

Цезиевый магнитометр с лазерной накачкой

© Авторы, 2013

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2013

В.Л. Величанский*к.ф.-м.н., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН**E-mail: vvlab@yandex.ru***А.Н. Козлов***д.ф.-м.н., ИЗМИ РАН**E-mail: kozlov@izmiran.ru***Е.В. Живун***аспирант, Physics Department UC Berkeley**E-mail: lena.zhivun@berkeley.edu***С.А. Зибров***к.ф.-м.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**E-mail: szibrov@yandex.ru***В.В. Шутов***аспирант, ООО «Энергоцентр»**E-mail: Vitalyshutov@gmail.com***В.В. Васильев***науч. сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН**E-mail: vvv@okb.lpl.troitsk.ru***А.К. Вершовский***д.ф.-м.н., физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург)**E-mail: veršovskii@gmail.com***А.С. Пазгалёв***к.ф.-м.н., Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН**E-mail: pazgalev@ya.ru*

Исследована возможность создания квантового цезиевого Mx самогенерирующего магнитометра с лазерной накачкой. Показано, что замена резонансной газоразрядной лампы на диодный лазер позволяет значительно уменьшить энергопотребление источника оптической накачки. В земном поле проведено исследование характеристик цезиевого спинового генератора при возбуждении на различных сверхтонких компонентах резонансных D₁- и D₂-линий цезия для различных типов ячеек, различных лазеров и поляризации их излучения. Представлены характеристики макета лазерного магнитометра, разработанного на основе проведенных исследований.

Ключевые слова: магнитометр, цезий, диодный лазер с внешним резонатором, лазер, излучающий с поверхности с вертикальным резонатором, оптическая накачка, сверхтонкая структура, шум.

A possibility to develop a quantum cesium selfoscillating Mx-magnetometer with laser pumping has been studied. It is shown that substitution of resonance gas-discharge lamp by diode laser allows for substantially decrease of the pumping-source power consumption. The parameters of cesium spin oscillators having different types of atomic cells are investigated in terrestrial magnetic field by using several types of diode lasers and different polarizations for optical pumping. The parameters of a magnetometer model developed on the basis of the performed experiments are presented.

Keywords: magnetometer, cesium, extended cavity diode laser, vertical cavity surface emitting laser, optical pumping, hyperfine structure, noise.

Введение

Высокоточные измерения индукции магнитного поля (далее – магнитного поля) находят все более широкое применение в фундаментальной физике, например, в экспериментах по поиску постоянного электродипольного момента элементарных частиц, в измерении пространственных вариаций магнитного поля земли для геологоразведки, в медицине, особенно в кардиологии, для поиска мин, неразорвавшихся снарядов и во многих других областях. Среди основных приборов для измерения земных сравни-

тельно слабых и сверхслабых полей от 10⁵ нТл до величин порядка 10 фТл можно выделить сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы), протонные магнитометры и магнитометры с оптической накачкой. Сейчас особенно быстро развиваются последние, что связано с новыми возможностями, обусловленными применением лазеров. Оптической магнитометрии посвящены ранние обзоры [1–3], главы книги [4] и особенно богатый материал (20 обзорных статей) содержится в изданном в 2013 г. сборнике «Оптическая магнитометрия» [5].

В земных условиях есть две методики измерения магнитного поля. В одной из них магнитное поле земли экранируется, что позволяет производить измерения с рекордно высокой чувствительностью [6, 7] (эта методика характерна для фундаментальных исследований [8] и для кардиомагнитометрии [9], особенно фетальной [10]), в другой измерения проводятся в земном поле, имеющем и временные и пространственные вариации. Представляющая интерес величина вариаций, может составлять 10^{-5} – 10^{-7} от значения земного поля. В статье описаны исследования, направленные на создание цезиевого магнитометра с лазерной накачкой для геологоразведки, т.е. для измерения малых пространственных вариаций на фоне земного магнитного поля.

1. Характеристики диодных лазеров

Лазеры, излучающие с краев чипа. Это самые распространенные и производимые в России диодные лазеры (ДЛ). Длина их резонатора, как правило, превышает 400 мкм, а величина интервала между соседними продольными модами – 100 ГГц, что на два порядка меньше ширины линии усиления. Преимущества этих лазеров – доступность и сравнительно малая ширина линии генерации (ШЛГ) в одномодовом по всем четырем индексам режиме генерации (10–30 МГц). Их недостатки – относительно высокие пороговый ток (≥ 20 мА) и энергопотребление (≥ 30 мВт); возможность переключения продольных мод; увеличение шума при приближении к точке такого переключения; высокая чувствительность к паразитной оптической обратной связи [11]. Кроме того, к сожалению, не все лазеры этого типа надежно обеспечивают одномодовость излучения.

Излучающие с краев диодные лазеры с коротким резонатором ($L < 100$ мкм) и повышенными коэффициентами отражения обоих зеркал. Этот тип лазеров описан в [12]. Уменьшение длины резонатора позволило увеличить межмодовый интервал до 1 нм, что все еще было недостаточно для требуемой стабильности одночастотного режима генерации. Технологические проблемы не позволили реализовать более короткие резонаторы.

Излучающие с поверхности лазеры с вертикальным резонатором (Vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs). Длина резонатора этих лазеров настолько мала, что интервал между соседними продольными модами сопоставим с шириной линии усиления. Поэтому переключения продольных

мод в лазерах в этого типа исключены [13] и перестройка частоты температурой активной области во всем допустимом диапазоне происходит непрерывно. Частота генерации этого лазера определяется только током накачки и температурой активной области, что значительно упрощает алгоритм управления лазером. В первое десятилетие после появления коммерчески доступных лазеров симметрия активной области приводила к неконтролируемым переключениям поляризации. Однако к настоящему времени и этот тип переключений подавлен. Возбуждение поперечных мод, которое приводит к ухудшению диаграммы направленности и увеличению шумов, устранено уменьшением диаметра излучающей области и предельной мощности. Как правило, мощность не превышает 0,5 – 1 мВт. Но для одноканального магнитометра с одной ячейкой даже этот уровень мощности избыточен. Чтобы избежать полевого уширения, мощность на входе в цезиевую ячейку с характерными размерами 20 мм (и диаметр, и длина) не должна заметно превышать 50 мкВт. Дополнительные преимущества ДЛ VCSEL – симметрия диаграммы направленности и высокая эффективность частотной модуляции в диапазоне частот выше 5 ГГц. Существенным недостатком большинства коммерческих ДЛ этого типа является высокий уровень фазовых шумов и, как следствие, большая ШЛГ (50 – 100 МГц). Фазовые шумы при прохождении ячейки с атомами щелочного металла преобразуются в амплитудные, что уменьшает отношение сигнала к шуму и приводит к уменьшению чувствительности магнитометра. Обратной стороной малого объема активной области и энергопотребления ДЛ VCSEL является большое значение коэффициента преобразования тока лазера в частоту (~ 300 ГГц/мА), что предъявляет очень высокие требования к подавлению наводок в ток лазера. Тем не менее, данный тип лазера является лучшим для применения в магнитометре, который должен работать в полевых условиях. К сожалению, этот тип лазеров до сих пор не производится в России, и не все их виды, производимые в Европе и США, коммерчески доступны.

Лазеры с распределенной обратной связью и лазеры с брэгговскими зеркалами. Отличительной чертой этого типа лазеров является наличие спектрально-селективного элемента, встроенного непосредственно в чип лазера. Наличие селективного элемента в сочетании с большим межмодовым интервалом обеспечивает надежность одночастотного режима генерации. Энергопотребление

может превышать 100 мВт, однако и мощность генерации может достигать 50 мВт. Такой лазер идеально подходит для многоканальных магнитометров, применяемых, например для снятия пространственно-временной динамики магнитного поля сердца. В этом случае над грудной клеткой пациента размещается матрица из нескольких десятков ячеек датчиков. К каждой из них с помощью волоконно-оптического разветвителя подводится излучение лазера мощностью порядка 50 мкВт. Мощность данного типа лазеров достаточна для обеспечения работы многоэлементного магнитометра и картирования динамики магнитного поля сердца [14].

Диодные лазеры с внешним резонатором (ДЛВР). В этом случае резонатор лазера состоит из двух частей. Одна из них представляет собой активный усиливающий свет волновод, расположенный в полупроводниковом кристалле, вторая – внешняя пассивная часть, содержащая селективный элемент, чаще всего дифракционная решетка. Полоса селекции составляет ~ 100 ГГц, что позволяет надежно выделять одну из продольных мод собственного резонатора. Проявление этих мод может быть ослаблено благодаря просветляющему покрытию, нанесенному на выходную грань (зеркало) кристалла. При оптической длине составного резонатора $L \sim 3$ см интервал между соседними продольными модами равен 5 ГГц, так что в полосе селекции попадают десятки продольных мод, но основная конкуренция происходит между несколькими, близкими к центру полосы селекции. В результате вариации температуры окружающей среды могут и для внешнего резонатора приводить к нежелательным переключениям мод. Ранняя модификация такого типа лазера была применена в первом лазерном магнитометре на атомах щелочных металлов [15]. В данной работе использовались лазеры, созданные в ФИАНе [16], с повышенной стабильностью режима, частоты генерации и увеличенной областью непрерывной перестройки частоты. Оптимизация конструкции лазера и применение двойной термостабилизации позволили существенно увеличить срок работы лазера без переключения продольных мод. В лабораторных условиях время работы на нужной длине волны, в частности, на длине волны резонансных линий калия, рубидия или цезия без повторной юстировки лазера может составлять несколько недель. К преимуществам лазера этого типа можно отнести малую ШЛГ (< 1 МГц) при сравнительно большой

области непрерывной перестройки (до 30 ГГц при согласованном изменении угла падения излучения на решетку и длины резонатора) и близости уровня шумов к дробовому [17, 18]. Недостатком является высокая чувствительность к механическим возмущениям, что практически исключает их использование в магнитометрах, предназначенных для работы в полевых условиях или в системах космического базирования. Однако лабораторные исследования характеристик магнитного резонанса (МР) для различных сверхтонких компонент резонансных линий цезия, различных ячеек, различной мощности и поляризации лазерного излучения проводились именно с помощью лазеров с внешним резонатором.

2. Выбор щелочного металла и рабочей схемы магнитометра

Сопоставление характеристик ^{39}K , ^{87}Rb и ^{133}Cs . Наибольшее распространение в оптической магнитометрии получили приборы на атомах калия, рубидия, цезия и гелия. В отличие от атомов щелочных металлов рабочий уровень ^4He является возбужденным. Необходимость возбуждения атомов в ячейке ВЧ разрядом, отсутствующая в магнитометрах на атомах щелочных металлов, приводит к ряду отличий, и магнитометр на ^4He здесь не рассматривается. Отметим только, что на ^4He была впервые испытана лазерная накачка [19] и создан пока единственный коммерчески доступный магнитометр с лазерной накачкой на длине волны 1,083 мкм [20]. Основное назначение гелиевых магнитометров – аэросъемка аномалий магнитного поля для геологоразведки и военных применений. Пешеходные гелиевые магнитометры пока не созданы.

Параметры, определяющие специфику магнитометрических применений K, Rb и Cs, а именно, температура, обеспечивающая требуемые давление насыщенных паров и поглощение в ячейке, и коэффициенты, определяющие линейный ($\Gamma^{1/2}$) и квадратичный (G) вклады в зеемановский сдвиг, приведены в табл. 1 вместе с величиной сверхтонкого (СТ) расщепления основного состояния ($\Delta\nu_0$). Из-за наименьшей требуемой температуры цезий имеет минимальное энергопотребление нагревателя ячейки. Для ячеек калия требуется максимальная рабочая температура (при одинаковых размерах ячеек). С другой стороны, из табл. 1 видно, что ^{133}Cs обладает наименьшим квадратичным по полю сдвигом уровнем, что для измерений в земном магнитном поле является недостатком. В поле

Таблица 1. Рабочие температуры, параметры, определяющие зеемановское расщепление, и интервал между СТ подуровнями основного состояния ^{39}K , ^{87}Rb и ^{133}Cs

Атом	t °C, при P (Торр)		Γ' , Гц/Гс	Γ , Гц/Гс	G , Гц/Гс ²	$\Delta\nu_0$, МГц
	10^{-6}	$4 \cdot 10^{-6}$				
^{39}K	60	76	700391	700788	1065	461,72
^{87}Rb	37	53	699605	702399	71,8	6834,68
^{133}Cs	23	37	349731	350854	13,3	9192,63

земли (порядка 50 мкТл) линии, соответствующие переходам между различными магнитными подуровнями сливаются, что приводит к большей суммарной ширине, чем у каждой отдельной линии. Зеемановские расщепления подуровней основного состояния $F_g = 3,4$ в магнитном поле земли [4]: $f_4 = \Gamma_4 B - (2m_4 - 1) GB^2$; $f_3 = \Gamma_3 B + (2m_3 - 1) GB^2$, где Γ_3 и Γ_4 – коэффициенты в линейных по полю членах; G – в квадратичном. В магнитном поле в павильоне сверок ИЗМИРАН (52,1 мТл) разность линейных членов для СТ подуровней $B(\Gamma_4 - \Gamma_3) = 585$ Гц, а относительные смещения соседних линий МР из-за квадратичного вклада составляют 7,2 Гц. При этом состояние с $F_g=3$ имеет 7 зеемановских подуровней, что дает шесть МР с интервалом между крайними линиями 36 Гц. Для состояния $F_g=4$ наблюдается восемь линий МР и интервал между крайними $\approx 50,5$ Гц. В коммерческих магнитометрах обычно генерация идет на переходах состояния $F_g=4$, структура линии не разрешается и ее ширина в земном поле не может быть меньше 50 Гц.

Из-за перераспределения населенностей по магнитным подуровням основного состояния, разных коэффициентов Клебша–Гордана восемь магнитных резонансов имеют различную монотонно возрастающую с ростом $|m|$ амплитуду, что приводит к асимметрии суммарного контура МР. При изменении угла между оптической осью датчика и измеряемым магнитным полем из-за перераспределения населенностей вершина линии смещается, что приводит к ориентационной ошибке. Для Rb в земном поле ~ 50 мкТл расстояние между соседними линиями МР из-за большего чем у Cs коэффициента G составляет 35 Гц, и устранить их можно только, сужая линию и применяя ячейки большего размера, что затрудняет возможность их применения в пешеходных M_x -магнитометрах. Наибольшим коэффициентом в квадратичном члене обладает калий. Это позволяет работать на уединенной узкой линии МР и значительно улучшает основные метрологические характеристики калиевого M_x -магнитометра по сравнению с це-

зиевым [21]. Основным препятствием для применения калия в пешеходных магнитометрах является высокая температура ячейки и, как следствие, большие энергопотребление и вес.

Сравнительно большая ширина линии магнитного резонанса в атомах ^{133}Cs в магнитном поле Земли и ее асимметрия ограничивают точность цезиевого магнитометра. Тем не менее, из-за простоты технической реализации, в частности, из-за того, что температура ячейки, обеспечивающая требуемое давление паров цезия ниже, чем у калия или рубидия, переносные M_x магнитометры на ^{133}Cs получили наибольшее распространение. По этой же причине для переносного магнитометра с лазерной накачкой в качестве рабочего вещества был выбран цезий.

Выбор схемы магнитометра. Работа магнитометров на атомах щелочных металлов основана на эффекте двойного радиооптического резонанса. Поляризованное оптическое излучение, действуя на ансамбль атомов на резонансной линии поглощения, приводит к перераспределению атомов по магнитным подуровням, что меняет поглощение. При воздействии магнитным полем на частоте ларморовской прецессии, приложенным перпендикулярно измеряемому полю, распределение атомов меняется в сторону равновесного и поглощение на оптической частоте меняется. Зависимость квазистационарного пропускания света от частоты радиополя и формирует магнитный резонанс. Такой вариант регистрации применяется в M_z -магнитометрах. Другой способ регистрации основан на том, что интенсивность дополнительного излучения, распространяющегося перпендикулярно накачиваемому излучению, при наложении резонансного поля модулируется на частоте ларморовской прецессии (M_x -схема). В [21] детально сопоставлены преимущества и недостатки M_z - и M_x -схем, причем для последней схемы рассмотрены варианты самогенерирующих магнитометров и магнитометров с независимым РЧ-генератором.

В данной работе предпочтение отдано самогенерирующей схеме M_x -магнитометра, поскольку

в геологоразведке накоплен большой опыт работы именно с такими магнитометрами. Главная часть разрабатываемого M_x -магнитометра состоит из генератора сигнала на ларморовской частоте («спиновое генератора») и частотомера. Радиочастотный генератор представляет собой усилитель, работающий в полосе 50 – 500 кГц, охваченный цепью положительной обратной связи с узкополосным резонансным фильтром. Эта цепь включает в себя фазовращатель, радиочастотные катушки, ячейку с атомами, источник резонансного оптического излучения (лазер или лампа) и фотодиод. Собственно резонансным фильтром является ячейка с атомами. Его центральная частота определяется частотой ларморовской прецессии спиновых моментов атомов, а ширина – шириной магнитного резонанса (МР).

Принцип работы самогенерирующего M_x -магнитометра [22] на классическом языке можно описать следующим образом [23]. Циркулярно поляризованное резонансное излучение лазера или лампы, распространяясь вдоль измеряемого магнитного поля, приводит к ориентации магнитных моментов атомов вдоль поля. В этом направлении ансамбль атомов приобретает макроскопическую намагниченность. При этом магнитный момент каждого атома имеет и поперечную компоненту, которая вращается вокруг поля с ларморовской частотой. Полные моменты атомов прецессируют вокруг поля с одинаковой частотой, но разными фазами. Из-за разброса по фазам ансамбль атомов не имеет макроскопической поперечной намагниченности. Однако при наложении переменного на ларморовской частоте магнитного поля перпендикулярно постоянному вращение поперечных компонент атомов синхронизируется и возникает осциллирующая поперечная намагниченность всего ансамбля. Если направить второй пучок света той же поляризации от того же источника перпендикулярно постоянному магнитному полю, то интенсивность его излучения модулируется на ларморовской частоте, и фотоприемник (рис. 1, а) регистрирует переменный сигнал. Полученный сигнал после усилителя и фазовращателя поступает на радиочастотные (РЧ) катушки, замыкая петлю обратной связи. В начальный момент при включении света РЧ-поля нет, на катушки поступает только шум усилителя, полоса которого охватывает все возможные в магнитном поле Земли ларморовские частоты. В шумовом токе на катушках есть фурье-компонента на ларморовской частоте. Она создает

слабое РЧ-магнитное поле, которое приводит к возникновению слабой осциллирующей поперечной намагниченности ансамбля атомов, глубина модуляции света нарастает, соответствующий сигнал фотоприемника усиливается и т.д. При правильно подобранных усилении и фазовом сдвиге генератор возбуждается и выдает сигнал на ларморовской частоте. Часть сигнала описанного спиновое генератора направляется на частотомер, и по измеренной частоте определяется магнитное поле. На практике чаще используют систему с одним пучком света, направленным под углом к магнитному полю. Этот пучок выполняет обе функции: создание макроскопической намагниченности ансамбля, и детектирование сигнала модуляции пропускания ячейки (рис. 1, б).

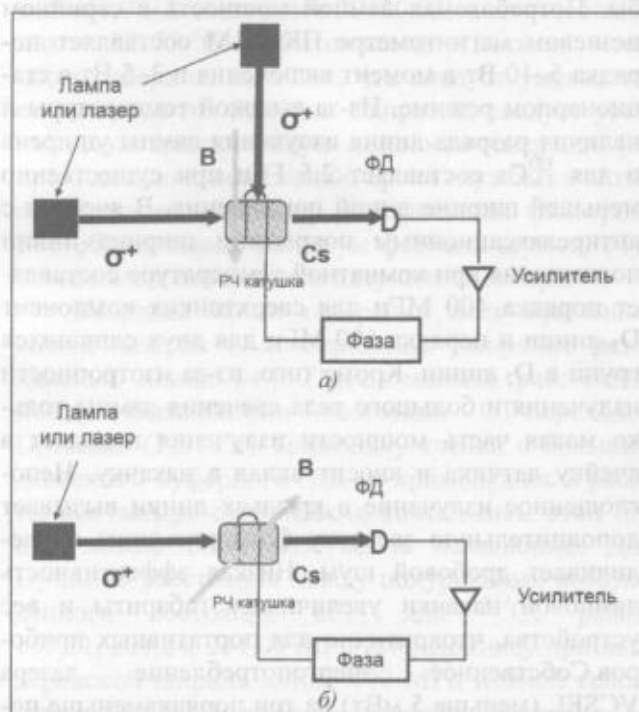


Рис. 1. Схема M_x магнитометра: а – двухлучевая (вертикальный луч поляризует атомы; горизонтальный луч детектирует модуляцию поляризации на ларморовской частоте); б – однолучевая

Сравнение цезиевых магнитометров с лазерной и ламповой накачкой было проведено в лабораторных условиях [15, 24, 25]. В этих работах было установлено, что лазерная накачка имеет незначительные преимущества по чувствительности при одинаковых схемах прибора. Было найдено, что для магнитометра с лазерной накачкой основной вклад в шум вносят технические шумы лазера, а не дробовой шум фотонов. Отметим, что для магнитометра на ^4He переход к лазерной накачке

позволил сразу увеличить сигнал в 45 раз [26] из-за того, что при ламповой накачке две оптические компоненты D_1 и D_2 из трех ($D_{0,1,2}$) линий гелия генерируют сигнал противоположной полярности и эффективность ламповой накачки очень мала. Ламповая накачка в щелочных металлах свободна от этого недостатка.

Цель работы – исследование возможности создания ^{133}Cs магнитометра с лазерной накачкой для измерения земного магнитного поля, с сохранением простоты и надежности его конструкции без перехода к сложным вариантам, позволяющим увеличивать его чувствительность. Замена лампового источника накачки на лазерный позволяет снизить энергопотребление прибора, уменьшить его габариты, и увеличить срок службы. Потребляемая лампой мощность в серийном цезиевом магнитометре ПКМ-1М составляет порядка 5–10 Вт в момент включения и 3–5 Вт в стационарном режиме. Из-за высокой температуры и наличия разряда линия излучения лампы уширена и для ^{133}Cs составляет 2,5 ГГц при существенно меньшей ширине линий поглощения. В ячейках с антирелаксационным покрытием ширина линии поглощения при комнатной температуре составляет порядка 400 МГц для сверхтонких компонент D_1 линии и порядка 600 МГц для двух слившихся групп в D_2 линии. Кроме того, из-за изотропности излучения и большого тела свечения лампы только малая часть мощности излучения попадает в ячейку датчика и вносит вклад в накачку. Непоглощенное излучение в крыльях линии вызывает дополнительную засветку фотоприемника и увеличивает дробовой шум. Низкая эффективность ламповой накачки увеличивает габариты и вес устройства, что критично для портативных приборов. Собственное энергопотребление лазера VCSEL (меньше 5 мВт) на три порядка меньше потребления лампы, а с электроникой, обеспечивающей стабилизацию тока накачки, температуры и частоты генерации лазера, по крайней мере, на порядок. Полная ширина линии излучения этого лазера (≈ 100 МГц) меньше ширины линии поглощения ^{133}Cs . По этой причине излучение лазера поглощается гораздо эффективнее, чем излучение лампы, и та же амплитуда сигнала может быть достигнута при меньшей мощности излучения. Использование лазера в качестве источника накачки ставит дополнительные задачи. Длины волн излучения газоразрядной лампы и поглощения ячейки практически совпадают, поэтому для такого источника накачки требуется только обеспечение

температурного режима лампы. Излучаемая лазером длина волны сильно зависит от его температуры и тока, и может меняться в пределах 1000 ГГц, поэтому лазер нуждается в настройке частоты излучения на линию поглощения атомов щелочного металла и в её стабилизации.

3. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на установке, собранной в «павильоне сверок» ИЗМИРАН. Конструкция этого здания позволяет работать в невозмущенном земном магнитном поле 52,1 мкТл (за исключением переменных сетевых наводок). Установка позволяет измерять параметры и форму линии магнитного резонанса в режимах воздействия широкополосного шумового радиочастотного поля, а также в режиме воздействия монохроматичным РЧ-полем. При этом не имеет значения тип источника оптической накачки – лампа, или лазер.

Оптическая схема установки приведена на рис. 2. Она позволяет производить накачку атомов в ячейке магнитометрического датчика излучением лазеров, настроенных на D_1 или D_2 линию ^{133}Cs по отдельности либо одновременно. Возможна накачка лампой или лазером VCSEL. В установке используется датчик, в котором свет подводится к ячейке многожильным световодом. Далее свет проходит циркулярный поляризатор, входную линзу, ячейку поглощения, выходную линзу и попадает на кремниевый фотоприемник. В случае ламповой накачки перед циркулярным поляризатором мог

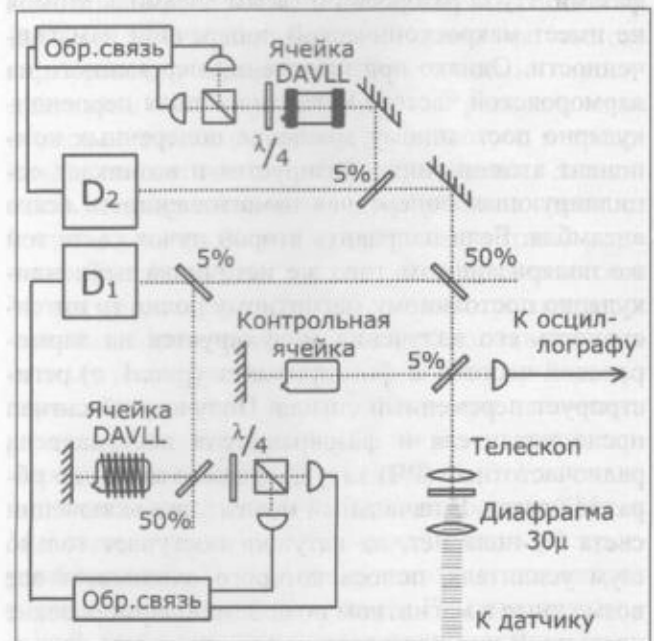


Рис. 2. Оптическая часть установки

устанавливается интерференционный фильтр на линии D_1 или D_2 . Сигнал с выхода фотоприемника поступает в широкополосный усилитель и далее к измерительным устройствам. Оптическая ось датчика располагается примерно под углом 45° к направлению вектора магнитной индукции в плоскости магнитного меридиана.

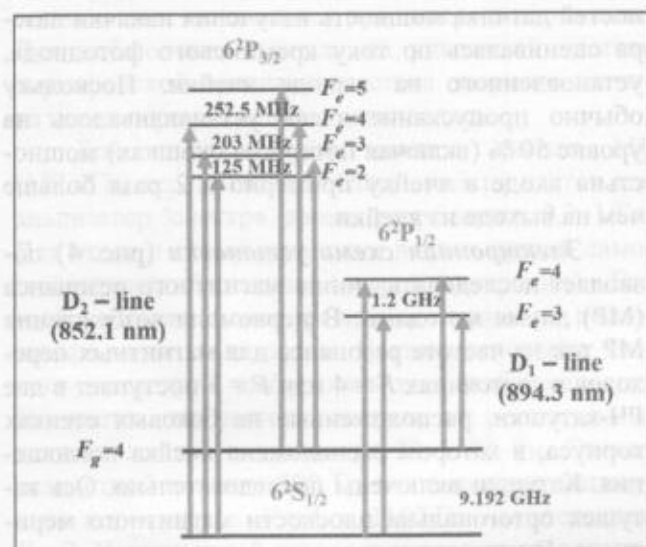


Рис. 3. Разрешенные сверхтонкие переходы резонансных линий цезия

Для исследования эффективности лазерной накачки на десяти сверхтонких переходах резонансных D_1 - и D_2 -линий (рис. 3) использовались два ДЛВР [16], работавшие на длинах волн резонансных линий D_1 (894 нм) и D_2 (852 нм). Далее для краткости эти лазеры называются D_1 - или D_2 -лазерами. Максимальная мощность D_1 -лазера составляла 2 мВт, а D_2 -лазера – 8,5 мВт. Поворот дифракционной решетки обеспечивал перестройку в пределах ± 2 нм практически без потерь мощности. Оба лазера при изменении длины резонатора пьезокерамикой непрерывно перестраивались в диапазоне 5 ГГц, а при дополнительном согласованном изменении тока диапазон возрастал до 30 ГГц. Это обеспечивало настройку на компоненты линий, начинающихся с подуровней основного состояния $F_g=3$ и $F_g=4$, разделенных интервалом 9,2 ГГц. Ширина линии генерации в рабочих режимах обоих лазеров меньше 1 МГц, поляризация линейная, поперечное сечение пучка после объектива – эллиптическое с размерами порядка $5 \times 1,5$ мм². С целью применения в макете магнитометра для геологоразведки испытывались также коммерческие лазеры VCSEL (ULM852), в корпусе которых размещены элемент Пельтье и датчик

температуры теплоотвода. Характеристики лазеров этого типа: ШЛГ при токе 1,5 мА ≈ 100 МГц; пороговый ток $I_{th}=0,5$ мА. Крутизна η ватт-амперной характеристики $P = \eta(I - I_{th})$ равна 0,3 мВт/мА. Перестроечные коэффициенты по температуре и току равны -24 ГГц/К и -240 ГГц/мА. Варьируя одновременно ток накачки и температуру теплоотвода с соотношением приращений -10 К/мА можно менять ток и мощность генерации, не изменяя температуру активной области, частоту и настройку на линию. Вариация температуры теплоотвода в пределах 290 – 310 К позволяет менять мощность в пределах от 0 до 0,6 мВт. Измерения, проведенные на одиннадцати лазерах, показали, что интервал температур, обеспечивающих настройку на линию при одинаковом токе накачки 1,0 мА составляет 30–50 °С, а для шести из них – 32–35 °С. Избыточная для накачки мощность лазера не означает, что следует уменьшать ее, понижая ток накачки. Напротив, следует устанавливать максимальную мощность генерации (не приводящую к понижению срока службы) и затем ослаблять ее, например, нейтральным фильтром. Это обеспечивает минимум фазовых шумов, обусловленных спонтанным излучением лазера.

Ширины линий генерации всех применявшихся лазеров и доплеровское уширение резонансных линий (≈ 400 МГц) меньше расстояния между ближайшими частотами СТ-переходов D_1 -линии (1,2 ГГц). Поскольку ячейки с большим давлением буферного газа не применялись в работе, все четыре сверхтонких компонента этой линии можно было возбуждать независимо. Для D_2 -линии расстояния между подуровнями возбужденного состояния $6P_{3/2}$ для ^{133}Cs равны 150,21, 201,24, 251,00 МГц [27]. Поэтому при доплеровской ширине линии 400 МГц полной селективности возбуждения сверхтонких переходов D_2 -линии ^{133}Cs достичь нельзя.

Каждый из лазеров имел систему стабилизации частоты, основанную на дихроизме атомов в постоянном магнитном поле (Dichroic Atomic Vapor Laser Lock, DAVLL) [28]. Для системы стабилизации лазера, настроенного на D_2 -линию, магнитное поле создавалось постоянным магнитом. Оптимальное поле в этом случае согласно [28] составляет порядка 200 Гс. Поскольку интервалы между подуровнями $6P_{3/2}$ меньше доплеровской ширины линии, а расщепление основного состояния $6S_{1/2}$, напротив, больше, шесть разрешенных дипольных переходов в D_2 -линии образуют два

суммарных контура. Один из них формируется при переходах $F_g=3 \rightarrow F_e=2,3,4$, второй, низкочастотный, при переходах $F_g=4 \rightarrow F_e=3,4,5$. Выбранная система стабилизации позволяет плавно перестраивать стабилизированную частоту лазера в пределах двух компонент D_2 -линии. Частота генерации D_2 -лазера определялась по внутريدоплеровским резонансам, регистрируемым с помощью контрольной ячейки (рис. 2).

Для D_1 -линии все четыре компонента разрешаются и нет необходимости перестройки по контурам этих линий, оптимальна настройка на их вершины. Поэтому частота D_1 -лазера стабилизировалась по внутريدоплеровскому варианту DAVLL. Магнитное поле в этом случае имеет на порядок меньшую величину, и оно создавалось соленоидом.

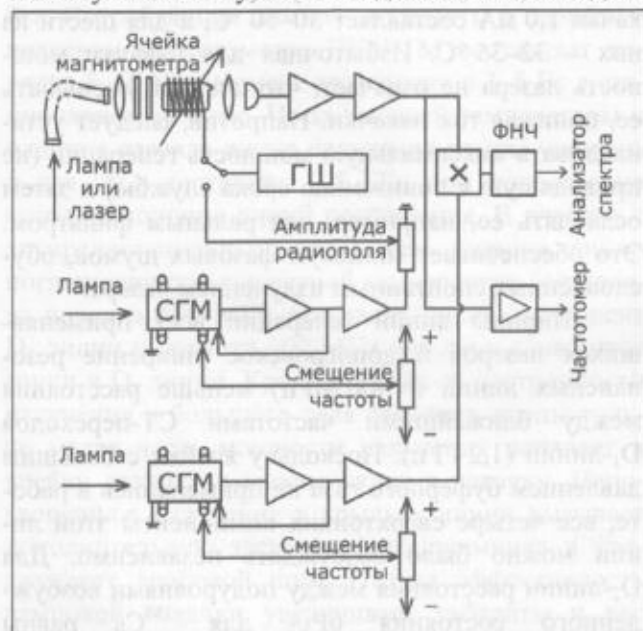


Рис. 4. Схема установки

В экспериментах с двухлазерной накачкой излучение двух лазеров смешивалось на полупрозрачном зеркале, фильтровалось в телескопе диафрагмой 30μ , установленной в перетяжке в общей фокальной плоскости линз телескопа, и направлялось в многожильный волоконный световод, ведущий к датчику. В силу конструктивных особенностей датчика мощность излучения накачки лазера оценивалась по току кремниевого фотодиода, установленного на выходе ячейки. Поскольку обычно пропускание ячеек устанавливалось на уровне 50 % (включая потери на окошках) мощность на входе в ячейку примерно в 2 раза больше чем на выходе из ячейки.

Электронная схема установки (рис. 4) позволяет исследовать линию магнитного резонанса (МР) двумя методами. В первом для возбуждения МР ток на частоте резонанса для магнитных переходов в состояниях $F=4$ или $F=3$ поступает в две РЧ-катушки, расположенные на боковых стенках корпуса, в котором расположена ячейка поглощения. Катушки включены последовательно. Ось катушек ортогональна плоскости магнитного меридиана. В качестве генератора резонансного радиополя выступает вспомогательный датчик автоколебательного типа с ламповой оптической накачкой (гетеродин). Сигнал с выхода этого спинового генератора через делитель напряжения поступает в РЧ-катушки установки. Изменение частоты генерации производится наложением постоянного поля на датчик гетеродина. Для этого на датчик нанесена дополнительная обмотка, ось которой совпадает с направлением оптической оси датчика. Подача тока в эту обмотку позволяет изменять частоту гетеродина на 2000 Гц и перекрывать резонансы на обоих СТ подуровнях основного состояния. Такая

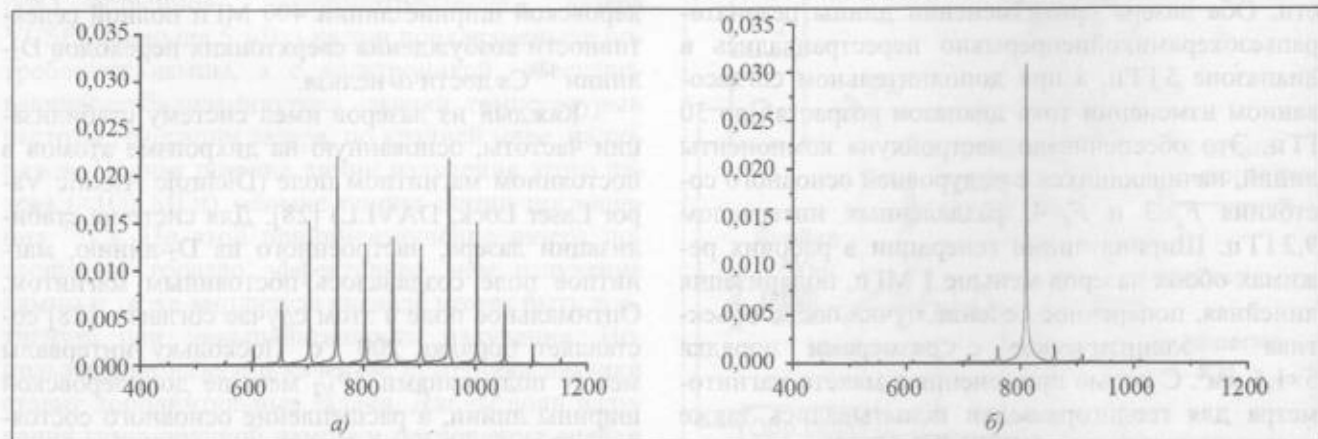


Рис. 5. Графическое представление сигнала, полученного с внешним независимым генератором в качестве гетеродина (а) и сигнала, полученного со вторым спиновым генератором в качестве гетеродина (б)

следящая схема гетеродина позволяет существенно ослабить влияние сетевых магнитных помех, уровень которых в месте измерения может превышать 100 – 200 нТ. Пример подавления сетевых помех приведен на рис. 5. Из-за близкого расположения датчиков флуктуации их частот, связанные с электросетью и вариациями магнитного поля Земли, одинаковы и вычитаются при гетеродинировании. Для наблюдения сигнала на удвоенной частоте ларморовской прецессии частота опорного датчика перед перемножением удваивалась.

Для спектрального анализа сигнал МР (182 кГц) переносился в область низких частот, где анализатор спектра имеет разрешение 0,3–1 Гц. Для этого в схему установки введен другой самогенерирующий датчик (второй гетеродин). Его частота также меняется вспомогательным постоянным магнитным полем. Частота генерации второго гетеродина выбиралась так, чтобы разность его частоты и частоты сигнала от исследуемого датчика лежала в диапазоне 20–1500 Гц. Сигнал разностной частоты 500 Гц соответствует магнитным переходам в $F=4$ и 1100 Гц – в состоянии $F=3$. Исследуемый сигнал и сигнал от второго гетеродина подавался на входы смесителя, а сигнал разностной частоты с его выхода через фильтр нижних частот поступал на вход аудиокарты компьютера (с полосой 20 Гц–20 кГц). Аудиокarta является цифровым 16-разрядным преобразователем аналогового сигнала в цифровой для программы спектрального анализа.

Другой способ анализа формы линии МР [29] состоит в том, что вместо монохроматического радиочастотного поля в РЧ катушку исследуемого датчика подается напряжение от генератора шума, спектр которого (30–800 кГц) перекрывает линию МР. Генератор псевдошумового напряжения выполнен на базе цифровой техники и при тактовой частоте 1 МГц имеет период повторения псевдослучайной последовательности более одного часа, что удовлетворяет условиям эксперимента. В этом случае сигнал исследуемого датчика выглядит как последовательность цугов, содержащих осцилляции на частоте ларморовской прецессии. Исследуемый датчик выступает в роли узкополосного фильтра, АЧХ которого представляет собой линию МР. Фурье-представление выходного сигнала позволяет получить всю кривую МР, не производя сканирования. Спектр сигнала датчика регистрируется с помощью звуковой карты ЭВМ. Программное обеспечение выполняет накопление, обработку

и запись спектров. Средой его разработки и исполнения является LABVIEW. Возбуждение шумовым РЧ-полем, в отличие от возбуждения узкой линией-упрощает измерения, поскольку отпадает необходимость сканирования поля и переключения генерации опорного датчика между состояниями $F_g=4$ и $F_g=3$, чтобы возбуждаемая линия попала в его диапазон перестройки. Разность ларморовских частот (и соответствующих частот самогенерации магнитометра) в состояниях $F=3$ (f_3) и $F=4$ (f_4) в магнитном поле 52,1 мкТл составляет $f_3 - f_4 \approx 600$ Гц. Кроме того, шумовое поле взаимодействует с системой магнитных моментов сразу на всех частотах, вызывая перераспределение населенностей на двух подуровнях основного состояния. В некоторых случаях этот способ позволяет одновременно наблюдать сигнал в состояниях $F=3$ и $F=4$, что невозможно в первом методе.

4. Результаты исследований

Варианты лазерной накачки. При ламповой накачке излучение на резонансных D_1 и D_2 линиях полихроматично и содержит все 10 сверхтонких компонент. Единственная степень свободы в выборе этих компонент – возможность отсекающей одной из двух линий с помощью интерференционного фильтра. Этот прием важен при оптической накачке ячеек с буферным газом, когда из-за столкновений в возбужденном состоянии происходит перемешивание по магнитным подуровням, и результаты накачки для D_1 - и D_2 -линий противоположны. При накачке излучением одномодового лазера и при не слишком высоком давлении буферного газа для D_1 -линии есть четыре варианта накачки. Для D_2 -линии можно говорить о шести частотах СТ-переходов, но поскольку СТ-расщепления уровня $6P_{3/2}$ меньше доплеровской ширины, в оптической накачке участвуют одновременно либо переходы $F_g=3 \rightarrow F_c=2,3,4$ либо $F_g=4 \rightarrow F_c=3,4,5$ (рис. 3). Относительный вклад этих переходов зависит от настройки частоты лазера, причем в чистом виде выделить вклад одного из них нельзя, даже для ячейки с покрытием. Отметим, что для длинноволновой компоненты D_2 -линии переходы $F_g=4 \rightarrow F_c=5$ и $F_g=4 \rightarrow F_c=3,4$, при накачке циркулярно поляризованным излучением дают противоположный по знаку M_x -сигнал. При накачке узкой линией ДЛВР существует частота внутри суммарного контура, на которой M_x -сигнал равен нулю.

Характеристики резонансных ячеек. Использовались цилиндрические ячейки с парами це-

зия. Среди них пять имели антирелаксационное покрытие и размеры (здесь и далее первая цифра – диаметр, вторая – длина в миллиметрах) 20×20; 25×25; 40×50; 40×70; 50×70; восемь ячеек размером 50×50 с буферным газом азотом и давлениями 0,5; 1; 4; 8; 12; 25; 50; 52 Торр, три ячейки размером 50×50 с буферным газом неонмпридавлениях 1; 4; 10 Торр. Характеристики всех перечисленных ячеек регистрировались описанным шумовым методом.

На рис. 6 для примера приведена линия магнитного резонанса для ячейки 40×50 с покрытием, прописанная шумовым РЧ-полем при накачке D₁-лазером на переходе $F_g=4 \rightarrow F_e=3$. Кроме регистрации контура линии и оценки ее ширины по уровню 0,5, измерялось эффективное напряжение на выходе широкополосного усилителя, используемого в M_x-магнитометре. Это напряжение определяет эффективность преобразования резонансного радиочастотного поля в модуляцию оптического излучения. В табл. 2 и 3 оно именуется «сигналом». Кроме сигнала в таблицах даны размеры ячеек, давление буферного газа, ширина МР, уровень фототока. В последнем столбце приведено отношение сигнала к ширине. Все измерения для табл. 2 и 3 проводились при одинаковых температуре и мощности шумового радиополя.

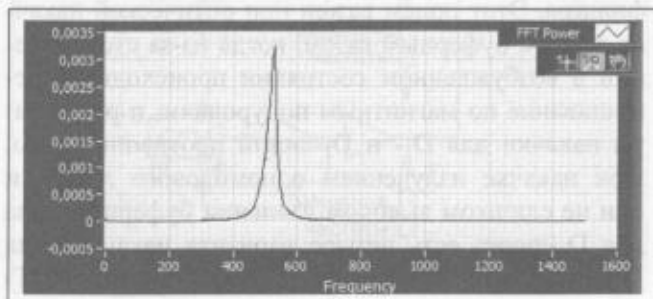


Рис. 6. Линия магнитного резонанса на ячейке с покрытием, 40×50, зарегистрированная шумовым методом. Шкала частот смещена гетеродином на ~ 180 кГц

Таблица 2. Характеристики ячеек с покрытием

Размер ячейки, мм×мм	Мощность лазера, мкВт	Сигнал, мBS	FWHM $P_{ow} \Delta f$	$S/\Delta f$
20 × 20	18	17	46	0,37
20 × 20	18	18	34	0,53
40 × 50	35	160	29	5,5
40 × 50	35	90	34	2,65
40 × 50	35	180	32	5,6
40 × 70	35	210	21	10
50 × 70	35	100	40	2,5

Таблица 3. Характеристики ячеек с буферным газом (все ячейки имеют одинаковые длину и диаметр (50 мм))

Давление, Торр	Мощность лазера, мкВт	Сигнал, мBS	FWHM, Δf	$S/\Delta f$
0,5	35	4	143	0,028
1	35	15	70	0,21
4	35	11	48	0,23
8	35	38	47	0,8
12	35	34	54	0,63
25	40	31	44	0,7
52	45	30	42	0,71

Сопоставление результатов показывает следующее: 1) несмотря на то, что разброс отношения $S/\Delta f$ для трех одинаковых по размеру ячеек (40×50) с покрытием и близких 40×70 и 50×70 достаточно велик (от 2,5 до 10), он на порядок лучше, чем для ячеек с буферным газом); 2) малость сигнала в ячейках 20×20 обусловлена меньшей оптической плотностью. При повышении температуры отношение $S/\Delta f$ в этих ячейках становится близким к двум; 3) с ростом давления азота (табл. 3), параметр $S/\Delta f$ быстро достигает оптимума при 8 Торр, а затем в диапазоне 8 – 52 Торр слабо спадает. Таким образом, как и при ламповой накачке, параметры ячеек с покрытием превосходят параметры ячеек с буферным газом. Для макета были выбраны ячейки размером 20×20, поскольку энергопотребление на их разогрев заметно меньше, чем для больших (40×50). Ячейки размером 20×20 использовались и в ламповом магнитометре-прототипе ПКМ 1-М.

Накачка циркулярно поляризованным излучением одного ДЛВР. Для D₂-линии оптимальный режим соответствовал близости частоты лазера к переходу $F_g=3 \rightarrow F_e=2$ для коротковолновой линии, являющейся наложением компонент $F_g=3 \rightarrow F_e=2,3,4$ и переходу $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ для длинноволновой линии (переходы $F_g=4 \rightarrow F_e=3,4,5$). При возбуждении излучением лазера VCSEL, имеющим существенно более широкую линию, влияние его настройки на различные части суммарного контура, сказывалось значительно меньше. В частности, генерация датчика обеспечивалась и при настройке на вершину длинноволновой компоненты D₂-линии, где доминирует переход $F_g=4 \rightarrow F_e=5$.

В случае D₁-линии возбуждение самогенерирующего датчика было получено при лазерной накачке на переходе $F_g=4 \rightarrow F_e=3$. Генерация на-

блюдалась на частоте f_4 как для лампы, так и для лазера с внешним резонатором при настройке его на указанный переход. Для сравнения эффективностей лазерной и ламповой накачек сопоставлялись мощности накачки в обоих случаях при одинаковой амплитуде генерации (за исключением перехода $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ в D_2 -линии, где сигнал не достигал этого уровня) (табл. 4). Амплитуда сигнала самогенерации в 350 мВ получена при мощности ламповой накачки 400 и 40 мкВт – для лазерной.

Таблица 4. Сравнение эффективности накачки лампой и лазером D_1 , D_2 означает накачку лазером на этих линиях. Цифры 3,4 заменяют для краткости $F_g=3,4$; цифры 3', 4' заменяют $F_e=3,4$

Переход	Сигнал, мВ	Мощность излучения на фотоприемнике, мВт	S/N, дБ (в полосе 1 Гц)
Лампа (D_1+D_2)	350	280	82
D_1 4-3'	350	27	83
D_2 3-2'	360	19	80
D_2 4-3'	150	26	76

При накачке на D_2 -линии генерация получена на частотах f_4 и f_5 , при настройке лазера на частоты переходов $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ и $F_g=3 \rightarrow F_e=2$ соответственно. Амплитуда сигнала в 350 мВ на частоте f_5 достигается при мощности накачки 27 мкВт. При той же мощности амплитуда сигнала на f_4 втрое меньше, т.е. накачка излучением ДЛВР наиболее эффективна на частоте перехода $F_g=3 \rightarrow F_e=2$. Таким образом, лучшее согласование спектров поглощения и излучения накачки позволяет работать при существенно меньшей мощности накачки. При названных уровнях сигнала соотношение сигнал/шум в полосе 1 Гц составило 82 дБ для лампы, 83 дБ для D_1 -лазера, и 80 дБ для D_2 -лазера.

Шумовой метод регистрации МР в комбинации с регистрацией сигнала самогенерации дает удобный способ оптимизации фазовой задержки в

цепи обратной связи. Рис. 7 иллюстрирует этот способ. Для измерения использовались два цезиевых датчика автоколебательного типа, один из которых – гетеродин – имел смещение по магнитному полю. Разность частот датчиков в автоколебательном режиме устанавливалась около 525 Гц. Далее, во втором датчике разрывалась цепь обратной связи и в РЧ-катушку подавалось напряжение от шумового генератора. Спектр линии МР накапливался (разрешение по частоте – 1 Гц, центр линии соответствовал частоте 592 Гц) и перед завершением накопления (1–3 реализации) датчик переводился в режим генерации. В результате в спектре на фоне контура МР появляется линия, соответствующая частоте генерации. Смещение линии генерации относительно вершины контура МР свидетельствует об ошибке в настройке фазовой задержки. Регулируя настройку фазовращателя, можно добиться совмещения частоты генерации и максимума линии МР и тем самым правильно настроить фазу.

Двухлазерная накачка. Характерной проблемой, возникающей при поляризации атомов в Cs и Rb в ячейках с антирелаксационным покрытием излучением одномодового лазера, является «сверхтонкая накачка». Поскольку сверхтонкое расщепление основного состояния этих атомов больше ширины линии поглощения и излучения лазера, последнее может взаимодействовать только с одним из сверхтонких подуровней основного состояния. В результате спонтанного излучения атомы даже за один цикл поглощения-испускания с высокой вероятностью попадают на другой сверхтонкий подуровень, который не взаимодействует с излучением лазера. Поскольку время релаксации между сверхтонкими подуровнями основного состояния велико, атомы накапливаются в этом состоянии и перестают участвовать в создании намагниченности и формировании сигнала магнитометра. Для оценки влияния этого эффекта был проведен эксперимент с двухлазерной накачкой одновременно с двух подуровней основного состояния, причем для исключения эффектов когерентного пленения населенностей один из лазеров был настроен на D_1 -линию, другой – на D_2 . Излучение двух лазеров смешивалось на полупрозрачном зеркале (см. рис. 2) и направлялось в ячейку датчика. Измерения были проведены для ячейки с буферным газом (50×50 , N_2) и ячейки с покрытием (40×50). Лазер D_1 был настроен на частоту перехода $F_g=4 \rightarrow F_e=3$, а D_2 -лазер – на частоту перехода $F_g=3 \rightarrow F_e=2$. Сигналы МР были измерены для

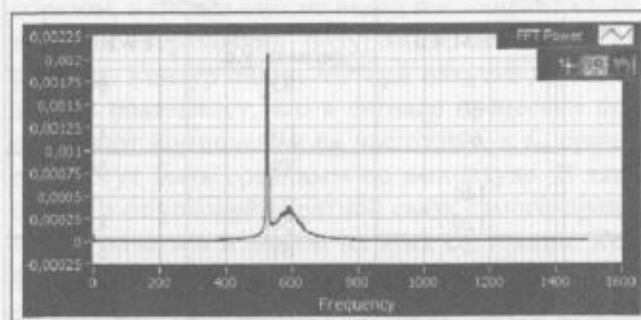


Рис. 7. Контур магнитного резонанса, записанный шумовым методом и спектр сигнала спинового генератора при замкнутой обратной связи

двух вариантов поляризации. В первом круговые поляризации пучков совпадали, во втором – были противоположны.

Значения токов фотоприёмника в случае, когда поляризации лазерных пучков совпадали, приведены в табл. 5. При переходе от однолазерной к двухлазерной накачке мощности лазеров не менялись.

Таблица 5. Пропускание ячейки при однолазерной и двухлазерной накачках: D_1 – накачка D_1 -лазером; D_2 – накачка D_2 -лазером; D_1+D_2 – двухлазерная накачка

Тип накачки	Ток фотоприёмника, мкА	
D_1	5,2	5,6
D_2	5,3	5,9
D_1+D_2	9,0	9,2

Из этих данных видно, что постоянная составляющая фототока, измеряемого на выходе ячейки, при накачке излучением двух лазеров одновременно меньше, чем сумма фототоков при накачке лазерами по отдельности, т.е. излучение при двухлазерной накачке поглощается более эффективно. Причина состоит в том, что каждый лазер по отдельности перекачивает атомы на другой сверхтонкий подуровень. Так, лазер, настроенный на частоту перехода, начинающегося с подуровня $F_g = 4$, просветляет ячейку, переводя часть атомов в состояние $F_g = 3$, которые не поглощают его излучение. То же происходит и для лазера, перекачивающего атомы в обратном направлении с $F_g = 3$ на $F_g = 4$. Когда же они работают одновременно, процессы перекачки во встречных направлениях компенсируют друг друга и поглощение для каждого из лазеров увеличивается.

Амплитуды и ширины сигналов, полученных шумовым методом в состоянии $F_g = 3$ и $F_g = 4$, при двухлазерной накачке и разных циркулярных по-

ляризациях излучения, приведены в табл. 6. Она демонстрирует влияние перехода от однолазерной накачки к двухлазерной для четырех разных случаев, которые различаются по типу ячейки (с покрытием или с буферным газом) и по поляризации излучения при двухлазерной накачке (одинаковые или ортогональные циркулярные поляризации). Отметим, что влияние подключения второго лазера двойко: во-первых, оно компенсирует эффект СТ-накачки, во-вторых, оно либо увеличивает перераспределение населенностей по магнитным подуровням, создаваемое первым лазером, либо уменьшает. При одинаковых поляризациях подключение второго лазера увеличивает сигнал во всех вариантах, кроме сигнала на частоте f_3 для ячейки с покрытием. Объяснение этой аномалии пока не найдено. Для ортогональных поляризаций для ячейки с покрытием подключение второго лазера уменьшает сигнал на обеих частотах f_3 и f_4 . Следовательно механизм деполяризации атомного состояния действует сильнее, чем компенсация СТ-накачки.

Для ячейки с азотом при давлении 25 Торр следует учитывать перемешивание по магнитным подуровням в возбужденном состоянии. В результате перемешивания накачка циркулярно поляризованным излучением на переходах типа $F_e \rightarrow F_g = F_e + 1$ создает перераспределение по магнитным подуровням, противоположное тому, что возникает в ячейке с покрытием. Скорость возврата атомов при спонтанном излучении из-за перемешивания одинакова для всех магнитных подуровней. Поэтому атомы собираются на подуровне с минимальным поглощением. Для переходов $F_e \rightarrow F_g = F_e$, $F_e \rightarrow F_g = F_e - 1$ перемешивание не меняет результата накачки. Как и для ячеек с покрытием, атомы скапливаются на подуровнях, переходы с

Таблица 6. Двухлазерная накачка (влияние поляризации излучения лазеров)

Тип ячейки	Лазер	$F_g = 3$		$F_g = 4$	
		Амплитуда сигнала, у.е.	FWHM, Гц	Амплитуда сигнала, у.е.	FWHM, Гц
Покрытие, $\sigma + \sigma +$	D_1	–	–	83	64
	D_2	83	60	–	–
	D_1+D_2	71	60	119	56
N_2 25 Торр $\sigma + \sigma +$	D_1	–	–	19	80
	D_2	1	140	–	–
	D_1+D_2	4	120	50	82
Покрытие, $\sigma + \sigma +$	D_1	–	–	61	62
	D_2	52	50	–	–
	D_1+D_2	19	58	8	50
N_2 25 Торр $\sigma + \sigma +$	D_1	–	–	11	82
	D_2	1	136	–	–
	D_1+D_2	–	–	14	80

которых вообще запрещены. При такой настройке D₂-лазера, при которой основной вклад вносят переходы $F_g=3 \rightarrow F_e=2$ (при поляризации $-\sigma^+$ и регистрации МР на частоте f_3), атомы скапливаются в состояниях $F_g=3$, $m=2, 3$. Включение второго лазера (σ^-), настроенного на переходы с нижнего подуровня $F_g=4$ приводит к накачке противоположного знака: на $m=-2-3$ для $F_g=4$ и для $F_g=3$. В этом случае сигнал падает до уровня шумов. Если же накачка осуществляется D₁-лазером (σ^+) на переходе $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ и регистрация МР происходит на частоте f_4 , то атомы собираются на подуровнях $F_g=4$, $m=4, 3$. Из-за перемешивания в возбужденном состоянии те же уровни заселяются и при подключении D₂-лазера, настроенного на переход $F_g=3 \rightarrow F_e=4$, сигнал увеличивается. Таково качественное объяснение результатов для ортогональных поляризаций излучения лазеров.

Для ячейки с покрытием сигнал одинаков при накачке D₁- и D₂-лазерами по отдельности. При двухлазерной накачке с одинаковой поляризацией амплитуда сигнала возрастает в 1,4 раза. Кроме того, сигнал МР сравним по амплитуде в состояниях $F_g=3$ и $F_g=4$. Для самогенерирующего устройства это приводит к неопределенности, так как генерация может начаться на частоте любого из этих состояний. Помещение интерференционного фильтра на D₁- или D₂-линию перед приемником может устранить эту проблему.

Для ячейки с буферным газом амплитуда сигнала меньше, чем для ячейки с покрытием. При добавлении второго лазера амплитуда сигнала возрастает в 2,6 раза, но по-прежнему остается меньше, чем для ячейки с покрытием. При этом сигнал МР в состоянии $F_g=4$ на порядок превышает сигнал в состоянии $F_g=3$.

Накачка двумя лазерами осуществлялась сонаправленными лучами, поэтому излучение каждого из лазеров попадало на фотоприемник. Таким образом, в сигнал вносит вклад поглощение с каждого из сверхтонких подуровней основного состояния. Контур линии МР при накачке двумя лазерами показывает, что в сигнале прецессии присутствуют компоненты на частотах f_3 и f_4 , причем они могут быть сравнимы по амплитуде. В зависимости от условий обратной связи самогенерация может начаться в любом из этих состояний. Конфигурация лазерных лучей, при которой оба лазера участвуют в накачке, но только один из них попадает на приемник и формирует сигнал, требует либо разнесения пучков в пространстве, либо раз-

личий в направлениях модификации датчика и будет исследована на следующем этапе.

Увеличение сигнала, которое дает накачка вторым лазером, не превышает 2, так что дополнительные технические сложности, связанные с обеспечением настройки на линию и стабилизации частоты лазера второго лазера делают нецелесообразной двухлазерную накачку в пешеходных магнитометрах. Незначительное увеличение сигнала обусловлено тем, что реально в приборах интенсивность оптической накачки ограничена требованием малости полевых уширения и сдвига МР. В результате относительная величина M_z- и M_x-сигналов обычно не превышает 5–10 %. Это означает малость относительной величины изменения населенностей магнитных и сверхтонких подуровней, и компенсация СТ-накачки не дает существенного увеличения сигнала.

Накачка линейно поляризованным излучением. В магнитном поле Земли отдельные компоненты МР для ¹³³Cs не разрешаются, и соотношения между амплитудами этих компонент определяют форму огибающей. Если для накачки используется циркулярно поляризованный свет, то изменение ориентации устройства приводит к изменению условий накачки и смещению максимума огибающей и генерируемой частоты. Для уменьшения этой ошибки линию МР стремятся сделать симметричной. При накачке линейно поляризованным светом линия МР оказывается симметричной. Теоретический расчет на основе скоростных уравнений показывает, что при уровне накачки, слабо изменяющем населенности магнитных подуровней, для любого перехода линия магнитного резонанса оказывается раздвоенной. Это следует из того, что коэффициенты Клебша–Гордана меняются квадратично по магнитному квантовому числу, и стационарные разности населенностей соседних магнитных подуровней линейно возрастают к крайним магнитным подуровням. Эксперимент по накачке датчика на ¹³³Cs линейно поляризованным излучением ранее был осуществлен в магнитном экране [30]. Теоретическое описание работы устройства при малом значении магнитного поля приведено в [31].

Для линейно поляризованного излучения сигнал МР возникает на частоте ларморовской прецессии и на удвоенной ларморовской частоте. Форма линии МР на основной частоте, полученная при накачке линейно поляризованным излучением на D₁-линии на переходе $F_g=4 \rightarrow F_e=3$ приведена на

рис. 8, а. Постоянная составляющая светового потока, достигая фотоприемника, составляет $4 \mu W$, уровень шумового радиополя $-157 \text{ пТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$. Для построения самогенерирующего устройства такая форма кривой является не удовлетворительной, так как амплитуды двух максимумов зависят от условий накачки, и генерация в этом случае может переключаться с одной половины линии на другую или иметь место одновременно на двух частотах.

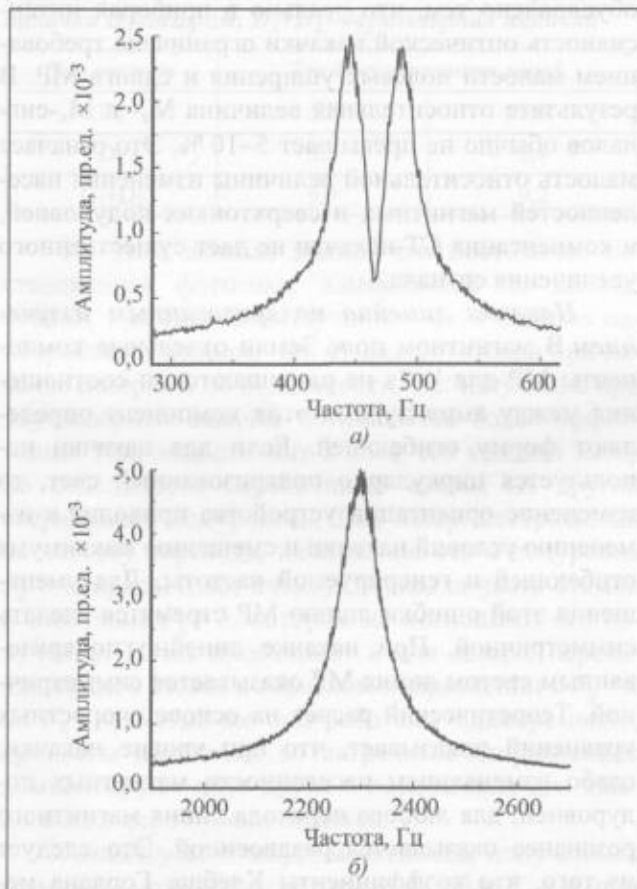


Рис. 8. Сигнал магнитного резонанса (а) на основной частоте (б) на удвоенной частоте

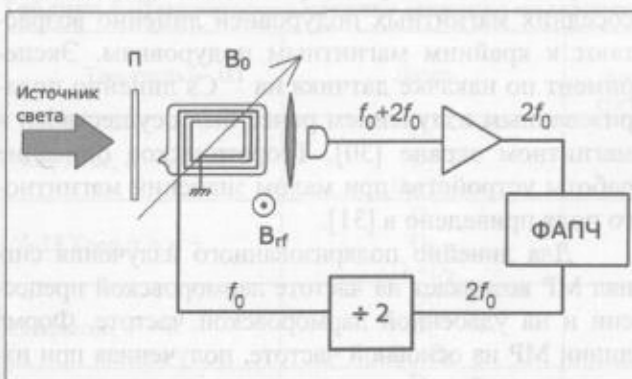


Рис. 9. Схема самогенерирующего датчика на удвоенной частоте ларморовской прецессии

Спиновый генератор, использующий сигнал МР на удвоенной частоте (рис. 8,б) лишен этого недостатка, поскольку эта линия не расщеплена. Схема такого спинового генератора приведена на рис. 9. Его важным отличием является необходимость деления частоты на два после усиления, поскольку фотоприемник детектирует удвоенную ларморовскую частоту, а на катушки должна подаваться основная. Такой генератор с фазовой автоподстройкой частоты возбуждался на удвоенной частоте ларморовской прецессии и отслеживал изменение резонансной частоты, связанное с изменением магнитного поля. Уровень сигнала самогенерации 350 мВ был достигнут при интенсивности накачки 40 мкВт на D_1 -линии. Соотношение сигнал/шум составило порядка 80 дБ в полосе 1 Гц .

При снижении светового потока на ячейку линия МР (рис 8, а) сужается и провал в центре линии становится более глубоким. При снижении и амплитуды РЧ-поля становятся видны отдельные компоненты линии магнитного резонанса (рис. 10). При ламповой накачке отдельные линии МР для ^{133}Cs в земном магнитном поле ранее разрешены не были. Выше было показано, что для земного магнитного поля $B = 52,2 \text{ мкТл}$ расщепление между соседними магнитными подуровнями составляет $7,2 \text{ Гц}$, а между крайними для $F_g = 4 - 50,5 \text{ Гц}$, что соответствует эксперименту.

При снижении интенсивности накачки и шумового радиополя эмановская структура линии магнитного резонанса разрешается и на удвоенной ларморовской частоте. Разрешенные линии представлены на рис. 11. Расстояние между отдельными компонентами на удвоенной частоте соответствует удвоенному расстоянию между компонентами в сигнале на основной частоте.

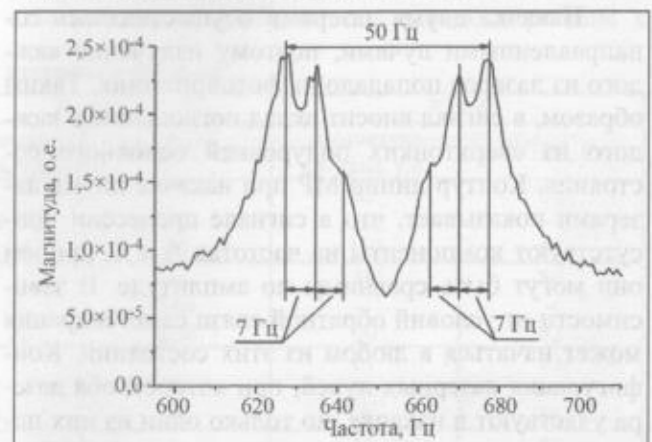


Рис. 10. Линия магнитного резонанса на основной частоте, переход $D_1 F_g = 4 \rightarrow F_g = 3$

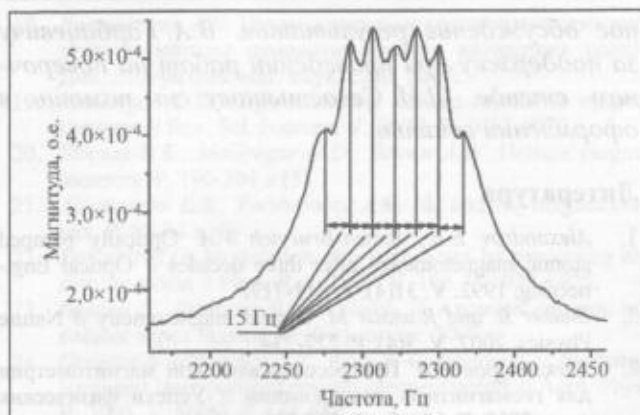


Рис. 11. Структура линии МР на удвоенной дармовской частоте при накачке на переходе $F_g = 4 \rightarrow F_g = 3$ D_1 -линии и мощности лазерного излучения на входе в ячейку 3,2 мкВт (излучение лазера линейно поляризовано)

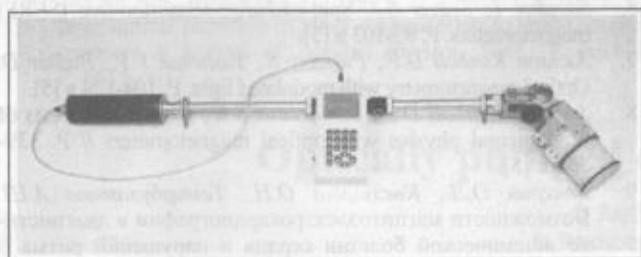


Рис. 12. Фотография макета магнитометра с лазерной накачкой

5. Макет магнитометра

Проведенные исследования позволили создать макет пешеходного квантового Мх магнитометра с лазерной накачкой на атомах цезия. Макет имеет следующие характеристики. Пределы измерений модуля индукции магнитного поля от 20 до 100 мкТл, вариационная чувствительность не хуже 0,01 нТл, погрешность измерений не хуже ± 1 нТл, время готовности к работе с момента включения 15 мин, время непрерывной работы 8 ч, масса 3,5 кг, прибор формирует и записывает протокол измерений (значение модуля индукции магнитного поля, координаты, время).

Фотография макета приведена на рис. 12. Для оптической накачки используется лазер VCSEL (ULM-852), работающий на длинноволновой компоненте D_2 -линии. Лазер вместе с электроникой, обеспечивающей его накачку, стабилизацию температуры, настройку и стабилизацию его частоты находится в цилиндре слева (лазерный блок). Там же размещается и широкополосный усилитель сигнала пропускания ячейки. Ячейка с антирелаксационным покрытием и парами цезия находится в блоке на противоположном конце прибора. В блоке кроме ячейки размещены оптические элементы,

РЧ-катушки, нагреватель ячейки и фотодиод. Излучение лазера направляется в пластиковый световод, который кроме передачи излучения деполаризует и ослабляет его. Большие числовая апертура и диаметр сердцевины световода допускают непосредственную стыковку лазера с волокном. Отсутствие коллимирующей оптики между лазером и световодом уменьшает паразитную обратную связь от его торца. Световод проложен в штанге, соединяющей лазерный блок и блок ячейки. На выходе световода блоку ячейки размещена линза, после которой близкий к параллельному пучок света проходит поляризатор, четвертьволновую пластинку, ячейку, линзу и попадает на фотодиод. Существенно, что оптимальный угол наклона головки магнитометра с ячейкой относительно штанги должен быть различным на разных широтах. Для этого, как и в прототипе (ПКМ-1М), предусмотрена возможность поворота блока ячейки относительно штанги. Выбранный световод не критичен к изгибу и при изменении наклона головки не меняет поляризационных свойств излучения лазера.

На рис. 12 показан также пульт управления прибором и регистрации данных (пульт прислонен к ручке штанги). В пульте производится измерение частоты спинового генератора периодометром с опорой на термокомпенсированный кварц VM5333-T-10.000-2/-30+70 компании MERCURY (10 МГц). Преобразование частоты в значение модуля вектора магнитной индукции осуществляется по линейному закону. При этом весь диапазон частот разбит на восемь диапазонов, в каждом из которых введены поправочные коэффициенты, связанные с нелинейной компенсацией сдвига фазы в цепи обратной связи спинового генератора. В пульте размещен приемник GPS/ГЛОНАСС. На дисплей пульта выводится уровень сигнала спинового генератора, значение измеряемого в данной точке модуля индукции магнитного поля, координаты точки, время, число видимых спутников.

За счет замены лампы на лазер энергопотребление магнитометра уменьшено по сравнению с потреблением прототипа ПКМ-1М. Несмотря на то, что в состав магнитометра включены приемник GPS/ГЛОНАСС и дисплей с более высоким разрешением, уменьшенное потребление позволило отказаться от тяжелых аккумуляторов без изменения срока работы без подзарядки.

Испытания магнитометра в диапазоне стабильных полей 20–100 мкТл проводились на стенде с колечной системой Браунбека в ИЗМИРАНе.

Заключение

Основные результаты при накачке циркулярно поляризованным излучением. Главная часть M_x магнитометра – спиновый генератор – работает с однолазерной накачкой (тем более с двухлазерной), потребляя по сравнению с ламповым на порядок меньшую световую мощность. Среди шести СТ-переходов для D_2 -линии оптимальна настройка на частоту перехода $F_g=3 \rightarrow F_e=2$ (генерация на зеемановских переходах подуровня $F_g=3$ получена впервые); для D_1 и ДЛВР оптимальна настройка на частоту перехода $F_g=3 \rightarrow F_e=2$. Исследовано влияние накачки вспомогательным лазером на сигнал МР. Показано, что при оптимальной мощности излучения лазера увеличение сигнала из-за компенсации сверхтонкой накачки не превышает 1,5. Предложен новый метод настройки фазовой задержки в цепи обратной связи магнитометра с использованием генератора шума

Основные результаты при накачке линейно поляризованным излучением. Исследован вид линии МР на основной и удвоенной частоте ларморовской прецессии в зависимости от ориентации устройства, интенсивности накачивающего излучения и радиочастотного поля. Установлено, что в соответствии с теорией при накачке линейно поляризованным излучением линия магнитного резонанса симметрична. При малой интенсивности накачки и малом РЧ-поле разрешены отдельные линии магнитного резонанса в земном магнитном поле. Осуществлена самогенерация на удвоенной частоте Ларморовской прецессии.

Создан макет квантового M_x магнитометра с лазерной накачкой с улучшенными по сравнению с прототипом эксплуатационными и сервисными характеристиками, в котором используется поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL).

Исследования, проведенные с двухлазерной накачкой и линейной поляризацией, не были использованы в разработанном макете, однако могут найти применение в стационарных установках, в частности, при создании магнитометров для кардиографии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт 12.527.12.5007 от 14.06.2012.

Авторы выражают благодарность В.П. Яковлеву, В.И. Юдину и А.В. Тайченачеву за плодотвор-

ное обсуждение результатов, В.А. Гарбацевичу за поддержку при проведении работ на поверочном стенде, Д.И. Севостьянову за помощь в оформлении статьи.

Литература

1. Alexandrov E.B., Bonch-Bruевич V.A. Optically pumped atomic magnetometers after three decades // *Optical Engineering*. 1992. V. 31(4). P. 711-717.
2. Budker D. and Romalis M. Optical magnetometry // *Nature Physics*. 2007. V. 3(4). P. 227-234.
3. Александров Е.Б. Прогресс в квантовой магнитометрии для геомагнитных исследований // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180(5). С. 509-519.
4. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука. 1972.
5. Budker D., Jackson Kimball D.F. (Eds.). *Optical Magnetometry*. Cambridge: Cambridge University Press. 2013.
6. Savukov I., Seltzer S.J. Spin-exchange-relaxation-free (SERF) magnetometers. P. 85-103 в [5].
7. Jackson Kimball D.F., Pustelny S., Yashchuk V.V., Budker D. Optical magnetometry with modulated light. P. 104-124 в [5].
8. Jackson Kimball D.F., Lamoreaux S.K., Chupp T.E. Tests of fundamental physics with optical magnetometers // P. 339-368 в [5].
9. Бокерия О.Л., Кислицина О.Н., Темирбулатова А.Ш. Возможности магнитоэлектрокардиографии в диагностике ишемической болезни сердца и нарушений ритма // *Аналы аритмологии*. 2009. № 2. С. 45-63.
10. Wyllie R., Kauer M., Wakai R.T., Walker T.G. Optical magnetometer array for fetal magnetocardiography // *Opt. Letters*. 2012. V. 37(12). P. 2247-2249.
11. Tkach R.W., Chraplyvy A.R. Regimes of Feedback Effects in 1.5- μm Distributed Feedback Laser // *Journal of Lightwave Technology*. V. 4(11). P. 1655-1661.
12. Каргапольцев С.В., Величанский В.Л., Васильев В.В., Кобякова М.Ш., А.В. Морозюк А.В., Ширяева Н.В., Конев В.П. Низкопороговый диодный лазер с коротким резонатором для миниатюрных атомных часов // *Квантовая электроника*. Т. 39(6). С. 487-493.
13. Michalzik R. VCSEL Fundamentals / VCSELS. Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers / Michalzik R. (Ed.) // *Springer Series in Optical Sciences*. 2013. V. 166.
14. Bison G., Wynands R., Weis A. A laser-pumped magnetometer for the mapping of human cardiomagnetic fields // *Appl. Phys. B*. 2003. V. 76(3). P. 325-328.
15. Александров Е.Б., Балабас М.В., Вершовский А.К., Иванов А.Е., Якобсон Н.Н., Величанский В.Л., Сенков Н.В. Лазерная накачка в схеме M_x -магнитометра // *Оптическая спектроскопия*. 1995. Т. 78. С. 325-332.
16. Vassiliev V.V., Zibrov S.A., Velichansky V.L. Compact extended-cavity diode laser for atomic spectroscopy and metrology // *Review of Scientific Instruments*. 2006. V. 77(1). P. 013102-013102-4.
17. Бахерт Х.-Ю., Богатов А.П., Гуров Ю.В., Елисеев П.Г., Охотников О.Г., Пак Г.Т., Рахвальский М.П., Хайретдинов К.А. Радиочастотные спектры биений мод и пульсации интенсивности инжекционного лазера с внешним дисперсионным резонатором // *Квантовая электроника*. 1981 Т. 8(9). С. 1957-1961.

18. *Вершовский А.К.* Новые квантовые радиооптические системы и методы измерения слабых магнитных полей: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб. 2007.
19. *McGregor D.D.* High-sensitivity helium resonance magnetometers // *Rev. Sci. Instrum.* V. 58(6). P. 1067-1076.
20. *Slocum R.E., McGregor D.D., Brown A.W.* Helium magnetometers. P. 190-204 в [5].
21. *Alexandrov E.B., Vershovskiy A.K.* M_x and M_z magnetometers. P. 60-84 в [5].
22. *Dehmelt H.G.* Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms // *Phys. Rev.* 1957. V. 105. P. 1924-1925.
23. *Будкер Д., Кимбелл Д., Де Миль Д.* Атомная физика: освоение через задачи. М: Физматлит. 2009.
24. *Groeger S., Pazgalev A.S., Weis A.* Comparison of discharge lamp and laser pumped cesium magnetometers // *Appl. Phys.* B. 2005. V. 80(6). P. 645-654.
25. *Balabas M.V., Pasgalev A.S., Vershovskiy A.K., Yakobson N.N.* Double-resonance atomic magnetometers: from gas discharge to laser pumping // *Laser Physics.* 1996. V.6(2). P. 244-251.
26. *Slocum R.E., Scheerer L.D., Tin P., Marquedant R.* Nd: LNA laser optical pumping of He-4 - Application to space magnetometers // *Journal of Applied Physics.* 1988. V. 64(12). P. 6615-6617.
27. *Steck D.A.* Cesium D Line Data. Version 2.1.4 [Электронный ресурс]: Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon. 2010. URL: <http://steck.us/alkalidata/cesiumnumbers.pdf> (дата обращения: 01.11.2013)
28. *Corwin K.L., Lu Z.-T., Hand C.F., Epstein R.J., Wieman C.E.* Frequency-stabilized diode laser with the zeeman shift in an atomic vapor // *Optical Society of America.* 1998. V. 37(15). P. 3295-3298.
29. *Yabuzaki T., Ogawa T.* Spectral Profile of rf Modulated Light Beam in Optical Pumping Experiment with Cesium Vapor // *Skaliński T.* (ed.). *Optical Pumping and Atomic Line Shape: Proceedings of the International Conference OPAL.S*, Warszawa, 25-28 June 1968 / Warszawa: WydawnictwoNaukowe PWN. 1969.
30. *Di Domenico G., Bison G., Groeger S., Knowles P., Pazgalev A. S., Rebetez M., Saudan H., Weis A.* Experimental study of laser detected magnetic resonance based on atomic alignment // *Phys. Rev. A.* 2006. V. 74(6). P. 063415-063415-8.
31. *Weis A., Bison G., Pazgalev A.S.* Theory of double resonance magnetometers based on atomic alignment // *Phys. Rev. A.* 2006. V. 74(3). P. 033401-033401-8.

Поступила 19 ноября 2013 г.

Optically pumped cesium magnetometer

© Authors, 2013

© Radiotekhnika, 2013

V.L. Velichansky

Ph. D. (Phys.-Math.), P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: vvlab@yandex.ru

A.N. Kozlov

Dr. Sc. (Phys.-Math.), IZMI RAN

E-mail: kozlov@izmiran.ru

E.V. Zhivun

Post-graduate Student, Physics Department at UC Berkeley

S.A. Zibrov

Ph. D. (Phys.-Math.), Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: szibrov@yandex.ru

V.V. Shutov

«Energycenter» Ltd

E-mail: Vitalyshutov@gmail.com

V.V. Vasil'ev

Research Scientist, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: vvv@okb.lpi.troitsk.ru

A.K. Vershovskii

Dr. Sc. (Phys.-Math.), Ioffe Phys.-Tech. Inst. of RAS (St.-Petersburg)

E-mail: vershovski@gmail.com

A.S. Pazgalev

Ph. D. (Phys.-Math.), Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: pazgalev@ya.ru

The paper is devoted to the development of a laser-pumped quantum cesium M_x magnetometer assigned for measurements of small local variations of the terrestrial magnetic field. Such magnetometers are used in geological survey, archeology, medicine, and military applications.

Different types of diode lasers are compared and the possibilities to apply them for optical pumping of alkali atoms in compact devices are evaluated in the first part of the paper. The most important parameters for this kind of applications are availability of single mode operation, resistance of this regime to perturbation, and the line width. Advantages and disadvantages of the main workhorse-atoms in optically pumped magnetometers (potassium, rubidium, and cesium) are considered in the second part. We choose cesium atoms since they allow for the lowest power consumption of the cell heater. Potassium provides the highest sensitivity but needs the highest temperature, which is not compatible with handheld device. The principle of operation of M_x magnetometer is presented in the same part.

An experimental set-up and measures of relevant «magnetic hygiene» required in the evaluations of small variations of terrestrial magnetic fields in the urbane surroundings are described in the third part. The measures include special unshielded laboratory in a house that has no metal part in construction, suppression of the line pick-ups by gradiometer technique, and building-up the calibration coil system, which provides stable magnetic field in the range 20-100 μT . The noise technique used to specify magnetic resonance (MR) is described.

In the fourth part of the paper, the noise technique has is applied for characterization of a set of coated cells and cells filled with buffer gases. The same part gives results of the investigation of two-laser pumping and estimation of the effect of hyperfine optical depopulation of the working sublevel on the amplitude of the MR. It has been shown, that for properly selected power of optical pumping that does not lead to appreciable broadening of MR the mentioned loss of atoms only slightly decreases signal. Thus, technical problems involved with the incorporation of a second laser in a magnetometer are not justified. We also carried out experiments with optical pumping by linearly polarized light. The whole Zeeman structure of MR has been resolved in terrestrial magnetic field on decreasing laser intensity and the amplitude of RF field. The linear polarization provides the symmetrical shape of the MR line, which can decrease the heading error of magnetometer. A spin generator pumped by linearly polarized laser light has been realized and tested. It produced oscillation at the doubled Larmor frequency but demonstrated smaller signal-to-noise ratio so that circular polarization has been preferred for a model of magnetometer.

The last part describes the developed model of magnetometer. The substitution of the resonant gas-discharge lamp of 3W power consumption by VCSEL laser whose consumption is about 5 mW makes it possible to reject heavy batteries in spite of the addition of GPS/GLONASS receiver and a modern display in the model.

Thus, operating parameters of magnetometer model are improved as compared with those of a prototype magnetometer («ПКМ-1М») while keeping its metrological characteristics.

References

- Alexandrov E.B., Bonch-Bruевич V.A. Optically pumped atomic magnetometers after three decades // *Optical Engineering*. 1992. V. 31(4). P. 711-717.
- Budker V. and Romalis M. Optical magnetometry // *Nature Physics*. 2007. V. 3(4). P. 227-234.
- Aleksandrov E.B. Progress v kvantovoy magnitometrii diya geomagnitny'x issledovanij // *Uspexi fizicheskix nauk*. 2010. T. 180(5). S. 509-519.
- Pomeranczev N.M., Ry'zhkov V.M., Skroczijski G.V. Fizicheskie osnovy' kvantovoy magnitometrii. M.: Nauka. 1972.
- Budker D., Jackson Kimball D.F. (Eds.). *Optical Magnetometry*. Cambridge: Cambridge University Press. 2013.
- Savukov I., Seltzer S.J. Spin-exchange-relaxation-free (SERF) magnetometers. P. 85-103 v [5].
- Jackson Kimball D.F., Pustelny S., Yashchuk V.V., Budker D. Optical magnetometry with modulated light. P. 104-124 v [5].
- Jackson Kimball D.F., Lamoreaux S.K., Chupp T.E. Tests of fundamental physics with optical magnetometers // P. 339-368 v [5].
- Bokeriya O.L., Kisliczina O.N., Temirbulatova A.Sh. Vozmozhnosti magnitno'lektrokardiografii v diagnostike ishemichejskoj bolezni serdca i narushenij ritma // *Analy'aritmologii*. 2009. № 2. S. 45-63.
- Wyllie R., Kauer M., Wakai R.T., Walker T.G. Optical magnetometer array for fetal magnetocardiography // *Opt. Letters*. 2012. V. 37(12). P. 2247-2249.
- Tkach R.W., Chraplyvy A.R. Regimes of Feedback Effects in 1.5- μm Distributed Feedback Laser // *Journal of Lightwave Technology*. V. 4(11). P. 1655-1661.
- Kargapol'czev S.V., Velichanskij V.L., Vasil'ev V.V., Kobayakova M.Sh., A.V. Morozjuk A.V., Shiryayeva N.V., Konyaev V.P. Nizkoporogovij diodny' lazer s korotkim rezonatorom diya miniaturny'x atomny'x chasov // *Kvantovaya e'lektronika*. T. 39(6). S. 487-493.
- Michalzik R. VCSEL Fundamentals / VCSELs. Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers / Michalzik R. (Ed.). Springer Series in Optical Sciences. 2013. V. 166.
- Bison G., Wynands R., Weis A. A laser-pumped magnetometer for the mapping of human cardiomagnetic fields // *Appl. Phys. B*. 2003. V. 76(3). P. 325-328.
- Aleksandrov E.B., Balabas M.B., Vershovskij A.K., Ivanov A.E., Jakobson N.N., Velichanskij V.L., Senkov N.V. Lazernaya nakachka v sxeme Mx-magnitometra // *Opticheskaya spektroskopiya*. 1995. T. 78. S. 325-332.
- Vassiliev V.V., Zibrov S.A., Velichanskij V.L. Compact extended-cavity diode laser for atomic spectroscopy and metrology // *Review of Scientific Instruments*. 2006. V. 77(1). P. 013102-013102-4.
- Baxert X.-Ju., Bogatov A.P., Gurov Ju.V., Eliseev P.G., Oxotnikov O.G., Pak G.T., Raxval'skij M.P., Xajretidinov K.A. Radiochastotny'e spektry' bienij mod i pul'saczii intensivnosti inzhekcionnogo lazera s vneshnim dispersionny'm rezonatorom // *Kvantovaya e'lektronika*. 1981 T. 8(9). S. 1957-1961.
- Vershovskij A.K. Novy'e kvantovy'e radioopticheskie sistemy' i metody' izmereniya slabyx magnitny'x polej: Dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk. SPb. 2007.
- McGregor D.D. High-sensitivity helium resonance magnetometers // *Rev. Sci. Instrum.* V. 58(6). P. 1067-1076.
- Slocum R.E., McGregor D.D., Brown A.W. Helium magnetometers. P. 190-204 v [5].
- Alexandrov E.B., Vershovskij A.K. Mx and Mz magnetometers. P. 60-84, v [5]
- Dehmelt H.G. Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms // *Phys. Rev.* 1957. V. 105. P. 1924-1925.
- Budker D., Kimball D., De Mill' D. Atomnaya fizika: osvoenie cherez zadachi. M: Fizmatlit. 2009.
- Groeger S., Pzalgalev A.S., Weis A. Comparison of discharge lamp and laser pumped cesium magnetometers // *Appl. Phys. B*. 2005. V. 80(6). P. 645-654.
- Balabas M.V., Pzalgalev A.S., Vershovskij A.K., Jakobson N.N. Double-resonance atomic magnetometers: from gas discharge to laser pumping // *Laser Physics*. 1996. V.6(2). P. 244-251.
- Slocum R.E., Scheerer L.D., Tin P., Marquedant R. Nd: LNA laser optical pumping of He-4 - Application to space magnetometers // *Journal of Applied Physics*. 1988. V. 64(12). P. 6615-6617.
- Steck D.A. Cesium D Line Data. Version 2.1.4 [E'lektronny'j resurs]: Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon. 2010. URL: <http://steck.us/alkalidata/cesiumnumbers.pdf> (dataobrashheniya: 01.11.2013)
- Corwin K.L., Lu Z.-T., Hand C.F., Epstein R.J., Wieman C.E. Frequency-stabilized diode laser with the zeeman shift in an atomic vapor // *Optical Society of America*. 1998. V. 37(15). P. 3295-3298.
- Yabuzaki T., Ogawa T. Spectral Profile of rf Modulated Light Beam in Optical Pumping Experiment with Cesium Vapor // Skaliński T. (ed.). *Optical Pumping and Atomic Line Shape: Proceedings of the International Conference OPaLS, Warszawa, 25-28 June 1968 / Warszawa: WydawnictwoNaukowe PWN*. 1969.
- Di Domenico G., Bison G., Groeger S., Knowles P., Pzalgalev A. S., Rebetez M., Saudan H., Weis A. Experimental study of laser detected magnetic resonance based on atomic alignment // *Phys. Rev. A*. 2006. V. 74(6). P. 063415-063415-8.
- Weis A., Bison G., Pzalgalev A.S. Theory of double resonance magnetometers based on atomic alignment // *Phys. Rev. A*. 2006. V. 74(3). P. 033401-033401-8.