

Исследование возможности создания квантового щёлочно-гелиевого магнитометра на основе применения лазерной оптической накачки

В. П. Азаров

НИИ Системотехники
Санкт-Петербург

А. Е. Шилов

ВНИИМ им. Д.И. Менделеева
Санкт-Петербург
aeshilov48gmail.com

А. И. Синяков

Санкт-Петербургский филиал АСМС
Санкт-Петербург
a.sinyakov@spbasmc.ru

Аннотация. Приводится описание эксперимента, проведённого с целью исследования возможности создания щёлочно-гелиевого магнитометра на основе применения лазерной оптической накачки. Получен сигнал магнитного резонанса от поляризованных метастабильных атомов 4He в рубидиево-гелиевой плазме при оптической поляризации в ней атомов изотопа 87Rb . Полученные результаты требуют проведения дополнительных исследований, направленных на повышение отношения сигнал/шум до уровня достаточного для их практического применения.

Ключевые слова: щёлочно-гелиевый магнитометр; лазерная оптическая накачка; циркулярно поляризованный свет

I. ВВЕДЕНИЕ

Измерение физических величин, характеризующих магнитное поле, проводится во многих важных областях человеческой деятельности. При этом измерения слабых магнитных полей выполняются при фундаментальных исследованиях физических законов и строения материи, в геологии при изучении магнитного поля Земли, Солнца и планет солнечной системы, межпланетного пространства, в геофизике при проведении магнитной разведки для поиска полезных ископаемых и изучения строения Земли, в медицине и биологии, в военном деле, а также при решении различного рода технических и технологических задач.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для измерения слабых постоянных магнитных полей в настоящее время широко применяются квантовые магнитометры, основанные на определении частоты квантового перехода парамагнитных частиц с одного зеемановского подуровня на другой. Частота перехода между выбранными подуровнями определяется по резонансному поглощению электромагнитного излучения.

Магнитный резонанс возникает вследствие избирательного поглощения или излучения электромагнитных волн определённой длины веществом, которое помещено в магнитное поле, и обусловлен взаимодействием с магнитным полем микрочастиц (ядер, электронов, атомов), обладающих магнитным моментом и собственным моментом количества движения. Энергия таких частиц в магнитном поле зависит, как известно, от ориентации их магнитных моментов относительно направления магнитной индукции. В соответствии с законами квантовой механики эта ориентация имеет дискретный характер. Изменение ориентации магнитного момента, а следовательно, и изменение его энергии происходит скачкообразно. Разность энергий до и после скачка равна энергии кванта излучения или поглощения hf , где h – постоянная Планка, f – частота электромагнитных колебаний [1].

Для наблюдения явления резонанса необходимо создать избыточное количество частиц на одном из энергетических уровней, то есть такие условия, при которых число частиц, переходящих с низшего уровня на высший, больше числа частиц, переходящих с высшего уровня на низший, или наоборот. При этом неравновесную населённость можно создать различными способами: наложением сильного внешнего магнитного поля, облучением вещества электромагнитным полем или светом резонансной частоты.

Квантовые магнитометры, в которых для магнитной поляризации вещества используется первый из описанных приёмов, получили название ядерно-прецессионных или протонных. В настоящее время они весьма распространены в практике магнитных измерений. Однако в последние годы протонные магнитометры постепенно вытесняются имеющими гораздо более высокую чувствительность и точность квантовыми магнитометрами с «оптической накачкой». Эти магнитометры постоянно совершенствуются и поиск путей улучшения их

метрологических характеристик не прекращается [2]. Кроме того, исследуются возможности использования излучения лазера для поляризации парамагнитных атомов паров щелочных металлов в атмосфере инертных газов при их различном сочетании и концентрации.

«Оптическая накачка» атомов заключается в создании разности заселённости подуровней основного состояния ансамбля атомов путём облучения их светом определённой длины волны. Обычно для этих целей используется циркулярно поляризованный свет определённой частоты, создаваемый спектральной лампой наполненной парами щелочных металлов (изотопов рубидия, цезия, калия).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе описан эксперимент, в котором поляризация рабочего вещества достигнута путём воздействия на него светового излучения лазера. Получен сигнал магнитного резонанса от поляризованных метастабильных атомов изотопа гелия (^4He) в рубидиево-гелиевой плазме при оптической поляризации в ней атомов изотопа ^{87}Rb . Оптическая поляризация атомов ^{87}Rb проводилась циркулярно поляризованным резонансным светом, излучаемым одномодовым одночастотным полупроводниковым лазером, настроенным на линию изотопа ^{87}Rb . Магниточувствительный преобразователь устанавливался в мере магнитной индукции 1 разряда в виде трёхкомпонентной системы взаимно ортогонально ориентированных катушек (колец Гельмгольца), предназначенных для компенсации внешнего магнитного поля Земли и воспроизведения магнитной индукции заданных значений и направлений [3, 4]. В мере создавалось постоянное магнитное поле с индукцией, модуль которой составлял 50 мкТл. Камера поглощения в виде цилиндра диаметром 40 мм и образующей 40 мм содержала изотоп ^{87}Rb и пары ^4He (ортогелий) при давлении около 0,7 кПа. Резонансный свет, излучаемый лазером, имел ширину спектра 8 МГц и мощность на входе в камеру поглощения не более 1 мВт. Передача светового потока от лазера в магниточувствительный преобразователь осуществлялась посредством многожильного световода (гибкого оптоволоконного

жгута) длиной 2,5 метра и диаметром 6 мм. Камера поглощения термостатировалась на уровне 40 градусов Цельсия. Для создания метастабильных атомов ^4He в камере возбуждался импульсный разряд с частотой следования 1 кГц и длительностью порядка 6 мкс.

Таким образом, реализован щелочно-гелиевый магнитометр (ЩГМ) на смеси ^{87}Rb и ^4He в D1 линии изотопа ^{87}Rb в двух сверхтонких компонентах в переходах из основного состояния $r_{3/2}$. В эксперименте наблюдался сигнал магнитного резонанса, при этом была достигнута чувствительность с отношением сигнал/шум равным 5.

IV. ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о возможности построения схем оптической накачки с помощью лазера и требуют дальнейшего изучения происходящих при этом процессов спин обмена, а также дополнительных длительных исследований направленных на повышение соотношения сигнал-шум до уровня достаточного для их практического использования.

Схема накачки изолированных сверхтонких компонент требует внимательного изучения процессов спин обмена, что выходит за рамки настоящего доклада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. Москва: Наука, 1972. 448 с.
- [2] Precise Definition of γ ^{133}Cs with resolved structure in magnetik fields higher then 0.8Mt. / Shifrin V.Ya., Belyakov D.I., Kosenkov D.D., Shilov A.E. // Magnetic Resonance And Its Applications: Proceedings 16th International School-Conference. Spinus-2019. 2019 Издательство: ООО "Издательство ВВМ". Pp. 252-254.
- [3] Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции / Шифрин В.Я., Хорев В.Н., Калабин В.Н., Воронов С.А., Шилов А.Е. // Измерительная техника. 2012. №7. С. 3-7.
- [4] Развитие эталонной базы в области измерений магнитной индукции и магнитного потока / Беляков Д.И., Хорев В.Н., Шилов А.Е., Шифрин В.Я. // Измерительная техника. 2017. №12. С. 28-31.