**ЦЕЗИЕВЫЕ АТОМНЫЕ ЧАСЫ**

Для того, чтобы снять вырождение по магнитным подуровням и обеспечить воз­можность селективного возбуждения метрологического перехода |F = 3, тр = 0) —♦ —\* \F = 4, тр = 0), область взаимодействия помещается в однородное магнитное поле. Традиционно это поле называется С-полем, по аналогии с полями поляризатора (A-полем) и анализатора (В-полем). Напряженность поля подбирается таким обра­зом. чтобы обеспечить компромисс при выполнении двух противоречащих друг другу условий. Так, оно должно быть достаточно сильным, чтобы разделить микроволновые резонансы по частоте. При этом С-поле сдвигает резонансную частоту метрологиче­ского перехода в соответствии с выражением (7.2), что необходимо корректировать для получения частоты невозмущенного перехода. Кроме этого, увеличение напря­женности С-поля приводит к увеличению уровня флуктуаций и, соответственно, уровню шумов частоты перехода. В промышленных цезиевых часах С-поле обычно создается с помощью катушки, обмотка которой расположена вокруг резонатора в плоскости изображения на рис. 7.3. Следовательно, С-поле в этом случае будет направлено перпендикулярно этой плоскости. Поскольку частота перехода зависит от напряженности магнитного поля, необходимо использовать магнитные экраны для подавления лабораторного магнитного поля и его флуктуаций.

В С-поле метрологический переход испытывает квадратичный по полю сдвиг относительно частоты невозмущенного перехода, определенной как 9 192631 770 Гц. Для того, чтобы частота на выходе из VCXO точно соответствовала значению СИ, необходимо учесть этот сдвиг путем введения соответствующей коррекции в синте­затор согласно выражению (7.2), для чего необходимо знать напряженность С-поля. Напряженность С-поля определяется с помощью выражения (7.2) по частоте перехо­дов, обладающих линейным эффектом Зеемана.

D:\C\diss\books\media\image195.jpeg

(7.2)

В отличие от схемы, изображенной на рис. 7.3, печь и детектор находятся на оси установки, при этом используются различные методы для блокировки тех атомов, вклад которых в сигнал нежелателен. С помощью такой системы можно сфокусировать атомы в определенной точке, положение которой будет зависеть от их скорости. Использование соответ­ствующей диафрагмы позволяет дополнительно ввести селекцию по скоростям. Для характерной температуры цезиевой печи Т и 450 К наиболее вероятная скорость ато­мов составляет около 250 м/с. Используя магнитную селекцию по скоростям, можно обеспечить условия, при которых вклад в сигнал Рэмси-спектроскопии будут форми­ровать лишь атомы со средней скоростью 95 м/с. Ширина распределения скоростей в этом случае оказывается намного уже, чем в тепловом пучке. Соответственно, в этом случае можно зарегистрировать большее число полос Рэмси, как видно из рис. 7.4. В первичных лабораторных стандартах однородность С-поля, возбуждаемого катушкой, как описано в разделе 7.1.1, оказывается недостаточной. Поэтому источник поля заменяется на соленоид, ось которого совпадает с осью пучка ато­мов Cs.

Сканирование частоты генератора I/ вблизи частоты атомного резонанса i/o приводит к возникновению сигнала на токовом детекторе, аналогичного тому, который представлен на рис. 7.3. Спектральная линия состоит из интерференционных полос резонанса Рэмси на широком пьедестале Раби. Как было показано в § 6.6, атомы, возбужденные когерентным образом при прохождении двух зон взаимодействия в резонаторе, формируют интерференционные резонансы Рэмси. Взаимодействие с радиочастотным полем в первой зоне переводит атомы Cs в когерентную суперпозицию состояний F = 4, тр = 0 и F = 3, тр = 0, при этом квантово-механическое состояние атома начинает эволюционировать во времени с частотой, соответствующей разнице энергий уровней. После прохождения второй зоны взаимодействия с возбуждающим полем вероятность обнаружения атома на уровне F = 4 или F = 3 будет зависеть от разности фазы внешнего радиочастотного поля и фазы колебаний атомного осциллятора. Таким образом, населенности уровней F = 4 и F = 3 на выходе из зоны взаимодействия являются осциллирующими функциями частоты генератора, что приводит к появлению интерференционной структуры Рэмси. Усреднение интерференционной картины по широкому тепловому распределению по скоростям приводит к быстрому снижению контраста боковых полос. Пьедестал Раби, в свою очередь, соответствует доплеровски уширенной линии перехода, возбуждаемой независимо в каждой из зон взаимодействия.

, для достижения отно­сительной погрешности часов в 10-14 необходимо определить центр спектральной линии перехода с погрешностью около 10-6 относительно ее ширины: в цезиевых часах ширина полосы Рэмси составляет около 60 Гц, а соответствующая добротность перехода - Q ~= 1,5 \* 108.

Для обоснования столь низкой погрешности необходимо выполнить тщательный анализ всех эффектов, которые могут сдвигать частоту метрологического перехода. В случае, если удается количественно охарактеризовать влияние того или иного систематического эффекта, частота сигнала, генерируемого часами, корректируется для обеспечения соответствия частоте невозмущенного пере­хода. Внесение поправок должно выполняться с осторожностью, поскольку эта про­цедура также имеет свою погрешность. Суммарная погрешность частоты вычисляется с использованием статистических методов при учете всех значимых вкладов.

В этом разделе мы обсудим наиболее важные источники сдвигов частоты в первичных атомных цезиевых стандартах.

Влияние магнитного поля.

Наибольшее отклонение частоты от ис­тинного значения связано с эффектом Зеемана, который приводит к сдвигу энер­гетических уровней в магнитном поле (см. рис. 7.1 и 7.2). Семь линий в спектре, изображенном на рисунке 7.5, соответствуют семи возможным переходам между магнитными подуровнями, которые удовлетворяют правилу отбора Дтк = 0. Спектр является асимметричным по причине различной заселенности зеемановских подуров­ней (рис. 7.5), возникающей при магнитной селекции атомов Cs в неоднородном магнитном поле.

Характерному для цезиевых часов значению С-поля около 8мкТл соответствует сдвиг частоты метрологического перехода в 2,7 Гц, или 3 • Ю~10 в относительных единицах. Среднее значение магнитного поля (В), влияние которого испытывают атомы Cs при прохождении между двумя зонами возбуждения, можно опреде­лить по разности частот двух резонансов, соответствующих различным магнит­ным подуровням (рис. 7.5). Для того, чтобы правильно определить сдвиг частоты метрологического перехода, необходимо принять во внимание, что для определе­ния квадратичного зеемановского сдвига необходимо знать (В2) (см. 7.2). Вели­чина (В2) оказывается равной (В)2 лишь в том случае, если С-поле однородно. Следовательно, в атомных часах требуется высокая однородность С-поля. В ра­боте [249] однородность поля соответствовала среднеквадратичному отклонению ДВ/В в несколько единиц на 10-4. Это позволяет скорректировать квадратичный зеемановский сдвиг и обеспечить соответствующую относительную погрешность частоты стандарта в 1 • 10“|5. Если относительные флуктуации магнитного поля во времени составляют 5- 10-5, то, используя соотношение АиВг/и^ 2АВ/В, по­лучим, что соответствующий сдвиг частоты в поле 8мкТл равен 3- 10~14. Отсюда следует, что область взаимодействия должна быть эффективно заэкранирована от внешних магнитных полей, а С-поле, в свою очередь, должно быть стабильным во времени.

Фазовые сдвиги в резонаторе

В случае идеального резонатора энергия поля возбуждения разделяется между правой и левой частями резонатора поровну, что обеспечивает взаимодействие каждого атома пучка с полем одинаковой частоты . Разность длин рукавов резонатора, неровность его стенок и несимметричность подачи в него поля возбуждения ведет к возникновению разности фаз поля между зонами взаимодействия. Изменение резонансной частоты вследствие этого эффекта для интервала времени между импульсами возбуждения равно:

Сдвиг частоты из-за теплового излучения

В стандартах на нейтраль­ных атомах, к которым относятся и цезиевые атомные часы, погрешность частоты, вызванная штарковским сдвигом в постоянном электрическом поле, оказывается несущественной, поскольку последнее можно эффективно экранировать. Однако ато­мы Cs всегда подвергаются воздействию электромагнитного теплового поля, которое излучает любое тело с температурой Т ≠ 0. Указанный эффект может быть в значительной степени подавлен, если установка поддерживается при криогенной температуре.

Доплеровский сдвиг второго порядка

Если атомы Cs двигаются со скоростью в лабораторной системе отсчета, то за счет замедления времени воз­никает сдвиг частоты, равный

Вклад в интерференционную картину Рэмси дают атомы с различными скоростями, и, анализируя спектр сигнала, можно извлечь информацию о соответствующем распределении скоростей. Распределение скоростей можно вычислить, используя преобразование Фурье от спектральной формы полос Рэмси.

Эффект затягивания резонатором

Этот эффект возникает в том случае, если собственная частота микроволнового резонатора не точно совпадает с частотой атомного резонанса. Если часы работают при оптимальной мощно­сти возбуждающего поля, то суммарная вероятность перехода должна обладать лишь слабой зависимостью от мощности. Автоматическая подстройка мощности.

Оптическая накачка и детектирование

Перераспределение населенности между подуровнями можно осуществлять с помощью оптической на­качки. Увеличение населен­ности этого уровня приводит к соответствующему росту сигнала. Если пучок излучения оптической накачки перпендикулярен направлению атомного пучка, возбуждение не зависит от скорости атомов, а следовательно можно использовать более интенсивные и пространственно однородные пучки атомов. Так же для оптической накачки не требуется сильных градиентных магнитных полей, как в случае магнитной селекции. Это позволяет избежать переходов Майорана, вызывающих сдвиги частоты спектральной линии.

Процесс возбуждения и испускания фотонов происходит многократно и каждый атом испускает большое количество фотонов, что фактически позволяет детектировать каждый возбужденный атом.

Специфический источник погрешности для часов с оптической накачкой связан с рассеянным светом от накачивающего и регистрирующего лазерных пучков, который присутствует в области пролета атомов между зонами взаимодействия с микроволновым полем резонатора. Такое излучение вызывает и динамический штарковский сдвиг уровней, который был проанализирован в ряде работ [11, 127].

Выводы

Для определения общей погрешности измерения в виде одного числа вычисляется квадратный корень из суммы квадратов отдельных погрешностей.

Тщательная разработка составных частей, резонаторов и пр. Использование оптической накачки и детектирования. Внесение поправок, управление через мощность и подстройку ПЧ через ЦВС.

Даже при тщательной разработке электронных схем и использовании специально отобранных компонентов они могут вносить сдвиги в частоту стандарта и ухудшать его характеристики. В качестве примеров можно привести сдвиги напряжения в интеграторах, использу­емых в схемах обратной связи, и шумы сигналов. В стандарте частоты генерируется ряд высокочастотных сигналов, которые используют в различных целях, в том числе и для получения сигналов времени. Нелинейные элементы в электронных схемах могут приводить к сдвигам фазы или частоты в том случае, если спектральная чистота исходного сигнала оказывается недостаточно высокой. При разработке высокоточных стандартов частоты необходимы значительный опыт и мастерство. позволяющие снизить перечисленные вклады до того уровня, когда они становятся незначительными и ими можно пренебречь. Все это добавляет к общей нестабильности.