15 Принципиально другой подход к достижению технического результата, заключающегося в создании зеemanовского замедлителя атомного пучка с уменьшенными габаритами и энергопотреблением, применен в настоящем изобретении, в основу которого положена идея пространственного разделения исходного атомного пучка на высокоскоростную и низкоскоростную части с помощью оптической сепарации атомов и последующим приложением встречного оптического воздействия к выделенной низкоскоростной части.

25 Сущность изобретения заключается в следующем. Зеemanовский замедлитель атомного пучка содержит источник атомного пучка, соленоид, предназначенный для формирования неоднородного магнитного поля, воздействующего на проходящий через него атомный пучок, а также оптически связанные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор, предназначенные для формирования прямого и смещенных лучей, воздействующих на проходящий через соленоид атомный пучок. В отличие от прототипа введен оптический сепаратор атомного пучка, предназначенный для отклонения низкоскоростной части атомного пучка, созданного источником атомного пучка, и формирования из нее дополнительного, проходящего через соленоид отклоненного коллимированного атомного пучка.

30 В варианте выполнения, имеющем практическое значение, оптический сепаратор атомного пучка содержит источник отклоняющего оптического излучения, предназначенный для отклонения низкоскоростной части атомного пучка, созданного источником атомного пучка, а также два источника поперечного оптического излучения, предназначенных для коллимирования этой отклоненной части атомного пучка.

40 Сущность изобретения и его реализуемость поясняются иллюстративными материалами, представленными на фиг. 1 и 2, где:

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

45 на фиг. 2 - зависимости распределения числа атомов (n) по скоростям (v) в атомном пучке (2а - на выходе источника атомного пучка, 2б - на входе соленоида, 2в - на выходе из соленоида).

Заявляемый зеemanовский замедлитель атомного пучка содержит, см. фиг. 1, источник

1 атомного пучка, создающий на своем выходе атомный пучок 2, оптический сепаратор 3 атомного пучка, формирующий на своем выходе отклоненный коллимированный атомный пучок 4, соленоид 5, формирующий неоднородное магнитное поле, воздействующее на проходящий через него атомный пучок 4, а также оптически связанные источник 6 встречного оптического излучения и акустооптический модулятор 7, формирующий прямой 8 и смещенные 9 лучи, воздействующие на проходящий через соленоид 5 атомный пучок 4.

В рассматриваемом примере оптический сепаратор 3 атомного пучка содержит источник 10 отклоняющего оптического излучения, формирующий отклоняющий луч 11, а также первый 12 и второй 13 источники поперечного оптического излучения, формирующие, соответственно, коллимирующие лучи 14 и 15. Источник 10 отклоняющего оптического излучения предназначен для отклонения низкоскоростной части атомного пучка 2, созданного источником 1 атомного пучка, а источники 12 и 13 поперечного оптического излучения, располагающиеся по обеим сторонам этого отклоненного атомного пучка, предназначены для его поперечного коллимирования и формирования проходящего через соленоид 5 отклоненного коллимированного атомного пучка 4.

В рассматриваемом примере источник 6 встречного оптического излучения, источник 10 отклоняющего оптического излучения, а также источники 12 и 13 поперечного оптического излучения представляют собой отдельные стабилизированные лазерные источники, выполненные, например, в виде полупроводниковых лазеров, стабилизированных по резонансу насыщенного поглощения в атомной среде (аналогично лазеру, описанному в работе [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.). Такие лазерные источники не требуют внешнего управления, схема их питания и стабилизации параметров включает алгоритм поиска и захвата резонанса насыщенного поглощения. При практической реализации в качестве лазерного источника целесообразно использовать составной источник, состоящий из маломощного лазера с вертикальной эмиссией (VECSEL) и полупроводникового усилителя лазерного излучения.

Источник 1 атомного пучка и соленоид 5 располагаются в вакуумированном объеме, необходимая степень давления в котором поддерживается вакуумным насосом 16.

В рассматриваемом примере акустооптический модулятор 7, источник 6 встречного оптического излучения, источник 10 отклоняющего оптического излучения и источники 12 и 13 поперечного оптического излучения располагаются за пределами вакуумированного объема, при этом ввод формируемых ими лучей 8, 9, 11, 14 и 15 осуществляется через соответствующие окна (на фиг. 1 не показаны).

Конфигурация вакуумированного объема, взаимное положение источника 1 атомного пучка и источника 10 отклоняющего оптического излучения, а также взаимное положение осей распространения атомного пучка 2 и отклоняющего луча 11 таковы, что обеспечивается прохождение отклоненного атомного пучка в соленоид 5.

В рассматриваемом примере акустооптический модулятор 7 смещен, как и в прототипе, относительно оси соленоида 5, вдоль которой осуществляется распространение атомного пучка 4. Это исключает осаждение атомов пучка на поверхности окна, через которое осуществляется ввод в вакуумированный объем формируемых акустооптическим модулятором 7 лучей 8 и 9, что положительно сказывается на ресурсе работы. Возникающая при этом асимметрия оптической схемы, а именно, наклон луча 8 по отношению к оси распространения атомного пучка 4 в

соленоиде 5, компенсируется асимметрией пространственно-временного распределения лучей 9, аналогично прототипу.

Акустооптический модулятор 7 представляет собой, например, сборку из двух акустооптических модуляторов, формирующих прямой 8 и смещенные 9 лучи, при этом смещенные лучи 9 имеют продольные и поперечные составляющие, а сечения результирующих траекторий смещенных лучей 9 в плоскости, перпендикулярной оси распространения атомного пучка 4, описываются фигурами Лиссажу. Прямой луч 8 представляет собой нулевой порядок дифракции, не отклоняемый акустооптическим модулятором 7.

Оптическое излучение на вход акустооптического модулятора 7 может подаваться как непосредственно с источника 6 встречного оптического излучения, так и с помощью оптоволокну (на фиг.1 не показано), что позволяет размещать в этом случае источник 6 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) создает на своем выходе исходный атомный пучок 2, который содержит в себе высокоскоростную часть атомов ($v > v_0$) и низкоскоростную часть ($v \leq v_0$) (см. фиг. 2а).

На атомный пучок 2 воздействует отклоняющий луч 11, формируемый источником 10 отклоняющего оптического излучения. Отклоняющий луч 11 направлен под углом навстречу атомному пучку 2 и имеет продольную и поперечную составляющую по отношению к оси распространения атомного пучка 2. За счет указанной продольной составляющей осуществляется уменьшение проекции скорости атомов на ось распространения атомов атомного пучка 2, а за счет поперечной составляющей обеспечивается отклонение этих атомов от исходного направления. При этом в отличие от существующих схем с отклонением атомного пучка, одна из которых, например, приведена в работе [8] - H. Wang, J.C.Camparo, and G. Iyanu / Towards Demonstration Of A Mot-Based Continuous Cold Cs-Beam Atomic Clock // 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting (The Aerospace Corporation), 2007, pp. 223-232, частота отклоняющего оптического излучения (отклоняющего луча 11) изначально настраивается так, чтобы обеспечить взаимодействие (отклонение и предварительное охлаждение) не со всеми атомами, испускаемыми источником 1 атомного пучка, а с наиболее медленной их частью, имеющей скорость $v \leq v_0$. Благодаря этому происходит селекция атомов по скорости и пространственное отделение низкоскоростной части атомов, предназначенных для дальнейшего охлаждения, от быстрых атомов пучка 2, столкновения с которыми препятствовали бы процессу охлаждения.

Сформированный таким образом отклоненный пучок низкоскоростных атомов направляется в сторону соленоида 5, подвергаясь на своем пути воздействию оптических лучей 14 и 15, сформированных источниками 12 и 13 поперечного оптического излучения. Под действием этих лучей происходит поперечное коллимирование и дополнительное охлаждение отклоненного пучка низкоскоростных атомов. Полученный в результате коллимированный атомный пучок 4 низкоскоростных атомов (фиг. 2б) поступает на вход соленоида 5.

Проходя через соленоид 5 атомный пучок 4 вступает во взаимодействие со встречным оптическим излучением.

Встречное оптическое излучение, с которым взаимодействуют атомы атомного пучка 4, состоит из прямого луча 8, направленного навстречу атомному пучку 4, и смещенных лучей 9, имеющих поперечные составляющие. Конечная конфигурация поля оптического

излучения внутри соленоида 5 формируется за счет отражения оптических лучей от внутренней поверхности соленоида 5. В результате, на всем пути прохождения атомного пучка 4 через соленоид 5 он взаимодействует с двухкомпонентным оптическим полем, продольная компонента которого уменьшает проекцию скорости атомов на ось соленоида 5, а поперечная компонента осуществляет коллимацию атомов в поперечном направлении. При этом напряженность магнитного поля на каждом участке соленоида 5 подобрана так, чтобы компенсировать доплеровское смещение частоты атомного резонанса в пучке пролетающих атомов, и, тем самым, на всей длине соленоида 5 обеспечить максимально эффективное торможение выбранной скоростной группы атомов встречным оптическим излучением. Как и в случае отклоняющего оптического излучения (луч 11) частота встречного оптического излучения (лучи 8 и 9) настраивается так, чтобы обеспечить эффективное торможение атомов, имеющих скорость $v \leq v_0$. Заторможенные таким образом атомы образуют выходной атомный пучок (фиг. 2в), поступающий с выхода соленоида 5 для последующего использования.

Рассмотренные процессы торможения атомов атомного пучка в соленоиде 5 аналогичны прототипу. При этом необходимая длина l соленоида 5 пропорциональна квадрату скорости атомов v_0 : $l \sim v_0^2$, а величина максимального магнитного поля при постоянной величине градиента пропорциональна длине l соленоида 5: $B_{max} \sim l \sim v_0^2$.

Таким образом, при $B_{max} \gg B_{min}$ рассеиваемая на соленоиде 5 мощность

$P \sim l \cdot (B_{max} + B_{min}) / 2 \sim v_0^4$, и уже трехкратное снижение скорости v_0 приводит к 9-ти кратному уменьшению длины соленоида 5 (что для теплового пучка атомов рубидия составляет 8,34 см), и к 81-ому кратному снижению рассеиваемой на нем мощности.

По сравнению с прототипом, реализованный в заявляемом зеэмановском замедлителе атомного пучка метод пространственного разделения исходного атомного пучка на высокоскоростную и низкоскоростную части с помощью оптической сепарации атомов и последующим приложением встречного оптического воздействия к выделенной низкоскоростной части 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 в пространстве «быстрые» и «медленные» атомы и в дальнейшем использовать для охлаждения в соленоиде 5 только «медленные» атомы.

В-третьих, он позволяет существенно снизить значение рассеиваемой на соленоиде 5 мощности.

При этом заявляемый зеэмановский замедлитель атомного пучка, по сравнению с устройством, представленным в патенте [6], позволяет вести процесс охлаждения непрерывно, что повышает энергетическую эффективность устройства, а отсутствие в нем механического прерывателя атомного пучка повышает надежность устройства.

Таким образом, в заявляемом зеэмановском замедлителе атомного пучка, в отличие от прототипа, охлаждению подвергаются не все атомы, а только те, скорость которых не превышает v_0 . При выборе $v_0 < v_{cp}$, где v_{cp} - средняя, наиболее вероятная, скорость движения атомов атомного пучка 2, длина соленоида 5 может быть уменьшена в $(v_0/v_{cp})^2$ раз по сравнению с прототипом. Это приводит к уменьшению количества охлаждаемых атомов, например, при $v_0 = v_{cp}/3$ количество охлаждаемых атомов составит 1,24% 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. Однако указанная потеря числа атомов в

метрологическом смысле компенсируется возможностью их глубокого охлаждения до скоростей (1-10) м/с и соответствующим уменьшением ширины линии атомного резонанса.

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

Так, в практически значимом случае, соответствующем рассмотренному выше трехкратному уменьшению скорости ($v_0=v_{cp}/3$), длина соленоида 5 уменьшается в девять раз и составляет для пучка атомов рубидия всего 8,34 см, а мощность, рассеиваемая на соленоиде 5, за счет уменьшения длины соленоида 5 снижается в восемьдесят один раз и составляет всего 173 Вт, что существенно ниже, чем в прототипе.

Источники информации

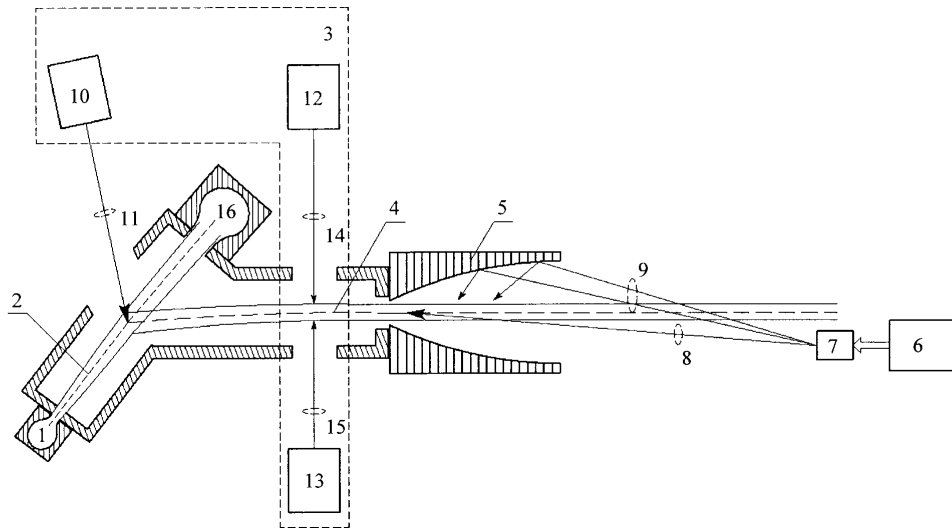
1. Ф. Риле / Стандарты частоты. Принципы и приложения // М., Физматлит, 2009, с. 166-174.
2. US 6303928, H05H 3/02, опубл. 16.10.2001.
3. Ho Seong Lee, Sang Eon Park, Taeg Yong Kwon, Sung Hoon Yang, Hyuck Cho / Toward a cesium frequency standard based on a continuous slow atomic beam: preliminary results // 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.
6. RU 2490836 C1, H05H 3/02, опубл. 20.08.2013.
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.
8. H. Wang, J.C. Camparo, and G. Iyanu / Towards Demonstration Of A Mot-Based Continuous Cold Cs-Beam Atomic Clock // 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting (The Aerospace Corporation), 2007, pp. 223-232.

Формула изобретения

1. Зеемановский замедлитель атомного пучка, содержащий источник атомного пучка, соленоид, предназначенный для формирования неоднородного магнитного поля, воздействующего на проходящий через него атомный пучок, а также оптически связанные источник встречного оптического излучения и акустооптический модулятор, предназначенные для формирования прямого и смещенных лучей, воздействующих на проходящий через соленоид атомный пучок, отличающийся тем, что введен оптический сепаратор атомного пучка, предназначенный для отклонения низкоскоростной части атомного пучка, созданного источником атомного пучка, и формирования из нее дополнительного проходящего через соленоид отклоненного коллимированного атомного пучка.

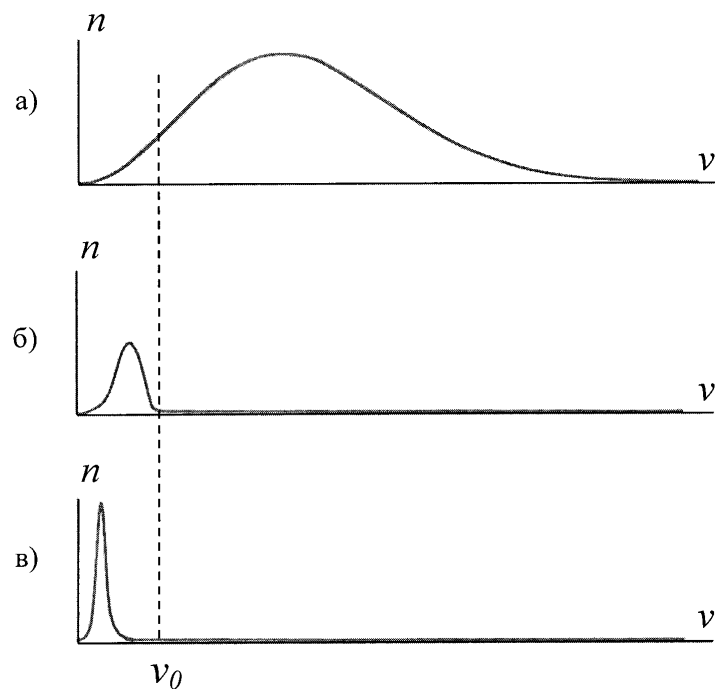
2. Зеемановский замедлитель атомного пучка по п. 1, отличающийся тем, что оптический сепаратор атомного пучка содержит источник отклоняющего оптического излучения, предназначенный для отклонения низкоскоростной части атомного пучка, созданного источником атомного пучка, а также два источника поперечного оптического излучения, предназначенных для коллимирования этой отклоненной части атомного пучка.

Зеемановский замедлитель атомного пучка



Фиг. 1

Зеемановский замедлитель атомного пучка



Фиг. 2