

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-139-144

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АТОМНЫХ ЧАСОВ И СИСТЕМ ИХ СИНХРОНИЗАЦИИ

И.И. Рябцев, зав. лаб. Института физики полупроводников СО РАН, д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, ryabtsev@isp.nsc.ru

С.П. Юркевичус, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц., jurkst@yandex.ru

А.Е. Гриценко, зам. нач. отдела ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, gritsae@mail.ru

Рецензент: В.А. Жмудь

Изложены научно-технические проблемы и перспективы создания атомных часов и систем их синхронизации. Проведен краткий анализ состояния научных исследований в этой области за рубежом.

Ключевые слова: атомные часы, квантовые операции, технологии квантовой обработки информации.

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF CREATION OF ATOMIC CLOCK AND SYSTEMS OF THEIR SYNCHRONIZATION

I.I. Ryabtsev, Head of Lab., Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Ph. D., Corresponding Member of RAS, ryabtsev@isp.nsc.ru

S.P. Yurkevichyus, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Associate Professor, jurkst@yandex.ru

A.E. Gritsenko, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, gritsae@mail.ru

Scientific and technological problems and prospects for the creation of atomic clocks and systems for their synchronization are stated. A brief analysis of the state of scientific research in this area abroad is carried out.

Keywords: atomic clocks, quantum operations, technologies of quantum information processing.

Введение

В настоящее время основными потребителями атомных стандартов частоты являются системы глобальной навигации, синхронизации и передачи данных. По мере развития квантовых технологий они могут также начать применяться, например, для синхронизации в квантовых линиях связи – как наземных оптоволоконных, так и спутниковых. Создание и совершенствование ультрастабильных лазеров, атомных решеток и ионных ловушек важно также для создания и увеличения точности прототипов квантового компьютера с кубитами на нейтральных атомах в оптических решетках и ионах в радиочастотных ловушках.

Анализ состояния научных исследований и степени их реализации

Атомные стандарты частоты основаны на привязке частоты оптического или СВЧ-генератора к частоте какого-либо достаточно узкого перехода между долгоживущими энергетическими состояниями атомов или ионов. В отличие от простых кварцевых, сапфировых

и других твердотельных эталонов частоты атомные эталоны не подвержены долговременному дрейфу частоты вследствие старения материала. Первичным эталоном частоты является СВЧ-переход между двумя компонентами сверхтонкой структуры основного состояния 6S атомов цезия-133 (^{137}Cs). Вторичным эталоном является аналогичный СВЧ-переход в атомах рубидия (Rb), а также СВЧ-переход между компонентами тонкой структуры первого возбужденного состояния атомов водорода (водородный мазер).

Ранее в первичном эталоне использовался тепловой пучок атомов цезия, пролетающий через две пространственно разнесенные области взаимодействия с СВЧ-полем. В результате двукратного взаимодействия в вероятности СВЧ-перехода возникают узкие резонансы Рамси, по которым осуществляется стабилизация частоты СВЧ-генератора. В схеме с тепловым пучком предельная точность была ограничена довольно коротким временем пролета атомов через СВЧ-резонаторы. Поэтому в современном Cs-стандарте применяется уже не тепловой пучок, а атомный фонтан лазерно-охлажденных атомов, имеющих гораздо меньшую скорость движения и большое время взаимодействия с СВЧ-полем [1]. Предельная абсолютная погрешность такого стандарта составляет около 10^{-15} за время измерения порядка 10^3 секунд.

Дальнейшее увеличение точности атомных СВЧ-стандартов частоты не представляется возможным из-за чрезмерно большого времени измерения. Уменьшение этого времени возможно за счет перехода от СВЧ-резонансов в атомах к оптическим резонансам. Оптическая частота таких резонансов составляет 10^{14} – 10^{15} Гц, поэтому точности измерения на уровне 10^{-15} можно достичь за время ~ 1 с. При времени измерения $\sim 10^3$ с точность может составить уже 10^{-17} – 10^{-18} . Для ее достижения необходимо работать только с лазерно-охлажденными атомами для исключения влияния доплеровского и времяпролетного уширений. Поэтому во всем мире в настоящее время ведутся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования по созданию оптических стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов.

Для атомов применяются оптические решетки, в которых захват атомов осуществляется в максимумы или минимумы интенсивности стоячей световой волны благодаря градиентной дипольной силе [2]. Число атомов в решетке составляет несколько тысяч, что обеспечивает быстрое измерение сигнала и высокое отношение «сигнал/шум». Для ионов применяются радиочастотные ловушки, способные захватывать и длительно удерживать одиночные ионы [3]. Сигналы от одиночных ионов гораздо слабее, чем от атомов в оптических решетках, однако одиночные ионы имеют преимущество отсутствия столкновительного уширения. Поэтому исследования ведутся как с ансамблями атомов в решетках, так и с одиночными ионами. В обоих случаях в качестве реперного оптического резонанса выбираются сильнозапрещенные интеркомбинационные переходы с шириной линии менее 1 Гц. Такие переходы имеются, например, в атомах магния (Mg), стронция (Sr), иттербия (Yb), ртути (Hg) и в ионах ртути (Hg^+), алюминия (Al^+), бериллия (Be^+).

Еще одно актуальное направление создания атомных стандартов частоты – миниатюрные атомные стандарты, предназначенные для замены кварцевых эталонов в мобильных устройствах [4]. Предельная точность кварцевого эталона составляет 10^{-9} (без термостатации), в то время как миниатюрный стандарт способен обеспечить 10^{-11} – 10^{-12} . В миниатюрном стандарте громоздкие компоненты заменены миниатюрными или исключены вообще. Например, в миниатюрном рубидиевом стандарте резонансная лампа заменена лазером с вертикальным резонатором (ЛВР), поглощающая ячейка с атомами рубидия имеет размеры ~ 1 мм вместо нескольких см, а громоздкий СВЧ-резонатор исключен. Вместо резонатора применяется СВЧ-модуляция ЛВР на частоте, равной половине частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атомов рубидия-87. При СВЧ-модуляции в спектре лазера появляются боковые частоты, которые создают L-схему переходов и приводят к эффекту когерентного пленения населенностей.

В результате при сканировании частоты генератора образуется узкий резонанс (50–100 Гц), который используется для стабилизации частоты СВЧ-генератора.

Развитие направления совершенствования атомных и оптических стандартов частоты за рубежом

За рубежом имеется большое число научных групп, занимающихся созданием и совершенствованием атомных и оптических стандартов частоты. Наибольшие успехи достигнуты следующими группами (таблица «Статусы создания атомных оптических стандартов частоты»):

- D. Wineland, NIST, USA, одиночные ионы Hg^+ (статус Э7), Al^+ (статус Э8);
- C. Oates, NIST, USA, оптическая решетка с атомами Yb (статус Э8);
- J. Ye, JILA, USA, оптическая решетка с атомами Sr (статус Э8);
- E. Peik, PTB, Germany, одиночный ион Yb^+ (статус Э7);
- F. Riehle, PTB, Germany, оптическая решетка с атомами Sr (статус Э7);
- H. Katori, RIKEN, Japan, оптические решетки с атомами Yb (статус Э7), Sr (статус Э8), Hg (статус Э7);
- A. Madej, NRC, Canada, одиночный ион Sr^+ (статус Э8);
- S. Bize, SYRTE, France, оптические решетки с атомами Sr (статус Э6) и Hg (в разработке);
- P. Jill, NPL, UK, одиночный ион Yb^+ (статус Э7);
- компания Microsemi, USA, миниатюрный стандарт с атомами Rb (статус M2).

Статусы создания атомных оптических стандартов частоты

Код	Параметр	Стабильность атомных часов за 100 с								
		№ стадии								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Статус	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}	10^{-16}	10^{-17}	10^{-18}
Э	– первичных эталонов	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6	Э7	Э8	Э9
П	– стационарных/перевозимых часов	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9
М	– мобильных микрочасов	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7	М8	М9

Перечень достижений по стадиям развития оптических стандартов частоты нового поколения в мире

Создание оптических стандартов частоты нового поколения стало возможным благодаря развитию технологий лазерного охлаждения, оптических решеток, фемтосекундных оптических гребенок и квантовой информатики. Поскольку оптические стандарты основаны на оптических, а не СВЧ-переходах, их основной проблемой является прямое измерение оптических частот, для чего применяется фемтосекундная оптическая гребенка [5]. До ее создания в 2000 г. применялись сложные системы переноса частоты на основе смешения оптических, терагерцовых и СВЧ-частот. В настоящее время эта проблема решена, поэтому оптические стандарты начали интенсивно развиваться во всем мире. Двумя основными системами являются одиночные ионы в радиочастотных ловушках [6] и атомы в оптических решетках [7]. Наиболее передовые исследования в этом направлении выполняются в Национальном институте стандартов и технологий США (NIST).

В 2006 г. в NIST было впервые продемонстрировано, что оптические часы на основе атомов в оптических решетках не уступают в точности первичному СВЧ-стандарту на основе фонтана атомов цезия. В экспериментах 2013 г. было показано, что двое Sr-часов, содержащих по 10^4 атомов стронция, оставались синхронными друг относительно друга с точностью $1,5 \times 10^{-16}$. В том же году аналогичный эксперимент в NIST с решетками атомов иттербия продемонстрировал стабильность $1,6 \times 10^{-18}$. Дальнейшее исследование вкладов всех возможных паразитных эффектов и систематических погрешностей позволило в 2014 г. увеличить абсолютную точность до уровня 10^{-18} [8].

Одиночные ионы в радиочастотных ловушках позволяют, в принципе, достичь аналогичной точности [9]. В начале 2000-х гг. в качестве основного кандидата рассматривался ион $^{199}\text{Hg}^+$. Однако в 2008 г. в NIST было продемонстрировано, что ион алюминия обеспечивает более высокую точность за счет возможности применения элементов квантовой логики в комбинированной ионной ловушке с ионами алюминия и бериллия, где ион бериллия используется для неразрушающего измерения квантового состояния иона алюминия. В 2010 г. еще лучшие результаты были получены при замене иона бериллия ионом магния [10].

В 2000-х гг. в NIST выполнялись также исследования по созданию миниатюрных атомных часов на основе микрочаек с атомами рубидия и цезия. Исследования финансировались Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), которое сформулировало основные требования к таким часам: объем – менее 1 см^3 , потребляемая мощность – менее 30 мВт, относительная нестабильность – менее 10^{-11} за 1 ч. Исследования велись несколькими научными группами. Прототип первых миниатюрных часов был продемонстрирован в 2004 г. [11]. Какой-либо информации о достижении заданных параметров опубликовано не было. Однако в результате этих исследований была создана компания Symmetricom, которая коммерциализировала разработки. Начиная с 2011 г. она предлагает в открытой продаже миниатюрные атомные стандарты со следующими параметрами: объем – менее 17 см^3 , потребляемая мощность – менее 120 мВт, относительная нестабильность – менее 10^{-11} за 1 ч. В настоящее время эта компания поглощена компанией Microsemi, где предположительно продолжают работы по совершенствованию миниатюрных атомных часов.

Недавно, 23.08.2019, состоялся экспериментальный запуск атомных часов для дальнего космоса (DSAC), разработанных в Лаборатории реактивного движения NASA. Они представляют собой миниатюрные сверхточные часы на основе иона Hg^+ .

Преимущества и недостатки оптических стандартов частоты нового поколения

Дальнейшее повышение точности современных атомных СВЧ-стандартов частоты не представляется возможным из-за необходимости чрезмерно большого времени измерения. Уменьшение этого времени возможно за счет перехода от СВЧ-резонансов в атомах к оптическим резонансам. Оптическая частота таких резонансов составляет 10^{14} – 10^{15} Гц, поэтому точности измерения на уровне 10^{-15} можно достичь за время ~ 1 с. При времени измерения $\sim 10^3$ секунды точность может составить уже 10^{-17} – 10^{-18} . Для ее достижения необходимо работать только с лазерно-охлажденными атомами для исключения влияния доплеровского и времяпролетного уширений. Поэтому во всем мире в настоящее время ведутся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования по созданию оптических стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов.

Миниатюрные атомные стандарты предназначены для замены кварцевых эталонов в мобильных устройствах. Предельная точность кварцевого эталона составляет 10^{-9} , в то время как миниатюрный стандарт способен обеспечить 10^{-11} – 10^{-12} . Это может существенно повысить точность мобильных навигационных устройств, систем синхронизации и передачи данных.

К недостаткам оптических стандартов частоты на основе холодных атомов и ионов следует отнести большую техническую сложность их реализации. Для их создания применяются вакуумная камера, специальные ловушки для атомов и ионов и прецизионные лазеры с шириной линии ~ 1 Гц, требующие специальных дорогостоящих и громоздких систем стабилизации частоты на основе высокостабильных вакуумированных оптических интерферометров. Кроме того, каждому оптическому стандарту частоты присущи систематические погрешности: сдвиг резонанса под действием окружающего теплового излучения, столкновительные сдвиги из-за взаимодействия атомов в оптических решетках, сдвиги из-за присутствия паразитных электромагнитных полей, световой сдвиг в оптических решетках, остаточное доплеровское уширение и т. д. Вклад каждой из этих погрешностей в общую погрешность стандарта частоты должен тщательно измеряться, рассчитываться и учитываться.

Также при улучшении точности таких стандартов ниже 10^{-18} могут обнаружиться еще не известные источники дополнительных погрешностей, которые потребуют интенсивных теоретических и экспериментальных исследований.

В миниатюрных атомных стандартах частоты до сих пор остается не решенной проблема достижения параметров, заданных DARPA. В настоящее время миниатюрные стандарты не могут полноценно заменить кварцевые эталоны частоты из-за слишком больших массы и габаритов. Необходимо проводить дальнейшую работу по их совершенствованию.

Перспективы развития оптических стандартов частоты

В ближайшие пять лет предполагается значительно улучшить параметры оптических стандартов частоты для достижения абсолютной точности и погрешности на уровне 10^{-18} (и лучше). Рассматривается вопрос о переопределении первичного стандарта частоты, поскольку лучшие первичные стандарты на основе фонтана холодных атомов Cs обеспечивают предельную точность не выше 10^{-16} . Предполагается постепенная замена СВЧ-стандартов оптическими стандартами – как в метрологических службах, так и в разнообразных применениях атомных стандартов: глобальной навигации, синхронизации и передаче данных. СВЧ-стандарты будут заменяться также на спутниковых системах глобальной навигации. Такие работы планируются как в России, так и за рубежом. Например, в области миниатюрных атомных часов продолжатся работы по их дальнейшему совершенствованию и миниатюризации для достижения требований DARPA и постепенному внедрению в мобильные навигационные и другие устройства.

В ближайшие десять лет будут проводиться работы по дальнейшему повышению точности оптических атомных часов вплоть до уровня 10^{-20} . Для этого будут проводиться исследования по поиску подходящих атомных реперов с наименьшими систематическими погрешностями. Например, в качестве перспективных вариантов рассматриваются оптические магнитодипольные переходы в многозарядных ионах [12] и ядерные переходы в ядре атома тория [13].

Заключение

Для реализации планов развития оптических стандартов частоты в ближайшие 5–10 лет потребуются дальнейшее совершенствование высокостабильных источников лазерного излучения, так как ширина линии лазера не должна превышать ширину реперного резонанса для обеспечения максимально возможной точности. Это потребует значительных технических усилий по реализации ультрастабильных лазеров и поиску новых методов их стабилизации, а также по дальнейшему совершенствованию фемтосекундных оптических гребенок. Также необходимо найти новые перспективные атомы и ионы с уменьшенными систематическими сдвигами и уширениями реперных линий. Сами линии должны обладать шириной на уровне миллигерц. Для уменьшения наиболее неопределенного теплового сдвига будущие оптические стандарты должны использовать криогенные камеры.

Список литературы (References)

1. Bizeet S. et al. (2005) Journal of Physics. Is. 38. P. 449.
2. Derevianko A. et al. (2011) Reviews of Modern Physics. Is. 83. P. 331.
3. Wineland D.J. (2013) Reviews of Modern Physics. Is. 85. P. 1103.
4. Gerginov V. et al. (2005) Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Vancouver, Canada. P. 758.
5. Hänsch Th.W. (2006) Journal of Physics. Is. 78. P. 1297.
6. Wineland D.J. (2013) Journal of Physics. Is. 85. P. 1103.
7. Derevianko A. et al. (2011) Journal of Physics. Is. 83. P. 331.
8. Bloom B.J. et al. (2002) Nature. Vol. 506. P. 71.

9. Oskay W.H. et al. (2006) Physical Review Letters. Is. 97. P. 801.
10. Chou C.W. et al. (2010) Physical Review Letters. Is. 104.
11. Gerginov V. et al. (2005) Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. Vancouver, Canada. P. 758.
12. Yudin V.I. et al. (2014) Physical Review Letters. Is. 113.
13. Herrera-Sancho O.A. et al. (2013) Physical Review. A. 88.