

8 - Квантовая электроника и лазерная физика

Козлова Катерина Семеновна, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

Исследование магнитооптических резонансов Белла-Блума в поле Земли в ячейке с парами 87Rb для применения в магнитометрии

Макаров Антон Олегович

e-mail: k.kozlova1@g.nsu.ru

стр. 168

Прилуцкая Анна Александровна, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

Стабилизация частоты полупроводникового лазера для экспериментов с одиночными атомами в оптических дипольных ловушках

Бетеров Илья Игоревич, к.ф.-м.н.

e-mail: a.prilutskaya@g.nsu.ru

стр. 169

Щербак Вячеслав Валерьевич, 2 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

Разработка модели люминесценции квантовых точек CsPbBr_3 в приближении одиночного возбуждения

Французов Павел Анатольевич, к.ф.-м.н.

e-mail: shdaver@gmail.com

стр. 170

Исследование магнитооптических резонансов Белла-Блума в поле Земли в ячейке с парами ^{87}Rb для применения в магнитометрии

^{1,2}Козлова Катерина Семеновна

^{1,2}Бражников Денис Викторович, ^{1,2,3}Гончаров Андрей Николаевич

¹Новосибирский государственный университет

²Институт лазерной физики СО РАН

³Новосибирский государственный технический университет

^{1,2}Макаров Антон Олегович

k.kozlova1@g.nsu.ru

Приборы для измерения магнитного поля (МП), магнитометры, широко применяются во множестве областей науки и техники. Ранее считалось, что сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД) является одним из наиболее чувствительных типов магнитометров. Но в настоящее время больших чувствительностей достигли оптические магнитометры. Кроме того, оптические магнитометры имеют ряд преимуществ при измерении малых МП: небольшой размер, работа при комнатной температуре, высокая чувствительность, низкая цена по сравнению со СКВИД. Некоторые разновидности оптических магнитометров, в том числе представленный в данной работе, измеряют МП в абсолютных единицах измерения, в отличие от СКВИД, измеряющих МП в относительных единицах измерения.

Рассмотрим прохождение непрерывной световой волны с круговой поляризацией через кювету с атомами щелочного металла. В случае создания амплитудной модуляции, например, при помощи акустооптического модулятора (АОМ), на частоте Лармора, соответствующей модулю постоянной компоненты МП (в данной работе частота Лармора устанавливалась 160 кГц в экранированной среде и была равна 450 кГц в поле Земли), будет наблюдаться изменение в поглощении излучения в кювете. При сканировании частоты Лармора с некоторой девиацией будет наблюдаться лоренцевский контур, описывающий наблюдаемый сигнал – магнитооптический резонанс. Описанная схема регистрации магнитооптических резонансов работает на основе классической схемы Белла-Блума [1]. Излучение на длине волны, резонансной оптическому переходу в D_1 линии ^{87}Rb (795 нм), мощностью 750 мкВт и диаметром пучка 5 мм проходило через кубическую кювету с гранью 5 мм, заполненную щелочным металлом ^{87}Rb и буферным газом N_2 300 Торр. Кювета находилась в трёхслойном магнитном экране, подавляющем внешнее МП на пять порядков в объёме кюветы. Постоянная компонента МП, направленная перпендикулярно волновому вектору излучения, создавалась при помощи катушек Гельмгольца. Для регистрации резонансов Белла-Блума использовалась техника синхронного детектирования.

Для получения большей чувствительности магнитометра классическая схема Белла-Блума была модифицирована: вместо циркулярно поляризованной волны мы предлагаем использовать эллиптически поляризованную волну, а магнитооптические резонансы наблюдать с помощью поляриметра [2]. Такую волну можно представить в виде суперпозиции волны накачки и пробной волны, обладающими противоположными круговыми поляризациями. Похожая конфигурация была исследована ранее для наблюдения резонансов Ханле, но с двумя встречными линейно поляризованными волнами [3]. На выходе из кюветы резонансы могут исследоваться в интенсивности каждой из волн по отдельности, либо с помощью дифференциального канала балансного фотодетектора. В предложенной схеме наблюдается эффект смены знака магнитооптического резонанса, наблюдаемого в канале фотодетектора, соответствующего пробной волне. А именно, вместо увеличения амплитуды модуляции интенсивности на выходе из кюветы при совпадении частоты модуляции с частотой Лармора, что имеет место в классической схеме, наблюдалось уменьшение амплитуды модуляции света. При использовании дифференциального канала фотодетектора, на котором сигналы от волны накачки и пробной волны вычитаются, наблюдается магнитооптический резонанс со значительно улучшенным отношением сигнал/шум.

Предложенная модификация стандартной схемы Белла-Блума интересна для дальнейших приложений в квантовой магнитометрии для создания компактного атомного магнитометра. Для обеих схем были измерены параметры резонанса в зависимости от оптической мощности излучения и температуры паров в кювете, а также произведены оценки чувствительности измерений магнитного поля. Так, в модифицированной схеме она достигает 300 фТл/√Гц против 30 пТл/√Гц в классической. Также были проведены эксперименты по наблюдению резонансов Белла-Блума в условиях земного магнитного поля (рис. 1).

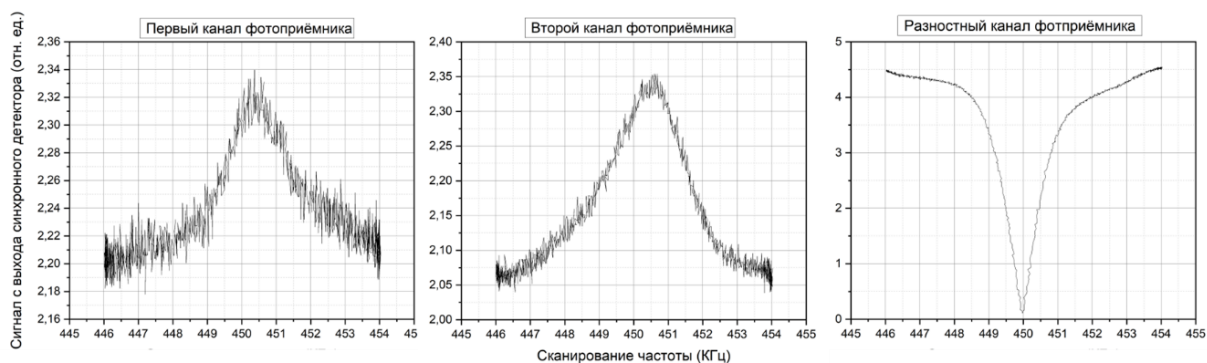


рис.1. Магнитооптические резонансы, зарегистрированные в модернизированной схеме Белла-Блума в земном поле с трёх каналов балансного фотоприёмника при температуре кюветы 85°C и эллиптичности 20 градусов.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00195).

Список публикаций:

- [1] Bell W.E., Bloom A.L. // *Phys Rev Lett.* 1961. Vol. 6, № 6. P. 280–281.
 [2] Makarov. A. O. et al. // *JEP Letters*, 2023, Vol. 117, No. 7, P. 509–516.
 [3] Brazhnikov D. V. et al. // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2019, Vol. 52.

Стабилизация частоты полупроводникового лазера для экспериментов с одиночными атомами в оптических дипольных ловушках

Прилуцкая Анна Александровна

Новосибирский государственный университет

Бетеров Илья Игоревич, к.ф.-м.н.

a.prilutskaya@gsu.ru

Трехфотонное лазерное возбуждение $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2} \rightarrow 37P$ одиночных атомов рубидия, захваченных в оптическую дипольную ловушку, представляет интерес для исследования взаимодействия атомов в nP -состояниях, что невозможно при реализации широко используемой по всему миру двухфотонной схемы лазерного возбуждения ридберговских состояний, позволяющей возбуждать nS - и nD -состояния атомов [1].

На второй ступени $5P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$ трехфотонного лазерного возбуждения используется полупроводниковый лазер с внешним резонатором Sacher Lasertechnik с длиной волны 1367 нм. Для реализации данного атомного перехода необходимо, чтобы полупроводниковый лазер обладал долговременной стабильностью частоты и узкой шириной линии лазерного излучения. Однако в полупроводниковых лазерах имеется ряд источников шумов – токовый шум (мерцательный шум), акустические шумы, шумы источников питания. Это приводит к уширению линии лазера, а тепловые явления приводят к долговременным дрейфам частоты.

В нашей работе была реализована стабилизация частоты полупроводникового лазера методом Паунда-Дривера-Холла, где частота лазерного излучения привязывается к одному из пиков пропускания высокостабильного интерферометра Фабри – Перо. После стабилизации частоты с использованием ПИД-регулятора Vescent Photonics D2-125 ширина линии лазера, оцененная по остаточному сигналу ошибки, составила 25 кГц. Для уточнения значения ширины линии был проведен эксперимент по оценке ширины спектра биений при самогетеродинамировании лазерного излучения [2] с использованием акустооптического модулятора для смещения частоты излучения на 80 МГц, оптоволоконной линии задержки длиной 25 км и спектроанализатора Rigol DSA815. Полученная оценка ширины линии по спектру биений составила менее 8 кГц.

Список публикаций:

1. Бетеров И.И и др. Трехфотонное лазерное возбуждение одиночных ридберговских атомов рубидия в оптической дипольной ловушке // *ЖЭТФ*, 2023, том 164, вып. 2 (8), стр. 282–290
 2. Hanne Ludvigsen, Mika Tossavainen, Matti Kaivola Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay // *Optics Communications* 155 1998 180–186

Разработка модели люминесценции квантовых точек CsPbBr₃ в приближении одиночного возбуждения

Щербак Вячеслав Валерьевич

Новосибирский государственный университет

Французов Павел Анатольевич, к.ф.-м.н.

shdaver@gmail.com

Квантовые точки (КТ) имеют обширные перспективы применения в оптоэлектронике. Применение КТ в технике требует разработки теории их люминесценции, и в настоящее время обширно изучаются полупроводниковые КТ со структурой перовскита. Механизм люминесценции полупроводниковых КТ предложен в работе [1]. Из построенной теории люминесценции КТ можно будет впоследствии перейти к рассмотрению лазерной генерации в ансамблях КТ. В первом приближении можно считать, что КТ в ансамблях не взаимодействуют друг с другом, и использовать при расчётах результаты, полученные для одиночной точки. Испускание фотонов квантовыми точками происходит в результате рекомбинации электрон-дырочных пар, образованных в КТ под действием накачивающего излучения. Процессы образования и рекомбинации электрон-дырочных пар в КТ можно представить как марковскую цепь из трёх состояний: основного, возбуждённого и захваченного, соответствующих отсутствию электрон-дырочной пары, созданию пары и захвату электрона или дырки на дефектный энергетический уровень – ловушку – в запрещённой зоне. В приближении одиночного возбуждения рассматривается ситуация возникновения только одной электрон-дырочной пары в каждой КТ и считается, что из состояний, когда в КТ возникают две пары носителей зарядов, происходит очень быстрый переход к состоянию с одной парой. Тогда вероятностям переходов между тремя обозначенными состояниями будут соответствовать константы скоростей соответствующих процессов, происходящих в КТ: образования пары, излучательных и безызлучательных рекомбинаций из возбуждённого и захваченного состояний, захват электрона в ловушку и выход из неё. Для построенной марковской цепи можно записать систему прямых уравнений Колмогорова и условие нормировки вероятностей. Решением полученной системы для вероятности излучательного перехода является сумма двух экспонент с разными характерными временами и постоянного слагаемого, соответствующего шуму. Это решение имеет четыре параметра, которые находятся методом максимального правдоподобия из имеющихся экспериментальных данных по затуханию люминесценции ансамбля квантовых точек CsPbBr₃. При использовании метода максимального правдоподобия считается, что вероятность испускания фотона квантовой точкой в определённый малый интервал времени подчиняется мультиномиальному распределению. Выбранный метод позволяет определить погрешности расчёта, которые в данном случае составляют меньше 5 %. Полученные параметры позволяют построить теоретические кривые затухания люминесценции и сопоставить их с люминесценцией ансамбля, наблюдаемой в эксперименте. Расчёт и эксперимент повторены для точек, синтезированных при разных температурах. Во всех случаях теоретические кривые соответствуют экспериментальным данным. Таким образом, люминесценция ансамбля КТ хорошо описывается найденной теоретической зависимостью в виде двух экспонент и постоянного слагаемого. В дальнейшем разработанную модель можно модифицировать для описания лазерной генерации на исследуемом ансамбле КТ.

Список публикаций:

[1] Podshivaylov E. A. et al. A quantitative model of multi-scale single quantum dot blinking // *Journal of Materials Chemistry art. no.* – 2023.