

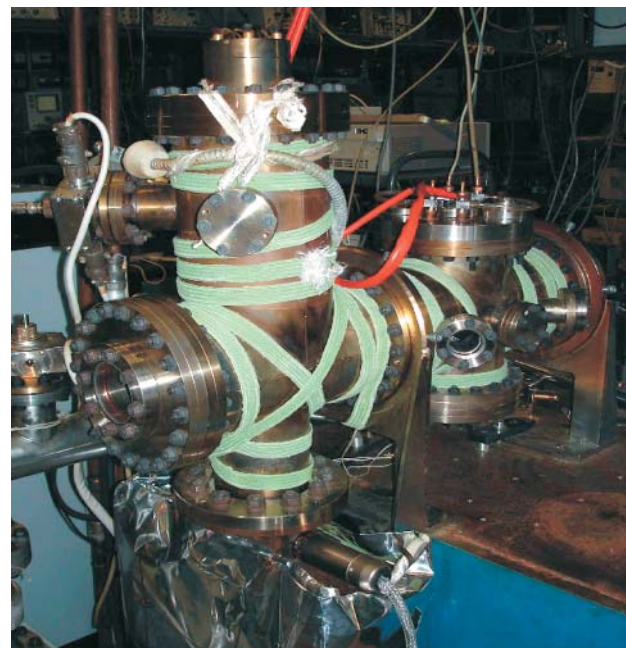
СДЕЛАНО В СО РАН

Новое время

В Институте лазерной физики СО РАН (Новосибирск) ведутся пионерные исследования по созданию нового поколения стандартов частоты на основе высокостабильных лазеров и ультрахолодных атомов. Сверхузкие линии поглощения охлажденных и локализованных с помощью лазерного излучения атомов щелочно-земельных элементов позволят в ближайшем будущем разработать первичный эталон одной из основных физических величин – времени.

Измерения различных величин лежат в основе всей современной науки и техники. Измерять – значит сравнивать некую величину с эталоном (стандартом). Без эталонов невозможно проводить точные измерения.

Стандарты частоты в этом ряду занимают особое место. Они играют важнейшую роль как в фундамен-



Первая в России магнитооптическая ловушка для щелочно-земельных атомов разработана в СО РАН. На основе подобных устройств будут созданы стандарты частоты нового поколения

тальных научных исследованиях, так и в различных метрологических и навигационных приложениях. Это связано в первую очередь с тем, что стандарты частоты, реализующие с 1967 г. эталон одной из основных единиц системы СИ – секунды, на много порядков более точные по сравнению с другими эталонами.

В настоящее время первичный стандарт частоты строится на основе стабильного перехода (9,2 ГГц) между подуровнями *сверхтонкой структуры* атома цезия-133. На этом стандарте базируется международная шкала атомного времени TAI.

Атомные стандарты частоты микроволнового диапазона получили широкое распространение в навигационных системах GPS и ГЛОНАСС, где компактные цезиевые и рубидиевые устройства с относительной точностью 10^{-13} (уход частоты за сутки) установлены на каждый из спутников системы, а водородные – с долговременной стабильностью около 10^{-14} – на наземные станции слежения. Высокая точность определения координат с помощью этих навигационных систем достигается в значительной степени благодаря точности частоты.

Заметим, что прецизионность цезиевого стандарта увеличилась по сравнению с его первой реализацией на 5 порядков (!) и приблизилась, по всей видимости, к своему пределу. Достигнутая на сегодня точность порядка $4 \cdot 10^{-16}$ для стационарных установок с использованием «фонтана» холодных атомов ограничивается фундаментальными физическими причинами, такими как сдвиг частоты за счет столкновений атомов, теплового излучения, гравитационный сдвиг и т. д.

Дальнейшее увеличение точности специалисты связывают с уходом из микроволнового диапазона в оптический. Важным преимуществом оптических стандартов является их потенциально большая стабильность за короткие времена (0,1–100 с), что должно позволить существенно быстрее проводить измерения. В качестве реперов предполагается использовать узкие резонансы в спектрах поглощения *ультрахолодных* (температура около 1 микрокельвина) и *локализованных* (захваченных) в электромагнитные и оптические ловушки одиночных ионов и ансамблей нейтральных атомов.

Актуальность этих исследований существенно возросла в связи с прогрессом в области оптических синтезаторов частот на основе фемтосекундных* лазеров. Методы охлаждения и локализации атомов с помощью лазерного излучения успешно развивались в течение последних двух десятилетий. При использовании «медленных» атомов устраняются или значительно уменьшаются систематические погрешности, обусловленные движением атомов, и существенно увеличивается время взаимодействия атомов с излучением, что приводит к сужению линий поглощения в спектре.

Как замедлить атом? Простейший механизм – *сила спонтанного светового давления*. При поглощении атомом лазерного излучения, направленного ему навстречу, за один цикл поглощения и последующего спонтанного излучения атом в среднем получает импульс в направлении, противоположном его движению. Иными словами, он тормозится. Несмотря на то что в одном цикле скорость меняется на незначительную величину – несколько сантиметров в секунду, в то время как первоначальные скорости составляют сотни метров в секунду, из-за высокой скорости оптических переходов (10^8 – 10^9 циклов в секунду) тепловые атомы замедляются очень эффективно.

Весьма перспективной является геометрия из шести лазерных лучей в трех взаимно перпендикулярных направлениях с отстройкой частоты в «красную» сторону относительно резонансной. Дополнительно в системе необходимо создать магнитное поле определенной конфигурации, которое также способствует локализации атомов. Такое устройство получило специальное название – *магнитооптическая ловушка* (МОЛ). Благодаря механизму спонтанного светового давления часть атомов, «загружаемых» в ловушку из термического пучка, будет замедляться, охлаждаться и локализоваться в геометрическом центре МОЛ.

Особый интерес для создания нового поколения оптических стандартов частоты представляют атомы щелочно-земельных элементов – магния, кальция, стронция и иттербия, имеющие узкие линии поглощения. В Институте лазерной физики СО РАН мы сделали упор на исследования ультрахолодных атомов магния. Высоковакуумная камера МОЛ, разработанная

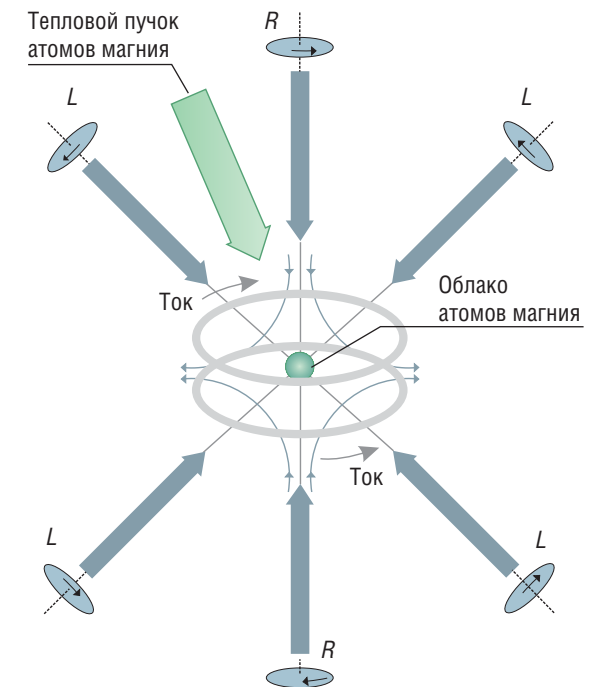


Схема магнитооптической ловушки. Токпроводящие кольца с разнонаправленными токами создают нужную конфигурацию магнитного поля. «Загружаемые» из теплового пучка атомы магния локализуются и охлаждаются в центре ловушки, где пересекаются шесть лазерных лучей с круговыми поляризациями (R – правые, L – левые)

совместно с Институтом физики полупроводников СО РАН, позволяет получать давление остаточных газов менее 10^{-8} Па. Уникальная лазерная система выдает перестраиваемое по частоте непрерывное узкополосное излучение в ультрафиолетовом диапазоне на длине волны 285 нм.

В результате экспериментов исследователям удалось получить облако из 10^5 – 10^6 атомов магния при температуре 3–4 милликельвина. Линейный размер атомного облака – около 0,5 мм. Следует подчеркнуть, что это первая в России реализация магнитооптической ловушки для щелочно-земельных атомов.

Сейчас в ИЛФ идет работа по дальнейшему охлаждению атомов магния – до 10^{-5} К. Ученые надеются достичь успеха, захватывая атомы в так называемых *оптических решетках*, т. е. в узлах или пучностях стоячей электромагнитной волны. Это позволит полностью устранить влияние остаточного движения атомов на точность разрабатываемого стандарта частоты, которая должна выйти на уровень 10^{-17} – 10^{-16} .

К. ф.-м. н. А. Н. Гончаров
(Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск)

* $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$