УДК 531.383-11.621.378 DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.081-092

## Н. А. МАЛЕЕВ, С. А. БЛОХИН, М. В. БОБРОВ, А. Г. КУЗЬМЕНКОВ, М. М. КУЛАГИНА, В. М. УСТИНОВ

# ИСТОЧНИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОМПАКТНОГО ГИРОСКОПА НА ЭФФЕКТЕ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Разработаны вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 895 нм с фиксированным направлением поляризации выходного излучения, обеспечивающие при рабочей температуре 60 °C выходную мощность более 1 мВт в одномодовом режиме с фактором подавления ортогональной поляризации около 20 дБ. На их основе разработан источник лазерного излучения для перспективного компактного гироскопа на эффекте ядерного магнитного резонанса, обеспечивающий точную подстройку длины волны на спектральную линию D1 изотопа Cs133 и формирование коллимированного выходного пучка.

Ключевые слова: источник лазерного излучения, компактный гироскоп, ядерный магнитный резонанс.

### Введение

Компактные гироскопы, использующие эффект ядерного магнитного резонанса (далее – ядерные магнитные гироскопы, ЯМГ), рассматриваются в качестве перспективных компонентов автономных навигационных систем с высокой точностью позиционирования. Физические процессы, определяющие работу ЯМГ, подробно рассмотрены в [1]. Ключевыми компонентами компактного ЯМГ являются миниатюрная газовая ячейка, содержащая смесь атомов инертного газа (двух изотопов ксенона) и атомов щелочного металла (Rb или Cs), и два источника лазерного излучения, используемые для накачки газовой смеси (путем поляризации спиновых моментов атомов щелочного металла) и считывания полезного сигнала. При этом лазеры для компактного ЯМГ должны удовлетворять ряду специфических требований:

- точное соответствие частоты лазерного излучения определенному энергетическому переходу в энергетической структуре используемого щелочного атома (например, линии D1 Rb87 или линии D1 Cs133);
- линейно-поляризованное лазерное излучение с фиксированным направлением плоскости поляризации и малой шириной спектра генерации;

**Малеев** Николай Анатольевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) (С.-Петербург).

**Блохин** Сергей Анатольевич. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Бобров Михаил Александрович. Младший научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

**Кузьменков** Александр Георгиевич. Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН (С.-Петербург).

Кулагина Марина Михайловна. Научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Устинов Виктор Михайлович. Доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, директор, Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН.

- низкие амплитудные и частотные шумы;
- возможность надежного функционирования при повышенных рабочих температурах;
- малое энергопотребление;
- возможность компактного размещения лазерного излучателя и оптической схемы фокусировки излучения на газовой ячейке с учетом малого объема физического модуля ЯМГ.

Используемые в компактных ЯМГ физические процессы и предъявляемые к лазерным источникам требования близки к компактным атомным стандартам частоты [2], в связи с чем естественным является выбор в качестве лазерных излучателей полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ, англоязычное название – «vertical-cavity surface-emitting laser», VCSEL). Лазеры такого типа с фиксированным направлением поляризации выходного излучения и характерными уровнями выходной мощности в несколько десятых долей мВт успешно используются в компактных атомных стандартах частоты на основе Cs и Rb [3], однако при создании ЯМГ требуется обеспечить уровни выходной мощности 1-2 мВт при температурах, близких к рабочей температуре миниатюрной газовой ячейки [4], которая может достигать 85°С при использовании Cs [5] и 110°С при использовании Rb [6].

Технология полупроводниковых ВИЛ активно развивается с начала 1990-х гг., когда методы эпитаксиального выращивания многослойных полупроводниковых гетероструктур (молекулярно-пучковая эпитаксия – МПЭ и газофазная эпитаксия из паров металлорганических соединений – МО ГФЭ) достигли уровня, необходимого для реализации вертикального оптического микрорезонатора с распределенными брэгговскими отражателями (РБО), составляющего основу конструкции ВИЛ. В промышленной технологии ВИЛ спектрального диапазона 780-860 нм используется система материалов AlGaAs/GaAs, обеспечивающая достаточный контраст показателей преломления чередующихся четвертьволновых слоев в РБО и решеточное согласование эпитаксиальных слоев AlGaAs с подложкой GaAs во всем диапазоне составов [8]. Использование активной области с напряженными квантовыми ямами InGaAs позволяет реализовать ВИЛ спектрального диапазона 860–1060 нм [18]. Помимо эпитаксиальной технологии, другой ключевой компонент технологии ВИЛ – формирование токовой апертуры, ограничивающей область излучения в латеральном направлении. В современных ВИЛ в большинстве случаев токовая апертура формируется методом селективного окисления слоев AlGaAs с высоким содержанием Al [9]. ВИЛ спектральных диапазонов 850/980 нм демонстрируют высокие уровни быстродействия в режиме прямой токовой модуляции (до 25 Гбит/с и выше), субмиллиамперные пороговые токи, широкий диапазон рабочих температур (до 85°С и выше), высокую надежность [8, 10, 11], при этом их выходная мощность ограничена уровнями от 1-3 мВт (для одномодовых приборов) до 5-15 мВт (для многомодовых приборов).

Реализация одномодовых поляризационно-стабильных ВИЛ с уровнями выходной мощности выше 1 мВт является сложной технической задачей. В этом случае приходится одновременно использовать малые размеры излучающей области (для гарантии одномодового режима), применять тот или иной механизм селекции направления поляризации (что, как правило, ведет к дополнительным оптически потерям) и работать на высоких уровнях плотности тока накачки (что ведет к сильному разогреву и резкому снижению надежности). При создании ВИЛ для компактных ЯМГ или компактных атомных стандартов частоты проблема усугубляется необходимостью точного попадания в требуемую длину волны, что резко уменьшает выход годных приборов из-за разброса параметров эпитаксиальных гетероструктур и размеров токовых апертур, формируемых методом селективного окисления. В табл. 1 суммированы опубликованные данные по характеристикам лучших серийно выпускаемых и лабораторных образцов одномодовых поляризационно-стабильных ВИЛ на линию D1 Rb87 и линию D1 Cs133. При этом в таблицу не включены данные по приборам, разработанным Sandia National Laboratories [16]. Насколько известно, в указанной лаборатории созданы ВИЛ на линию D1 Rb87 с выходной мощностью более 2 мВт, использованные при создании компактного ЯМГ компании Northrop Grumman (США) [4], однако приборы, выпускаемые Sandia National Laboratories, доступны только ограниченному кругу потребителей в США.

Из анализа приведенных в табл. 1 данных следует, что серийно выпускаемые одномодовые поляризационно-стабильные ВИЛ на линию D1 Rb87 с уровнем выходной мощности, в минимальной степени приемлемым для использования в компактных ЯМГ, работают при относительно невысоких температурах. Что касается излучателей на линию D1 Cs133, известные образцы непригодны для использования в компактных ЯМГ либо по уровню выходной мощности [15], либо по рабочей температуре [14].

Настоящая работа посвящена обсуждению результатов создания и исследования характеристик источника лазерного излучения на линию D1 Cs133 на основе кристалла ВИЛ. Кратко рассмотрены обоснование выбранной конструкции кристалла ВИЛ и технология его изготовления, представлены результаты исследования основных характеристик источника лазерного излучения. Разработанный источник потенциально пригоден для применения в компактных ЯМГ.

Таблица 1

№	Наименование параметра	Значение					
	Производитель/разработчик Ссылка на источник публи- кации	Princeton Optronics, CIIIA [12]	II-VI laser Enterprise, Швейцария [13]	Ulm University, Германия [14]	Vixar, CIIIA [15]		
	Модель прибора	PSM-TO-001- W0795	APM2101013300	Эксперимен- тальный образец	895S-0000- X002		
	Год публикации	2010	2012	2013	2014		
1	Длина волны одночастотного излучения, нм	795 (линия D1 Rb87)	794,1–795,9 (линия D1 Rb87)	894,6 (линия D1 Cs133)	894±0,5 (линия D1 Cs133)		
2	Максимальная мощность лазерного излучения, не ме- нее, мВт	1,5	1,0	1,9 (при 6мА)	0,2		

## Сравнительные характеристики одномодовых поляризационно-стабильных ВИЛ на линию D1 Rb87 и линию D1 Cs133

Гироскопия и навигация. Том 26, №1 (100), 2018

№	Наименование параметра	Значение					
3	Мощность лазерного излуче- ния, не менее, мВт (в рабочей точке)	1,0	нет данных	0,9	0,1		
4	Рабочий ток, мА	2,2	2,1	2,4	1,0		
5	Отношение максимумов сиг- налов основной генерируе- мой моды и мод высшего порядка, измеренное по спектральной характеристике лазера, не менее, дБ	25	20	40	20		
6	Отношение интенсивности излучения в основной линей- ной поляризации к излуче- нию в ортогональной поляри- зации, не менее, дБ	20	10	21	16		
7	Рабочая температура, °С	20	50	23	от 50 до 80		
8	Конструктивное исполнение	В корпусе ТО-46	В корпусе ТО-46 с терморе- зистором	Кристалл на элементе Пельтье с тер- морезистором	В корпусе ТО-46		

# Обоснование выбора конструкции кристалла ВИЛ

В современных высокоскоростных оптических линиях связи широко используется базовая конструкция ВИЛ спектрального диапазона 850 нм [7, 11] с двумя легированными РБО n- и p-типа проводимости на основе чередующихся четвертьволновых слоев AlGaAs разного состава, между которыми расположена активная область с набором GaAs квантовых ям в матрице AlGaAs. При этом ограничение в латеральном направлении области протекания тока и, соответственно, излучения света осуществляется путем формирования токовой апертуры методом селективного окисления апертурного слоя AlGaAs с относительным содержанием Al выше 96%, расположенного в верхнем (выводном) РБО р-типа вблизи к активной области. Электрические контакты формируются к верхнему РБО р-типа (анод) и легированной подложке GaAs n-типа (катод). Однако данный вариант конструкции не позволяет обеспечить предельные уровни быстродействия из-за существенной паразитной емкости анодного контакта, в связи с чем получили развитие альтернативные подходы, в частности использование одного или двух внутрирезонаторных контактов и расположение контактных площадок на слое диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью [8, 10].

Недостатки конструкции ВИЛ с двумя легированными РБО применительно к задачам создания одномодовых поляризационно-стабильных излучателей состоят в достаточно высоком последовательном сопротивлении из-за большого количества интерфейсов на пути протекания тока через верхний и нижний РБО. При использовании технологии МО ГФЭ данную проблему частично решают применением градиентного профиля состава на гетерограницах [17], однако в случае технологии МПЭ приходится использовать очень сложные профили состава и легирования [18], воспроизводимая реализация которых требует применения так называемого «цифрового градиента» [19], то есть многократного кратковременного открывания и закрывания заслонок молекулярных источников, что ведет к снижению ресурса работы эпитаксиального оборудования. Нами была разработана и успешно апробирована альтернативная конструкция высокоскоростных ВИЛ спектрального диапазона 850 нм с активной областью на основе напряженных квантово-размерных гетероструктур InAlGaAs, селективно-окисленной токовой апертурой, внутрирезонаторными контактами и копланарной геометрией контактных площадок [20, 21]. Базовая конструкция эпитаксиальной гетероструктуры состоит из нелегированного нижнего РБО Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As, контактного слоя n- Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, нескольких пар четвертьволновых слоев Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As, легированных n-типом, AlGaAs активной области с несколькими квантовыми ямами InGaAs, апертурного слоя на основе AlGaAs, легированного р-типом, нескольких пар четвертьволновых слоев  $Al_xGa_{1-x}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ , легированных р-типом, и контактного слоя р-типа, верхняя часть которого состоит из сильно легированного p-типом GaAs, локально удаляемого над областью токовой апертуры после формирования анодного кольцевого контакта. Для приборов спектрального диапазона 850-895 нм используются слои твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  с составом x = 0,15 - 0,17. Преимуществами предложенной конструкции является существенное снижение последовательного сопротивления за счет уменьшения числа интерфейсов на пути протекания тока и использования сильно легированного контактного слоя р-типа, а также уменьшение числа срабатывания заслонок молекулярных источников.

Известные способы создания одномодовых ВИЛ с фиксированным направлением поляризации основаны на создании пространственной анизотропии оптических потерь, оптического усиления или токовой инжекции [8]. На практике наиболее широко применяется формирование субволновой дифракционной решетки в выходном РБО с использованием субмикронной литографии [22]. Для конструкции ВИЛ с внутрирезонаторными контактами возможности формирования субволновой дифракционной решетки ограничены непланарным рельефом поверхности с перепадами высоты до нескольких микрон. Нами был предложен альтернативный способ фиксации направления поляризации выходного излучения ВИЛ, основанный на формировании токовой апертуры ромбовидной формы методом селективного окисления в атмосфере азота с добавлением паров воды в сочетании с внутрирезонаторной схемой токовой инжекции [23]. Конструкция апертурного слоя, состоящего из нескольких слоев AlGaAs со вставкой слоя AlAs толщиной 20 нм, не только обеспечивает формирование ромбовидной токовой апертуры, но и позволяет в существенной степени устранить нестабильность скорости окисления от образцу к образцу из-за невозможности очень точного поддержания состава слоев AlGaAs с высокой долей Al [24].

Схематическое изображение конструкции одномодового поляризационностабильного ВИЛ с ромбовидной оксидной токовой апертурой приведено на рис. 1. Легированные пары четвертьволновых слоев  $Al_xGa_{1-x}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ между РБО и активной областью не показаны, условно изображены линии протекания тока от верхнего кольцевого контакта к нижнему. На нижней части рисунка схематически изображено сечение эффективного оптического волновода, возникающего в структурах ВИЛ из-за скачка эффективного показателя преломления между центральной ( $n_c$ ) и окисленной ( $n_{cl}$ ) частями апертурного слоя [25].



Рис. 1. Схематическое изображение конструкции одномодового поляризационно-стабильного ВИЛ с ромбовидной оксидной токовой апертурой и внутрирезонаторными контактами

## Изготовление кристаллов ВИЛ и лазерных излучателей

Эпитаксиальные структуры ВИЛ были выращены методом молекулярнопучковой эпитаксии на одноподложечной лабораторной установке Riber Compact 21 и многоподложечной промышленной установке Riber 49. Характерный разброс положения резонансной длины волны достигал 15 нм по площади подложки диаметром 76,2 мм. Это снижало количество годных приборов, но одновременно позволяло выбрать области с длиной волны лазерной генерации, соответствующей линии D1 Cs133 при определенной рабочей температуре и величине тока накачки. Разработанная технология изготовления ВИЛ включает следующие этапы: формирование металлизации верхнего р-контакта, травление мезаструктуры до внутрирезонаторного контактного слоя n-  $Al_xGa_{1-x}As$ , селективное окисление апертурного слоя и формирование ромбовидной токовой апертуры, формирование металлизации n-контакта, удаление сильно легированного контактного слоя p+GaAs в пределах области над токовой апертурой, формирование верхнего диэлектрического РБО, защита поверхности диэлектриком, вскрытие контактных окон в диэлектрике, планаризация поверхности и формирование топологии контактных площадок. В качестве диэлектрических РБО использовались системы материалов SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> [26]. Анодные контактные площадки соединяются с кольцевыми р-контактами с помощью мостов. После завершения операций планарного технологического процесса подложка с излучателями утонялась и разделялась на отдельные кристаллы. На рис. 2 приведено изображение центральной области одного из изготовленных кристаллов ВИЛ в сканирующем электронном микроскопе. В данном варианте кристалл ВИЛ содержит два излучающих элемента. Слева и справа видны анодные контактные площадки, а сверху и снизу – контактные площадки общего контакта катода. Две цилиндрические мезаструктуры расположены симметрично относительно центральной оси кристалла и соответствуют двум излучающим элементам.



Рис. 2. Изображение центральной области одного из изготовленных кристаллов ВИЛ в сканирующем электронном микроскопе

После контроля характеристик (пороговый ток, длина волны излучения, выходная мощность) выбирались кристаллы ВИЛ, отвечающие предъявляемым требованиям, которые использовались при изготовлении экспериментальных образцов источников лазерного излучения для компактного ЯМГ. Конструкция лазерного излучателя обеспечивает контроль температуры кристалла ВИЛ для подстройки длины волны излучения на спектральную линию D1 изотопа Cs133 и формирование выходного коллимированного пучка.

# Характеристики лазерных излучателей

Характеристики изготовленных лазерных излучателей были исследованы в диапазоне рабочих температур 20–90°С. Температура окружающей среды задавалась с помощью внешней схемы термостабилизации. Выходная оптическая мощность измерялась калиброванным измерителем оптической мощности PM100D (Thorlabs) с датчиком S130C. Спектр излучения измерялся с помощью анализатора оптического спектра AQ-6315A (Ando). Для контроля однородности поля излучения выходной пучок лазерного излучателя направлялся на матированный сапфир и регистрировался ИК-видеокамерой. Ширина линии ла-

Гироскопия и навигация. Том 26, №1 (100), 2018

зерной генерации измерялась с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо SA200-5В (Thorlabs). Измерения вольт-амперных характеристик и зависимостей выходной мощности излучения от тока накачки показали, что при уровне рабочих токов 3-4 мА и температурах 50-65°С выходная мощность для изготовленных лазерных излучателей превышает 1 мВт. При этом величина порогового тока не превышает 1 мА. Измерения спектров лазерной генерации подтвердили работу в пространственно-одномодовом режиме при токах накачки до 5 мА для всего диапазона рабочих температур. При этом из анализа измеренных зависимостей длины волны лазерной генерации от температуры было установлено, что для исследуемых образцов лазерных излучателей при рабочем токе 4 мА попадание в длину волны линии D1 Cs133 обеспечивается при температуре около 60°С. На рис. 3 приведены зависимости отношения интенсивности излучения в основной линейной поляризации к излучению в ортогональной поляризации от тока накачки (параметр OPSR), измеренные для одного из изготовленных лазерных излучателей при разных температурах. Для рабочих токов 3-4 мА и температурах до 50°С величина параметра OPSR превышает 20 дБ.



На рис. 4 приведена зависимость ширины линии лазерной генерации от тока накачки. При рабочих токах 3-4 мА, соответствующих выходной мощности более 1,0 мВт, ширина спектра лазерной генерации не превышает 50 МГц. По результатам измерений картин дальнего поля излучения кристаллов ВИЛ без использования коллимирующей линзы, выходной пучок имеет угловую расходимость менее 15° и форму, близкую к гауссовой. На рис. 5 приведено изображение пятна лазерного излучения на экране (пластинка матированного сапфира), удаленном от выходной линзы лазерного излучателя на расстояние 3 см. Зернистая структура изображения обусловлена рассеянием лазерного излучения на матированной поверхности сапсапфира. Видно, что размер пятна не превышает 2,1 мм при однородном поле засветки и резком крае профиля интенсивности, что подтверждает хорошее качество выходного коллимированного пучка.



Рис. 5. Форма пятна излучения на расстоянии 3 см от лазерного излучателя

# Заключение

Разработанные и экспериментально исследованные ВИЛ спектрального диапазона 895 нм с ромбовидной формой токовой апертуры и внутрирезонаторными контактами обеспечивают стабильную одномодовую генерацию с фиксированным направлением поляризации выходного излучения в диапазоне рабочих температур до 90°С и характеристики на уровне лучших известных аналогов (максимальная выходная мощность при температурах 50-65°C более 1 мВт, одномодовый режим генерации с фактором подавления ортогональной поляризации около 20 дБ, субмиллиамперные пороговые токи, ширина линии генерации менее 50 МГц). В отличие от известных конструкций поляризационностабильных ВИЛ с субволновой дифракционной решеткой или структурой фотонного кристалла в выходном зеркале, разработанная конструкция не требует использования литографии с субмикронным пространственным разрешением. На основе разработанных ВИЛ реализован источник лазерного излучения для перспективного компактного гироскопа на эффекте ядерного магнитного резонанса, обеспечивающий точную подстройку длины волны на спектральную линию D1 изотопа Cs133 и формирование коллимированного выходного пучка.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в изготовлении и исследовании экспериментальных образцов гетероструктур, кристаллов ВИЛ и лазерных излучателей: Ю. М. Задиранову, А. А. Блохину, Ю. А. Гусевой, С. Н. Малееву, С. И. Трошкову (ФТИ им. А. Ф. Иоффе); А. П. Васильеву, О. Н. Сараеву (НТЦ Микроэлектроники РАН); А. Ю. Егорову, Л. Я. Карачинскому (ООО «Коннектор Оптикс», Санкт-Петербург); А. С. Шуленкову (Минский НИИ радиоматериалов, Минск, Республика Беларусь); А. Г. Фефелову (ОАО «НПП «Салют», Нижний Новгород).

Гироскопия и навигация. Том 26, №1 (100), 2018

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Donley, E.A., Kitching, J.,** Nuclear magnetic resonance gyroscopes, *Optical magnetometry*, 2013, Cambridge University Press, Ch. 19, pp. 369–386.
- Serkland, D. K., Peake, G. M., Geib, K. M., Lutwak, R., Garvey, R.M., Varghese, M., Mescher, M., VCSELs for atomic clocks, Vertical-cavity surface-emitting lasers X, *Proc. SPIE* 2006, 6132, 613208.
- 3. **Zhong, W.,** Review of chip-scale atomic clocks based on coherent population trapping, *Chin. Phys. B.*, 2014, vol. 23, No. 3, p. 030601.
- Walker, T.G., Larsen, M.S., Spin-Exchange Pumped NMR Gyros, Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2016, v.65, pp.373–401.
- 5. Knapkewicz, P., Dziuban, J., Walczak, R., Mauri, L., Dziuban, P., Gorecki, C., MEMS Cesium Vapor Cell for European Micro-Atomic-Clock, Procedia Engineering, 2010, vol.5, pp.721–724.
- Chen, L., Zhou, B., Lei, G., Wu, W., Zhai, Y., Wang, Z., Fang, J., Effects of temperature on Rb and 129Xe spin polarization in a nuclear magnetic resonance gyroscope with low pump power, *AIP Advances*, 2017, 7, 115101.
- Michalzik, R., VCSELs, Fundamentals, technology and applications of vertical cavity surfaceemitting lasers, Springer, 2013.
- 8. **Mutig, A., Bimberg, D.,** Progress on high-speed 980 nm VCSELs for short-reach optical interconnects, Hindawi Publishing Corporation Advances in Optical Technologies 2011, 15.
- Choquette, K.D., Geib, K.M., Ashby, C.I.H., Twesten, R.D., Blum, O., Hou, H.Q., Follstaedt, D.M., Hammons, B.E., Mathes, D., Hull, R., Advances in selective wet oxidation of AlGaAs alloys, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3 (3), 916–926.
- Larsson, A., Advances in VCSELs for communication and sensing, *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics 17*, 2011, 1552–1567.
- 11. Tatum, J.A., Evolution of VCSELs, Proc. of SPIE 9001, 2013, 90010C.
- 12. www.pricetonoptronics.com.
- 13. www.laserinterprise.com.
- 14. Al-Samaneh, A., VCSELs for Atomic Clock Demonstrators, Annual Report 2013, Institute of Optoelectronis, Ulm University.
- 15. http://vixarinc.com/pdf/895S-0000-x002.pdf.
- Serkland, D.K., Geib, K.M., Peake, G.M., Lutwak, R., Rashed, A., Varghese, M., Tepolt, G., Prouty, M., VCSELs for atomic sensors, Vertical-cavity surface-emitting lasers XI, *Proc. SPIE*, 2007, 6484, 648406.
- 17. Wilmsen, C.W., Temkin, H., Coldren, L.A., Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization, and Applications, Cambridge University Press, 2001.
- Chang, Y.-C., Coldren, L.A., Efficient, High-Data-Rate, Tapered Oxide-Aperture Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, IEEE J. Selected Topics Quantum. Electron., 2009, 15, 704–715.
- Pickrella, G.W., Louderbacka, D.A., Fisha, M.A., Hindia, J.J., Lina, H.C., Simpsona, M.C., Guilfoylea, P.S., Lear, K.L., Compositional grading in distributed Bragg reflectors, using discrete alloys, in vertical-cavity surface-emitting lasers, Journal of Crystal Growth, 2005, 280, 54–59.
- Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М., Задиранов Ю.М., Васильев А.П., Блохин С.А., Шуленков А.С., Трошков С.И., Гладышев А.Г., Надточий А.М., Павлов М.М., Бобров М.А., Назарук Д.Е., Устинов В.М. Пространственно-одномодовые полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры с неплоским верхним распределенным брэгговским отражателем // ФТП, 2013. Т. 47. С. 985–989.
- 21. Блохин С.А., Малеев Н.А, Кузьменков А.Г., Устинов В.М. Патент РФ на изобретение №2611555, приоритет от 17.12.2015.
- 22. Verschuuren, M.A., Gerlach, P., van Sprang, H.A., Polman, A., Improved performance of polarization-stable VCSELs by monolithic sub-wavelength gratings produced by soft nano-imprint lithography, Nanotechnology, 2011, 22, 505201.
- Nazaruk, D.E., Blokhin, S.A., Maleev, N.A., Bobrov, M.A., Kuzmenkov, A.G., Vasil'ev, A.P., Gladyshev, A.G., Pavlov, M.M., Blokhin, A.A., Kulagina, M.M., Vashanova, K.A., Zadiranov, Yu.M., Fefelov, A.G., Ustinov, V.M., Single-mode temperature and polarisation-stable high-speed 850 nm vertical cavity surface emitting lasers, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2014, vol. 572, 1 ArtNo: #012036.
- Sakamoto, A., Nakamura, T., Nakayama, H., Fabrication control during AlAs oxidation of the VCSELs via optical probing technique of AlAs lateral oxidation (OPTALO), *Proc. of SPIE* 4649, 2002, 211–217.
- 25. Hadley, G.R., Effective index model for vertical-cavity surface-emitting lasers, *Opt. Lett.*, 1995, vol. 20, p. 1483–1485.

26. Блохин С.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Блохин А.А., Васильев А.П., Гусева Ю.А., Кулагина М.М., Карповский И.О., Задиранов Ю.М., Трошков С.И., Прасолов Н.Д., Брунков П.Н, Левицкий, В.С. Лисак В., Малеев Н.А., Устинов В.М. Исследования диэлектрических распределенных брэгговских отражателей для вертикальноизлучающих лазеров ближнего ИК-диапазона // ПЖТФ. 2016. Т. 42. С. 57–65.

**N.A.Maleev, S.A.Blokhin, M.V.Bobrov** (Ioffe Physico-Engineering Institute of the RAS, Russia), **A.G.Kuzmenkov** (RAS Scientific and Technological Center of Microelectronics and Submicron Heterostructures), **M.M.Kulagina** (Ioffe Physico-Engineering Institute of the RAS), **V.M.Ustinov** (RAS Scientific and Technological Center of Microelectronics and Submicron Heterostructures) Laser Source for Compact Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2018.

Laser Source for Compact Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2018. Vol. 26. No. 1 (100). P. 81–92.

*Abstract.* 895 nm vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with fixed output polarization have been developed. Lasers provide more than 1 mW single-mode output power at about 20 dB orthogonal polarization suppression ratio at operation temperature 60°C. The developed VCSELs were used in laser sources for perspective compact nuclear-magnetic-resonance gyroscope. Designed laser source provides precise wavelength tuning to the D1 line of Cs133 and collimated output beam.

Key words: laser source, compact gyroscope, nuclear magnetic resonance.

#### REFERENCES

- 1. E. A. Donley, J. Kitching, Nuclear magnetic resonance gyroscopes. In: Optical magnetometry. Cambridge university press, Ch. 19, pp. 369-386 (2013)
- D. K. Serkland, G. M. Peake, K. M. Geib, R. Lutwak, R.M. Garvey; M. Varghese; M. Mescher, VCSELs for atomic clocks, vertical-cavity surface-emitting lasers X, Proc. SPIE 6132, 613208 (2006)
- 3. W. Zhong, Review of chip-scale atomic clocks based on coherent population trapping, Chin. Phys. B., vol. 23, No. 3, 030601 (2014)
- T.G.Walker, M.S.Larsen, Spin-exchange pumped NMR gyros, Advances in atomic, molecular, and optical physics, v.65, pp.373-401 (2016)
- P.Knapkewicz, J. Dziuban, R. Walczak, L. Mauri, P. Dziuban, C. Gorecki, MEMS Cesium vapor cell for european micro-atomic-clock, Procedia engineering, vol.5, pp.721-724 (2010)
- L.Chen, B. Zhou, G. Lei, W. Wu, Y. Zhai, Z. Wang, J. Fang, Effects of temperature on Rb and 129Xe spin polarization in a nuclear magnetic resonance gyroscope with low pump power, AIP Advances, 7, 115101 (2017)
- 7. **R. Michalzik**, VCSELs, Fundamentals, technology and applications of vertical cavity surfaceemitting lasers, Springer (2013)
- 8. A. Mutig, D. Bimberg, Progress on high-speed 980 nm VCSELs for short-reach optical interconnects, Hindawi publishing corporation advances in optical technologies 2011, 15 (2011)
- K.D. Choquette, K.M. Geib, C.I. H. Ashby, R.D. Twesten, O. Blum, H. Q. Hou, D. M. Follstaedt, B.E. Hammons, D. Mathes, R. Hull, Advances in selective wet oxidation of AlGaAs alloys, IEEE J. Selected topics in quantum electronics. 3(3), 916–926 (1997)
- 10. A. Larsson, Advances in VCSELs for communication and sensing, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics 17, 1552–1567 (2011).
- 11. J.A. Tatum, Evolution of VCSELs, Proc. of SPIE 9001, 90010C (2013).
- 12. www.pricetonoptronics.com
- 13. www.laserinterprise.com
- 14. A.Al-Samaneh, VCSELs for Atomic clock demonstrators, Annual report 2013, Institute of optoelectronis, Ulm University
- 15. http://vixarinc.com/pdf/895S-0000-x002.pdf
- D. K. Serkland, K. M. Geib, G. M. Peake, R. Lutwak, A. Rashed, M.Varghese, G. Tepolt, M. Prouty, VCSELs for atomic sensors, Vertical-cavity surface-emitting lasers XI, Proc. SPIE 6484, 648406 (2007)
- 17. Carl W. Wilmsen, Henryk Temkin, Larry A. Coldren, Vertical-cavity surface-emitting lasers: design, fabrication, characterization, and applications, Cambridge university press (2001)
- Y-C. Chang, L.A. Coldren, Efficient, high-data-rate, tapered oxide-aperture vertical-cavity surface-emitting lasers, IEEE J. Selected topics quantum. Electron., 15, 704-715 (2009)

Гироскопия и навигация. Том 26, №1 (100), 2018

- G.W. Pickrella, D.A. Louderbacka, M.A. Fisha, J.J. Hindia, H.C. Lina, M.C. Simpsona, P.S. Guilfoylea, K.L. Lear, Compositional grading in distributed Bragg reflectors, using discrete alloys, in vertical-cavity surface-emitting lasers, Journal of Crystal Growth, 280, 54–59 (2005)
- N.A. Maleev, A.G. Kuz'menkov, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, A.P. Vasil'ev, S.A. Blokhin, A.S. Shulenkov, S.I. Troshkov, A.G. Gladyshev, A.M. Nadtochiy, M.M. Pavlov, M.A. Bobrov, D.E. Nazaruk, V.M. Ustinov, Single-spatial-mode semiconductor VCSELs with a nonplanar upper dielectric DBR, Semiconductors, vol.47, pp. 993-996 (2013)
- 21. Блохин С.А., Малеев Н.А, Кузьменков А.Г., Устинов В.М. Патент РФ на изобретение №2611555, приоритет от 17.12.2015
- 22. M.A.Verschuuren, P. Gerlach, H.A. van Sprang, A. Polman, Improved performance of polarization-stable VCSELs by monolithic sub-wavelength gratings produced by soft nano-imprint lithography, Nanotechnology 22, 505201 (2011)
- 23. D.E.Nazaruk, S.A.Blokhin, N.A.Maleev, M.A.Bobrov, A.G.Kuzmenkov, A.P.Vasil'ev, A.G.Gladyshev, M.M.Pavlov, A.A.Blokhin, M.M.Kulagina, K.A.Vashanova, Yu.M.Zadiranov, A.G.Fefelov, V.M.Ustinov, Single-mode temperature and polarisation-stable high-speed 850nm vertical cavity surface emitting lasers, J. Phys.: Conf. Ser., v.572, 1 ArtNo: #012036 (2014)
- 24. Akira Sakamoto, Takeshi Nakamura, Hideo Nakayama, Fabrication control during AlAs oxidation of the VCSELs via optical probing technique of AlAs lateral oxidation (OPTALO), Proc. of SPIE 4649, 211-217 (2002).
- G. R. Hadley, Effective index model for vertical-cavity surface-emitting lasers, Opt. Lett., Vol. 20. P.1483-1485 (1995).
- 26. S.A. Blokhin, M.A. Bobrov, A.G. Kuzmenkov, A.A. Blokhin, A.P. Vasil'ev, Yu.A. Guseva, M.M. Kulagina, I.O. Karpovsky, Yu.M. Zadiranov,S.I. Troshkov, N.D. Prasolov, P.N. Brunkov, V.S. Levitsky, V.Lisak, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, A study of distributed dielectric Bragg reflectors for vertically emitting lasers of the near-IR range, Tech. Phys. Lett., v.42, pp. 1049-1053 (2016).

Материал поступил 15.02.2018