

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

РГБ ОН  
10 НОЯ 1998

На правах рукописи

УДК 621.375

**ВАСИЛЬЕВ Сергей Викторович**

**СЛЕДОВАНИЕ ОДНОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА НА  
КРАСИТЕЛЕ С РЕШЕТКОЙ, УСТАНОВЛЕННОЙ В СХЕМЕ  
СКОЛЬЗЯЩЕГО ПАДЕНИЯ**

(01.04.21 – лазерная физика)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук



Москва – 1998

Работа выполнена в Отделе кинетики Института общей физики  
РАН.

Научный руководитель: зав. лабораторией В.А. Мишин.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
зав. лаб. В.А. Сычугов,  
доктор физико-математических наук,  
вед. н.с. М.А. Казарян.

Ведущая организация: Физический факультет МГУ.

Защита диссертации состоится «23» ноября 1998 г. в 15 час.  
заседании специализированного совета К.003.49.02 Института общей  
физики РАН по адресу: 117942, Москва, ул. Вавилова 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФАН.

Автореферат диссертации разослан «2» октября 1998 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

кандидат физ.-мат. наук



Т.Б. Воляк

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В настоящее время лазеры на красителях имеют многочисленные применения в научных и прикладных областях, например: медицине, стробоскопии, лидарной технике. При решении различных задач в области спектроскопии высокого разрешения от лазеров требуются такие характеристики как узкий контур генерации, высокая стабильность выходных параметров, а также возможность плавной (с точностью порядка ширины линии) перестройки частоты. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют лазеры на красителях, способные работать в одностороннем режиме (т.е. в режиме одной продольной и поперечной моды).

Одной из перспективных схем импульсных узкополосных лазеров на красителе является лазер с дифракционной решеткой, установленной под углом скользящего падения (т. н. GIG- резонатор)[1]. Схема GIG лазера приведена на рис. 1, резонатор образован зеркалами  $M1$ ,  $M2$  и дифракционной решеткой  $G$ , при этом решетка устанавливается под углом, порядка  $85 - 89^\circ$ , углом к падающему лучу. Длина волны генерации определяется соотношением

$$\lambda = \Lambda(\sin \theta + \sin \varphi), \quad (1)$$

$\lambda$  – длина волны излучения;  $\Lambda$  – период решетки;  $\theta$  – угол

---

Littman M.G. and Metcalf H.J. "Spectrally narrow pulsed dye laser without an expander." *Appl. Opt.* 17, 2224-2227 (1978).

падения излучения на решетку;  $\varphi$  – угол дифракции. Сканирование лазера осуществляется поворотом зеркала  $M2$  (изменением угла  $\varphi$ ). Вывод излучения происходит через зеркальный порядок решетки или через зеркало  $M1$ .

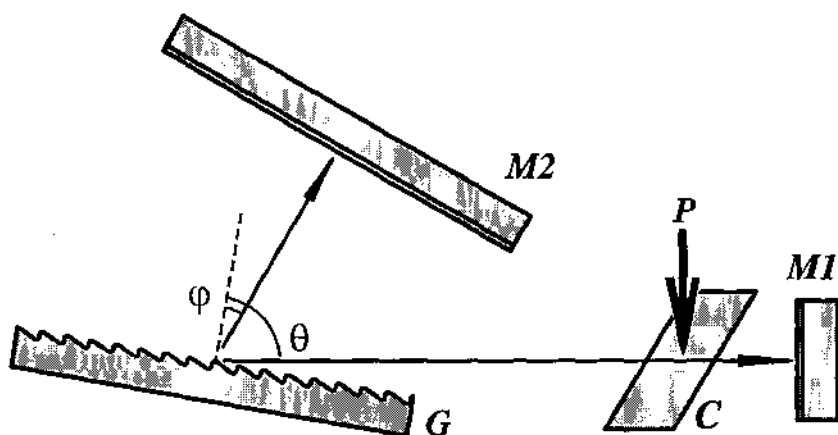


Рис. А Схема GIG резонатора:  $M1$ ,  $M2$  – зеркала;  $G$  – дифракционная решетка;  $C$  – кювета для красителя;  $P$  – излучение лазера накачки.

Из формулы для дифракционной решетки (1) легко получить выражение для ее угловой дисперсии:

$$D = \frac{d\psi}{d\lambda} = \frac{l}{\Lambda \cos \psi}, \quad (2)$$

где  $\psi$  – угол дифракции. В GIG резонаторе излучение дважды испытывает дифракцию. На прямом обходе угол дифракции равен  $\varphi$ , а на обратном –  $\theta$ , таким образом, дисперсия GIG резонатора при однократном проходе излучения описывается приближенной формулой

$$nG) \approx \frac{I}{\Lambda} \left( \frac{I}{\cos \varphi} + \frac{I}{\cos \theta} \right). \quad (3)$$

в приближении угла падения излучения на решетку к предельному значению  $\theta \rightarrow \pi/2 \Rightarrow \cos \theta \rightarrow 0$ , поэтому дисперсия GIG резонатора существенно увеличивается. Высокая дисперсия решетки, установленной в схеме скользящего падения, делает возможной работу лазера в узлоосном и даже одночастотном режиме без использования расширенной пучка и дополнительных внутрирезонаторных селекторов частоты.

Таким образом, основным преимуществом лазеров с GIG резонатором является предельная простота конструкции. Минимальное количество элементов, составляющих резонатор, позволяет, во-первых, значительно уменьшить его оптическую длину (увеличить межмодовый интервал), что облегчает достижение одночастотного режима работы, во-вторых, существенно упрощает управление лазером и повышает стабильность его характеристик. Существенным недостатком лазеров с GIG резонаторами является низкий КПД, что определяется крайне низкой дифракционной эффективностью существующих решеток, при больших (более  $89^\circ$ ) углах падения излучения. В настоящее время одночастотные лазеры с GIG резонатором не получили широкого распространения, однако высокая селективность и простота конструкции, присущие в GIG резонаторе, привлекают к этой схеме неослабевающее внимание исследователей. На основе GIG схемы реализованы несколько лазеров на красителе, но и перестраиваемые лазеры с

другими активными средами и источниками накачки, в частности дисковые лазеры[2] и лазеры на титанате сапфира[3].

Изучение работ, посвященных исследованию GIG лазеров, позволяет сформулировать несколько задач, пока не получивших решения.

- Не преодолен главный недостаток одночастотных лазеров с GIG резонатором – низкая эффективность генерации[4].
- Несмотря на большой объем фактического материала, не сформулированы критерии, позволяющие по заданным параметрам активного вещества и источника накачки, определить параметры GIG резонатора, обеспечивающие одночастотный режим работы лазера.
- Не выработаны методики, позволяющие проводить оптимизацию всего комплекса параметров GIG лазера, таких как

---

[2] Диодные GIG лазеры выпускаются промышленно компанией New Focus.

[3] *Bhabana Pati and Jacek Borysow. "Single-mode tunable Ti:sapphire laser over wide frequency range." Appl. Opt., Vol.36, No. 36, pp. 9337 – 9341 (1997)*

[4] Следует отметить работу [McKinnie, T., Berry, A.J., and King, T.A. "Stable efficient single-mode operation of a high repetition rate grazing incidence laser" *J. of Modern Opt.* 38, 1691-1701. (1991)], в которой сообщается о создании одночастотного GIG лазера, имеющего эффективность 12%. Однако авторы статьи не объяснили, как им удалось добиться такого результата. В последующих работах этих же авторов описываются GIG лазеры с более скромными характеристиками, например [David J. Binks, Lawrie A.W. Gloss, Terry A. King and Iain T. McKinnie, "Frequency locking of a pulsed single longitudinal-mode laser in a coupled-cavity resonator", *Appl. Opt.*, vol. 36, No. (1997)]

метрия активной зоны, длина резонатора, угол падения излучения на сетку, величина обратной связи в резонаторе и т. д..

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Основной задачей работы являлось изучение механизма возникновения одночастотной генерации в лазере на красителе с GIG резонатором. Важной частью работы стало создание экспериментального образца GIG лазера с оптимизированными параметрами.

### **НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ**

Впервые создана математическая модель лазерного резонатора с дифракционной решеткой, корректно описывающая механизм возникновения одночастотной генерации. Построенная модель позволяет сформулировать условия, необходимые для достижения одночастотной генерации и провести оптимизацию конструкции лазера.

Впервые предложена высокоэффективная дифракционная решетка для работы в схеме скользящего падения.

Создан образец одночастотного импульсного лазера на красителе с GIG резонатором, имеющего рекордные в своем классе характеристики.

Реализована схема одночастотного сканирования лазера на красителе.

Предложена и экспериментально реализована оптоволоконная система накачки одночастотного импульсного лазера.

Перечисленные результаты важны для таких практических применений как совершенствование источников излучения для спектроскопии высокого разрешения.

### **АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ**

Материалы настоящей диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах ИОФАН, 2-ой Всероссийской конференции по физико-химическим процессам при селекции атомов и молекул (Звенигород, сентябрь 1997), 2-ой Международной конференции по использованию лазеров в исследованиях экзотических ядер (Poznan' февраль 1997), конференции Laser Optics'98 (Санкт Петербург, июнь 1998).

Основные результаты работы опубликованы в 3-х статьях:

- **Васильев С.В., Кострица С.А. Мишин В.А.** «Исследование узла перестройки частоты одномодового лазера на красителе с решеткой в скользящем падении». ЖТФ, том 67, № 3, стр. 53 – 57 (1997).
- **Васильев С.В., Мишин В.А., Шаврова Т.В.** «Одночастотный лазер на красителе с оптоволоконной накачкой». Квантовая электроника, том 24, № 2, 131-133 (1997).
- **Васильев С.В.**, «Эффективная дифракционная решетка для работы в схеме скользящего падения». Квантовая электроника, том 25, № 4, 429-432 (1997).



## ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 185 страниц, включая 78 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

⇒ Во *введении* обосновывается актуальность темы, формулируются основные цели и результаты работы, описана структура и введено краткое содержание диссертации.

⇒ В *первой главе* диссертации проведен теоретический анализ резонаторов с пространственной дисперсией. Построены математические модели пустого и активного резонаторов. Распространение излучения в резонаторе описывалось в рамках приближения геометрической оптики. Для моделирования процессов, происходящих в активной зоне лазера, использовались балансные уравнения для молекул краеля и уравнения переноса для излучения. Задача решалась в квазициклонном приближении. Анализ проводился для двух наиболее распространенных типов резонаторов – с решеткой, установленной в коолимационном режиме (т.н. резонатор Хэнша), и с решеткой, установленной в схеме скользящего падения излучения (GIG резонатор).

Излучение в резонаторе рассматривалось как суперпозиция пучков, которые характеризовались следующими параметрами: частота, интенсивность, характерный поперечный размер, угловое и пространственное отклонения от оси резонатора. При распространении пучков внутри резонатора происходит изменение их

геометрических параметров. Дифрагируя на решетке, пучки с разными частотами приобретают различные угловые отклонения от оси резонатора, которые при распространении по резонатору переходят в пространственные. Пучки, имеющие частотную отстройку, вытесняются периферии резонатора и в меньшей степени усиливаются активной зоной. Уширение пучков, вызванное естественной расходимостью, приводит к их взаимному перекрытию и потере селективности. Одновременно с усилением в активной зоне происходит спонтанное рождение новых пучков с различными частотами.

Мы сможем определить распределение излучения в резонаторе после  $N$  круговых обходов по индукции, если выразим параметры каждого пучка на  $i+1$  обходе, через параметры для  $i$ -того обхода. В связи с этим математическая модель резонатора включала в себя:

- соотношения между геометрическими параметрами пучка до и после кругового обхода резонатора;
- выражения, описывающие изменение параметров пучка при проходе через активную зону;
- начальные параметры пучков, рождающихся в активной зоне.

Модель пассивного резонатора позволила проследить эволюцию излучения, представляющего собой суперпозицию пучков с различными частотами, интенсивностями и геометрическими характеристиками. В ходе исследования показано что:

- как в GIG резонаторе, так и в резонаторе Хэнша, в течение нескольких круговых обходов формируется стационарное распределение излучения;

Селективность GIG резонатора растет с увеличением угла падения излучения на дифракционную решетку и может значительно, в десятки раз, превосходить селективность резонатора Хэнша; существует оптимальное соотношение между длиной резонатора и диаметром активной зоны, при котором обеспечивается максимальная селективность.

На втором этапе исследования в модель были включены уравнения, описывающие взаимодействие излучения с раствором красителя. Это позволило учесть процессы спонтанного рождения и усиления излучения и проанализировать динамику развития узкополосного лазерного импульса из многочастотной спонтанной затравки.

Показано, что использование GIG резонатора позволяет достичь односторонней лазерной генерации. Селективность резонатора Хэнша существенно ниже, поэтому одночастотный лазер на основе этой схемы может быть реализован только при использовании дополнительных трирезонаторных селекторов частоты.

Сформулированы требования к конструкции GIG лазера, необходимые для достижения одночастотного режима генерации. Показано, что длина резонатора не должна превышать 5 – 7 см, угол падения на дифракционную решетку должен быть не меньше  $89^\circ$ , а ее эффективность составлять 20 – 40%. При этих условиях обеспечивается работа GIG лазера в режиме одной продольной моды с эффективностью генерации около 30%.

Эффективность существующих дифракционных решеток при

предельных углах падения значительно ниже требуемой. Введение GIG резонатор расширителя пучка с небольшим коэффициентом увеличения позволяет уменьшить угол падения излучения на решетку (увеличить ее эффективность), не теряя селективность резонатора. С помощью построенной модели, было проведено исследование и оптимизация G лазера со стандартной (металлической) дифракционной решеткой внутрирезонаторным расширителем пучка. Показано, что существуют оптимальное соотношение между углом падения на решетку и коэффициентом увеличения расширителя, обеспечивающие одночастотную лазерную генерацию с максимальной эффективностью.

⇒ Теоретическое исследование импульсного лазера с G резонатором показало, что дифракционная решетка является его ключевым элементом, определяющим как спектральные, так и энергетические характеристики лазера. Дифракционная эффективность существующих решеток при больших углах падения значительно ниже требуемой. В связи с этим во *второй главе* диссертации было проведено исследование свойств дифракционных решеток при установке в схеме скользкого падения (угол падения  $\theta \geq 89^\circ$ ).

В настоящее время разработаны эффективные методы численного решения задачи дифракции на решетке, поэтому в качестве инструмента исследования был выбран численный эксперимент. Дана математическая формулировка задачи дифракции на решетке. Приведен обзор литературы по методам ее решения. Изложены положения, использованных в работе методов, обсуждаются их

гоинства и недостатки. С помощью компьютерного моделирования, ведено исследование металлических дифракционных решеток (используются в настоящее время), диэлектрических дифракционных решеток, комбинированной структуры, состоящей из диэлектрической решетки и металлического зеркала.

Результаты исследования позволяют заключить, что основнойчиной, ограничивающей эффективность металлических решеток в видимом диапазоне спектра является поглощение излучения металлом. Обычно резко поглощение проявляется в тех случаях, когда взаимодействие излучения с решеткой имеет резонансный характер (т.н. анони Вуда). Такая ситуация имеет место при установке решетки в схеме скользящего падения. Таким образом, при углах падения более  $89^\circ$  и малом уровне поглощения  $<5\%$ , эффективность металлических решеток в видимом диапазоне не превышает  $10 - 15\%$ .

Эффективность решетки, установленной в схеме скользящего падения, может быть существенно увеличена при замене металла диэлектриком. Как показало проведенное исследование, возможность резонансного взаимодействия излучения с диэлектрической решеткой сохраняется, дифракционная эффективность может достигать значений близких к  $100\%$ , а поглощение – отсутствует.

Авторами работы<sup>[5]</sup> была предложена комбинированная структура, состоящая из диэлектрической дифракционной решетки и зеркала (рис. 2). Зеркало служит для возврата прошедшего через решетку излучения обратно в зону дифракции, а промежуточный слой диэлектрика обеспечивает согласование фаз. Перспективность этой схемы подтверждается работой<sup>[6]</sup>, в которой сообщается о создании решеток подобного типа, имеющих рекордно высокую эффективность, при установке в автоколлимационном режиме.



Рис. 2. Схема комбинированной дифракционной решетки: C — диэлектрическая решетка;  $\Delta$  — согласующий диэлектрический слой; M — металлическое зеркало; B — подложка.

В настоящей диссертации методами численного эксперимента исследована комбинированная структура, состоящая из диэлектрической дифракционной решетки и металлического зеркала. Проведенные расчеты показали, что дифракционная эффективность комбинированной решетки при углах скользящего падения, может достигать 80%, что 4 – 6 раз превышает эффективность

<sup>[5]</sup> Свахиц, А.С., Свуглов, В.А., Тихомиров, А.Е. «Эффективные дифракционные элементы для волн TE-поляризации». ЖТФ, том 61, № 9, стр. 124-129 (1991)

<sup>[6]</sup> Perry, M.U., Boud, R.D., Britten, J.A., Decker, D., Shore, B.W., Shannon, Sults, E. "High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings". Optics Lett. vol.20, No 8, April 15, 940-942 (1995)

диционных металлических решеток. Спектральный диапазон, в котором решетка сохраняет высокую эффективность составляет 20 – 80 нм, а уровень поглощения не превышает 5%. При выборе параметров бинированной решетки (материалы решетки и зеркала, профиль пика) особое внимание уделялось возможности ее практической реализации. Использование GIG резонаторов с такими решетками позволит существенно улучшить характеристики одночастотных импульсных лазеров.

⇒ В *третьей главе* диссертации описаны особенности конструкции экспериментального лазера на красителе, построенного для проверки полученных теоретических результатов, и изложены результаты проведенных экспериментов.

Обсуждаются различные способы накачки лазера на красителе.

Исследуются различные схемы сканирования частоты GIG лазера.

С учетом проведенного анализа конкретизируются параметры резонатора и конструкция GIG лазера на красителе со стандартной решеткой.

Описаны методика и результаты экспериментального исследования построенного лазера.

Особенностями построенного лазера являются предельно компактный дизайн и использование оптического волокна для ввода излучения накачки. Длину резонатора удалось сократить за счет использования оригинальной конструкции кюветы для красителя и использования миниатюрного расширителя пучка, объединенного с дифракционной решеткой. Оптоволоконная накачка позволила жестко локализовать

размеры и положение активной зоны лазера относительно элементов резонатора, что является исключительно важным для достижения устойчивой одночастотной генерации. При использовании оптоволоконного ввода геометрия активной зоны становится независимой от характеристик и типа лазера накачки, а лазер накачки и лазер на красителе развязываются механически.

Возможность прецизионной настройки частоты является одним из основных требований, предъявляемых к лазерам на красителе. Для плавного сканирования частоты необходимо синхронизировать изменение длины волны излучения и оптической длины резонатора так, чтобы избежать перескока лазерной моды. Использование GIG резонатора позволяет реализовать механизм плавного сканирования не усложняя конструкцию лазера. В диссертации проведен теоретический анализ различных схем плавного сканирования GIG лазера. Показано, что согласование расположения элементов резонатора с точностью 0.1 мм позволяет избежать перескока моды при сканировании частоты в диапазоне около  $500 \text{ см}^{-1}$ . С учетом проведенного анализа, механизм плавного сканирования частоты GIG лазера был реализован экспериментально. Диапазон, в котором перестройка частоты лазера происходила без перескока моды достигал  $100 \text{ см}^{-1}$ .

Для исследования построенного лазера были проведены следующие эксперименты.

- Исследованы характеристики оптоволоконной системы накачки лазера на красителе.



Исследованы характеристики GIG лазера при работе в многомодовом режиме.

Получена устойчивая одночастотная генерация лазера.

Исследованы энергетические и спектральные характеристики одночастотного GIG лазера при работе на различных красителях.

Эксперименты показали, что использование оптоволоконной насадки, позволяет сформировать в растворе красителя активную зону вильной цилиндрической формы длиной несколько миллиметров и ерчным диаметром примерно равным диаметру волокна.

Сопоставление характеристик экспериментального лазера с результатами теоретических расчетов подтвердило корректность построенных в теоретическом разделе диссертации моделей и позволило уточнить значения некоторых спектральных констант красителя РН-45 (Роданин 6Ж).

Измерения показали, что эффективность генерации лазера в одностотном режиме при использовании красителя Родамин 6Ж преала 6%, что является рекордом для лазеров этого типа. Ширина стра излучения была близка к пределу Фурье. Амплитуда резких ков частоты не превышала 50 МГц. Измерения выходной мощности ирины диапазона сканирования одночастотного GIG лазера были ведены для красителей РН-41, РН-45, РН-50, Keton Red, R640, DCM с смесей. В качестве растворителей использовались этиловый спирт дно-спиртовая смесь.

При накачке зеленой линией лазера на парах меди (510.6 нм) устойчивая одночастотная генерация была получена в диапазоне 535 – 600 нм.

⇒ В *заключении* диссертации сформулированы результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Построена математическая модель и исследован механизм возникновения одночастотной генерации в импульсном лазере на красителе с GIG резонатором. Сформулированы требования к конструкции G лазера, необходимые для достижения одночастотного режима генерации.

Показано, что длина резонатора не должна превышать  $5 - 7 \lambda$ , угол падения на дифракционную решетку должен быть не меньше  $8^\circ$  и ее эффективность составлять 20 – 40%.

Поскольку эффективность существующих дифракционных решеток при предельных углах падения значительно ниже требуемой, было проведено исследование и оптимизация GIG лазера со стандартной (металлической) дифракционной решеткой и внутрирезонаторным расширителем пучка. Показано, что существует оптимальное соотношение между углом падения на решетку и коэффициентом увеличения расширителя, обеспечивающие одночастотную лазерную генерацию с максимальной эффективностью.

Методами численного эксперимента проведено исследование свойств дифракционных решеток при установке в схеме скользящего

ения. Показано, что в оптическом диапазоне спектра эффективность аллических решеток ограничена за счет резонансного поглощения. : углах падения более  $89^0$  и приемлемом уровне поглощения  $<5\%$ , эффективность металлических решеток в видимом диапазоне не пре- иает  $10 - 15\%$ .

Показано, что эффективность решетки, установленной в схеме пзьящего падения, может быть существенно увеличена при замене алла диэлектриком. Возможность резонансного взаимодействия из- нения с диэлектрической решеткой сохраняется при этом дифракци- ая эффективность может достигать значений близких к  $100\%$ .

Проведено исследование комбинированной структуры, состоящей (иэлектрической решетки и металлического зеркала. Использование ой схемы позволяет реализовать на практике преимущества диэлек- еских решеток. Показано, что дифракционная эффективность ком- ированной решетки при углах скользящего падения, превышает эф- тивность традиционных металлических решеток в  $4 - 6$  раз.

\* \* \*

С помощью построенной теоретической модели была проведена имизация параметров GIG лазера со стандартной решеткой и расши- елем пучка. Экспериментальный лазер, разработанной на основе по- енных результатов, при работе в одночастотном режиме, имел эф- тивность более  $6\%$ , что является рекордом для лазеров этого типа.

Результаты измерений характеристик экспериментального лазера находятся в хорошем согласии с теоретическими расчетами, что говорит о корректности построенной математической модели GIG лазера.

Разработанные методики и модели позволяют проводить исследование и оптимизацию различных типов импульсных лазеров. В результате проведенного исследования создан лазер на красителе с рекордными характеристиками. Основными достоинствами лазера являются простая конструкция, высокая эффективность, близкая к идеальному Фурье ширина линии генерации и возможность плавного сканирования частоты. Предлагаемый лазер может использоваться как для научных исследований в области спектроскопии высокого разрешения так и в качестве задающего генератора технологических лазерных систем большой мощности.