Детектирование переходов между высоколежащими ридберговскими состояниями Ca-40 с использованием эффекта автоионизации, оптического и микроволнового излучения

Б. Б. Зеленер, Е. В. Вильшанская, С. А. Саакян и В. А. Саутенков
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: bobozel@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2022 г.

Аннотация. В настоящей работе продемонстрирован метод детектирования переходов между высоколежащими ридберговскими состояниями Ca-40 с использованием эффекта автоионизации, оптического и микроволнового излучения в непрерывно работающей магнитооптической ловушке. Проведены экспериментальные исследования ридберговских переходов 4s120s $^1S_0$–4s120p $^1P_1$ с использованием резонансных лазерных пучков 672 нм, 796 нм и микроволнового излучения на частоте порядка 2 ГГц. Разработанный подход является универсальным и может быть применен для исследования структуры и энергий высоколежащих ридберговских состояний щелочноземельных металлов. https://doi.org/10.33849/2022114

1. ВВЕДЕНИЕ

Технологии создания датчиков микроволнового поля на основе ридберговских атомов обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными датчиками, включая чувствительность, селективность и широкий диапазон перестройки [1]. Традиционные приемники и датчики микроволнового поля, основанные на ридберговских атомах, имеют разные принципы работы. В атомарных датчиках фотоприемник, регистрирующий сигнал флюоресценции, аналогичен антенне и интерфейсной электронике традиционного приемника. Падающее микроволновое излучение в диапазоне частот от МГц до ТГц влияет на внутреннее состояние ридберговских атомов, в резонансном случае вызывает переходы между энергетическими уровнями, что, в свою очередь, накладывает модуляцию на оптические поля, проходящие через атомы. Эти модуляции считываются как спектральные характеристики электрического тока, создаваемого фотоприемником. В настоящей работе в качестве датчиков используются атомы щелочноземельного металла Ca-40. Особенностью атомов щелочноземельных металлов является возможность возбуждения одновременно двух электронов на вышележащие орбиты при помощи оптического излучения. Такой атом имеет очень короткое время жизни за счет возникновения автоионизационного состояния [2]. За пикосекундные времена внешний электрон из высоколежащего ридберговского состояния переходит за порог ионизации, а нижний электрон возвращается в основное состояние. В настоящей работе мы описываем метод детектирования переходов между высоколежащими ридберговскими состояниями Ca-40 с использованием эффекта автоионизации, оптического и микроволнового излучения в непрерывно работающей магнитооптической ловушке (МОЛ) [3].

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте используется 5 непрерывных лазеров: 423 нм — лазер, создающий МОЛ, 672 нм — лазер оптической накачки, 796 нм — лазер, создающий ридберговские атомы, 397 нм и 866 нм — лазеры, используемые для создания ионов и их регистрации с помощью лазерно-индуцированной флюоресценции (LIF), а также антенну, излучающую микроволновое излучение на частоте около 2 ГГц. Схема уровней нейтрального атома Ca-40 и иона Ca^+-40, задействованных в эксперименте, приведена на рисунке 1.

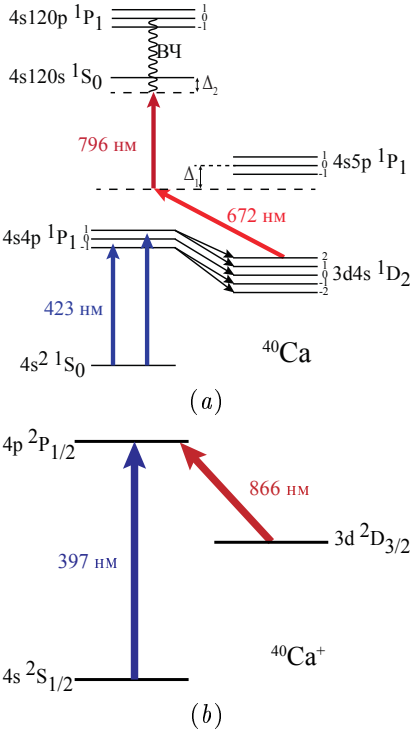

Рисунок 1. Схема энергетических уровней атома (a) и однозарядного иона (b) Ca-40. Δ_1 и Δ_2 — частоты отстроек лазерного и радиочастотного излучения от резонансов 4s120s $^1P_1$ и 4s120s $^1S_0$ соответственно; ВЧ — микроволновое излучение с частотой 1.987 ГГц.

Температура атомов МОЛ около 3 мК. Лазер на длине волны 796 нм непрерывно сканируется по частоте в диапазоне 0.4 ГГц. Лазер на длине волны 423 нм привязан по частоте к атомному переходу Ca-40 в горячей ячейке, а остальные лазеры привязаны по частоте к стабильным интерферометрам Фабри-Перо с точностью не хуже 1 МГц. В эксперименте мы фокусируем сигнал флюоресценции нейтральных атомов Ca-40 и

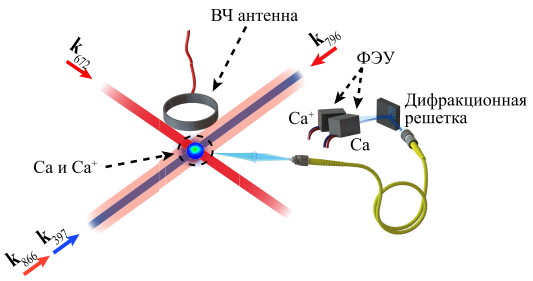

Рисунок 2. Принципиальная схема установки по регистрации микроволновых резонансов с помощью антенны, расположенной вне вакуумной камеры.

ионов Ca^+-40, полученных в результате автоионизации при помощи линзы в оптическое волокно (рисунок 2). Далее при помощи дифракционной решетки мы разделяем сигнал флюоресценции нейтральных атомов МОЛ на длине 423 нм и ионов на длине волны 397 нм и направляем в разные фотоэлектронные умножители. Поскольку ионы имеют малую концентрацию, для увеличения интенсивности сигнала флюоресценции необходимо постоянно переводить ионы в возбужденное состояние при помощи лазера на длине волны 397 нм интенсивностью 1.5×10^4 Вт/м^2 и лазера на длине волны 866 нм интенсивностью 0.4×10^4 Вт/м^2 (радиус обоих пучков около 10^{-3} м). Более подробно устройство установки по лазерному охлаждению атомов Ca-40 описано в [4].

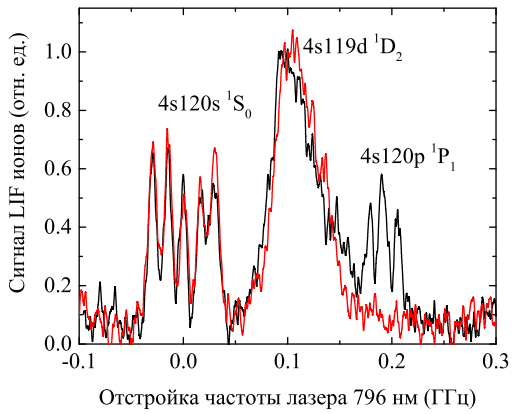

Рисунок 3. Спектр LIF ионов Ca-40 в результате автоионизации ридберговских атомов в зависимости от отстройки лазера на длине волны. Красная линия — микроволновое излучение выключено; черная линия — микроволновое излучение включено.

В первом эксперименте мы записывали сигнал LIF ионов, сканируя лазер на длине волны 796 нм с линейной поляризацией без микроволнового поля в области резонансов 4s120s $^1S_0$ и 4s120d $^1D_2$. Отстройка от резонансного уровня лазера с длиной волны 672 нм с линейной поляризацией составляет $\Delta_1 = 120$ МГц. Отстройка позволяет наблюдать когерентный двухфотонный резонанс на переходе 3d4s $^1D_2$–4s120s $^1S_0$. Сигнал LIF ионов в данной схеме в результате автоионизации ридберговских атомов Ca-40 представлен на рисунке 3 (красная линия). Далее мы записывали сигнал LIF ионов, сканируя лазер на длине волны 796 нм в присутствии лазера на длине волны 672 нм с отстройкой Δ_1 и линейно поляризованного микроволнового поля на частоте 1.987 ГГц, что соответствует отстройке от резонанса $\Delta_2 = 170$ МГц (рисунок 1). Такая конфигурация полей позволила нам наблюдать когерентный трехфотонный оптомикроволновый резонанс 4s120p $^1P_1$ (см. черную линию на рисунке 3). Как видно из рисунка 3, в эксперименте наблюдается расщепление детектируемых резонансов. Возможные причины расщепления резонансов связаны с динамическим эффектом Штарка. В дальнейших исследованиях предполагается провести детальный теоретический и экспериментальный анализ влияния этого эффекта.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирован метод детектирования переходов между высоколежащими ридберговскими состояниями Ca-40 с использованием эффекта автоионизации, оптического и микроволнового излучения в непрерывно работающей магнитооптической ловушке. Проведены экспериментальные исследования ридберговских переходов 4s120s $^1S_0$–4s120p $^1P_1$ с использованием резонансных лазерных пучков 672 нм, 796 нм и микроволнового излучения на частоте порядка 2 ГГц. Также хотелось бы отметить, что проведение подробного анализа подобных спектров позволит контролировать интенсивность приложенных лазерных и микроволновых полей, например, в экспериментах по созданию высокоточных часов на основе атомов щелочноземельных металлов. Разработанный метод регистрации микроволновых резонансов является универсальным и может быть применен для исследования структуры и энергий высоколежащих ридберговских состояний любых щелочноземельных металлов имеющих оптические переходы для однозарядных ионов с любыми орбитальными и магнитными квантовыми числами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-01056-22-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fancher C T, Scherer D R, John M C S and Marlow B L S 2021 *IEEE Transactions on Quantum Engineering* **2** 3501313
2. Gallagher T F 1988 *Rep. Prog. Phys.* **51** 143–88
3. Зеленер Б Б, Вильшанская Е В, Саакян С А, Саутенков В А, Зеленер Б В и Фортов В Е 2021 *Письма в ЖЭТФ* **113** 92–5
4. Зеленер Б Б, Аршинова И Д, Бобров А А, Вильшанская Е В, Саакян С А, Саутенков В А, Зеленер Б В и Фортов В Е 2018 *Письма в ЖЭТФ* **108** 829–33