

## КОЛЬЦЕВЫЕ ЧИП ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

Ю. П. МАЧЕХИН, Д. Н. ПРИХОДЬКО

В данной статье приведены результаты теоретического анализа конструктивных особенностей монолитных кольцевых твердотельных лазеров, позволяющих осуществлять стабилизацию частоты излучения по резонансам насыщенного поглощения в парах молекулярного йода.

The paper presents the results of theoretical analysis of design peculiarities of monolithic ring solid-state lasers enabling to perform the stabilization of radiation frequency by resonances of saturated absorption in molecular iodine vapour.

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодняшний уровень лазерного приборостроения и лазерных технологий, о которых можно говорить как о самостоятельных областях техники, в значительной степени зависит от характеристик и параметров используемых лазеров. Созданные почти 20 лет назад твердотельные лазеры с полупроводниковой накачкой представляют собой значительное достижение в области лазерной физики и техники. Прогресс в развитии этих лазеров связан с решением двух задач: во-первых, за счет успешного развития одномодовых полупроводниковых лазеров с высоким уровнем выходной мощности, которые обеспечивают накачку твердотельных лазеров непосредственно на линии поглощения активной среды, во-вторых, активные среды стали изготавливаться с большой концентрацией активаторов, что обеспечило резкое увеличение КПД лазеров. Достижения в развитии твердотельных лазеров позволили решить задачу обеспечения лазерных технологий мощными, компактными лазерами. Линейные и дисковые чип лазеры уже прочно заняли место технологических лазеров, мощности излучения которых уже перевалила за 1 кВт [1]. В этой связи, для решения многочисленных задач в последние годы существенно расширилась номенклатура чип лазеров [3].

Другая задача, которая находится в настоящее время в активной фазе ее решения, связана с современным приборостроением [4]. Для этой области применения лазеров принципиально важным являются такие характеристики лазерного излучения, как одночастотность и одномодовость спектра излучения, частотная и амплитудная стабильность, а также устойчивость поляризации излучения [5]. Например, развитие нанотехнологий, обеспечивающих управление пространственным положением и скоростью движения отдельных атомов и молекул (в том числе и лазерное охлаждение), как правило, базируются на применении лазерного излучения, характеризуемом высоким уровнем стабильности и воспроизводимости частоты. Другим, не менее интересным и важным направлением развития лазерного приборостроения является создание компактных малогабаритных оптических стандартов частоты на базе стабилизированных лазерных источников. В этой связи,

преимущество твердотельных лазеров перед газовыми и полупроводниковыми было всегда очевидным, поскольку естественная ширина линии и пассивная стабильность частоты излучения были на несколько порядков выше, чем у остальных типов лазеров. Однако, пока твердотельные лазеры с ламповой накачкой обладали сложной конструкцией резонатора, требовали водяное охлаждение и высокоэнергетичные лампы накачки, их использование ограничивалось только лазерными обрабатывающими технологиями и импульсными лидарами. Ситуация принципиально изменилась, когда твердотельные лазеры превратились в компактные устройства, обладающие высокой пассивной стабильностью, высокой степенью миниатюризации и стали называть чип лазерами. Такое существенное изменение характеристик твердотельных лазеров произошло после замены ламп накачки полупроводниковыми лазерами.

В основе первых конструкций твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой лежала идея набора дискретных элементов (зеркала, активный элемент, несущая конструкция резонатора и т.д.). На этапе первых экспериментов такой подход был оправдан, он позволял в широких пределах варьировать параметрами основных компонентов лазеров и изучать частотные и амплитудные характеристики спектра излучения таких лазеров. После того, как начальные исследования позволили сделать выводы о потенциальной возможности применения этих лазеров, актуальным стал вопрос — какие конструкции лазеров могут быть предпочтительными для практического применения в различных областях. И в первую очередь необходимо было решить вопрос стабильности конструкции таких лазеров. Одним из радикальных путей повышения стабильности конструкции чип лазеров стал переход к монолитным кольцевым лазерам с монохроматической накачкой. Все грани резонатора, кроме одной, обеспечивают полное внутреннее отражение для волн, формирующих излучение генерации лазера. Одна грань имеет сферическую поверхность и позволяет реализовывать конфигурацию устойчивого резонатора.

Конечно, нельзя утверждать, что все как научные, так и инженерные задачи по созданию твердотельных чип лазеров (ТЧЛ) уже решены и усло-

вия их применения очевидны. В настоящее время активно проводится изучение ТЧЛ на основе двух конструкций резонаторов – линейных и кольцевых. Причем у каждого типа этих лазеров имеются свои принципиальные физические и конструктивные особенности и преимущества.

Создание стандартов оптической частоты на основе линейных ТЧЛ и их применение в прецизионной технике было первым шагом в развитии стабилизированных лазеров на основе ТЧЛ. Во всех публикациях, о создании стабилизированных по частоте линейных ТЧЛ, в качестве естественных частотных реперов использовались линии поглощения в парах молекулярного йода. Использование йода обусловлено в первую очередь тем, что тонкая и сверхтонкая структура его линий поглощения во всем видимом диапазоне, начиная от 500 нм и до 800 нм, хорошо изучена. Во-вторых, активные среды, используемые в ТЧЛ, обеспечивают генерацию излучения на длинах волн в интервале от 1064 нм и до 1320 нм, вторые гармоники которых совпадают с линиями поглощения молекулярного йода, находящихся в диапазоне 500 – 650 нм. По этой причине, все известные системы стабилизации частоты излучения линейных ТЧЛ используют вторую гармонику оптического излучения [6].

При всей очевидной перспективности использования кольцевых ТЧЛ эти лазеры пока не получили должного развития как источники высокостабильного излучения, в котором реализована стабилизация оптической частоты по естественным частотным реперам.

О создании оптического стандарта частоты на базе кольцевого одночастотного Nd<sup>3+</sup>:YAG с диодной накачкой и внутррезонаторным удвоением частоты было сообщено в [7]. Для стабилизации частоты использовалась люминесцентная поглощающая ячейка с молекулярным йодом. Особенность разработанной конструкции заключалась в использовании резонатора, выполненном на дискретных элементах в не планарном варианте. Достигнутые величины стабильности частоты (относительная долговременная стабильность частоты за 200 с менее 10<sup>-14</sup>) предполагают использование этого стандарта частоты в качестве вторичного эталона единицы частоты (длины волны). Основным недостатком разработанной конструкции стандарта частоты заключается в его больших габаритах и соответственно в возможности его применения только в стационарных условиях. Кольцевые ТЧЛ из дискретных элементов имеют пассивную стабильность частоты излучения в пределах 100 кГц. Дальнейшее уменьшение ширины спектра генерации связано с использованием активных систем автоподстройки частоты излучения.

Перспективность использования кольцевых ТЧЛ, для создания стабилизированного по частоте лазера, связана с развитием монолитных конструкций ТЧЛ. В этом случае управление поведением частоты излучения можно осуществлять

путем изменения амплитудно-частотных характеристик излучения накачки.

С другой стороны, в кольцевых лазерах могут реализовываться очень сложные частотные режимы генерации. К ним, например, относятся автомодуляционные режимы, характеризующиеся как динамический хаос [8]. Такие режимы генерации могут представлять серьезную трудность при стабилизации частоты этих лазеров по внешним оптическим частотным реперам. В тоже время, разработчики и исследователи ТЧЛ высказывают мнение, что благодаря высокой пассивной стабильности частоты излучения монолитных кольцевых лазеров, они могут быть более эффективными, чем линейные лазеры при создании стандартов частоты [9]. Поэтому, использование монолитных кольцевых ТЧЛ в режиме стабилизации частоты находится пока еще в стадии исследований. В этой связи, целью настоящей работы были исследование условий генерации монолитного кольцевого ТЧЛ, при которых можно осуществить стабилизацию частоты по внешнему оптическому реперу, а именно по линиям поглощения в парах молекулярного йода.

## 1. ОСОБЕННОСТИ МОНОЛИТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ТЧЛ

К монолитным кольцевым ТЧЛ обычно относят конструкции, которые представляют собой интегральный элемент, совмещающий функции активного элемента, кольцевого резонатора и невзаимного элемента. Активный элемент лазера выполняется из высококачественного, без локальных неоднородностей, монокристалла активного вещества. В табл. 1 приведены широко используемые при создании ТЧЛ активные среды, длины волн излучения полупроводниковых лазеров, используемых для накачки, а также длины волн генерации [10].

Таблица 1

Характерные особенности некоторых типов активных сред ТЧЛ

Длина волны накачки, нм	Активная среда	Длина волны излучения, нм	Вторая гармоника, нм	Линии поглощения молекулярного йода
940,5	Yb: YAG	1031	515	R(51) 68-0
808,5	Nd: YAG	1064	532	R(57) 32-0
807,5	Nd: LSB	1063	531,5	R(54) 32-0
808	Nd:YVO <sub>4</sub>	1064	532	R(56) 32-0

Для всех приведенных длин волн вторых гармоник существуют линии поглощения молекулярного йода. В работах по созданию высокостабильных монолитных кольцевых лазеров, особое внимание уделяется активной среде YAG: Nd<sup>3+</sup> [9]. Эта активная среда обладает хорошими спектрально-люминесцентными характеристиками и полосой поглощения в удобном для накачки спектральном диапазоне. Высокая оптическая

однородность, теплопроводность, высокая твердость и малый коэффициент линейного расширения обеспечили прекрасные эксплуатационные характеристики этой активной среде. Другим примером активной среды для линейных и кольцевых лазеров является Yb: YAG [8,9].

Эффективность использования лазерной накачки для твердотельных лазеров, в первую очередь, определяется шириной спектра излучения полупроводникового лазера (ПЛ) и совпадением центральной длины волны излучения ПЛ с центром линии поглощения активной среды ТЧЛ, ширина которой составляет величину около 4 нм. Эффективность накачки может быть выше 80%, поскольку использование монохроматического излучения лазерного диода позволяет селективно возбуждать рабочий уровень активного элемента твердотельного лазера. Лазеры, используемые для накачки, как правило, работают в одночастотном режиме генерации со спектральной шириной излучения не более 1 нм. Накачка должна обеспечивать возбуждение и устойчивую генерацию основной поперечной моды резонатора –  $TEM_{00}$ . Для этого необходимо добиваться согласования объемов генерируемой основной моды с объемом пучка излучения накачки. В этой связи, конструкция и размеры резонатора являются исходными параметрами для расчета оптики, формирующей пучок накачки.

Резонатором кольцевого ЧТЛПН является сложная многогранная призма – это форма активного элемента. Грани призмы, отражающие, под углом полного внутреннего отражения, обеспечивают замкнутую траекторию распространения генерируемого пучка излучения. Реализация режима бегущей волны в кольцевом лазере осуществляется с помощью эффекта Фарадея. Наряду с оптическими схемами резонатора, в которых лучевой контур лежит в одной плоскости (планарный кольцевой резонатор, см. рис. 1 б), существуют резонаторы, в которых лучевой контур размещается в пространстве (не планарный кольцевой резонатор рис. 1 а, в).

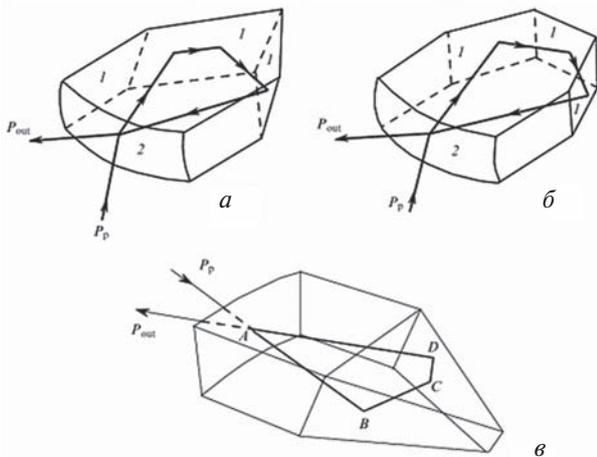


Рис. 1. Конструкции кольцевых ТЧЛ:  
 а – распространяющиеся лучи в резонаторе лежат в одной плоскости; б, в – распространяющиеся лучи в резонаторе лежат в нескольких плоскостях.  
 $P_p$  – накачка,  $P_{out}$  – выходное излучение

Одна из поверхностей призмы имеет сферическую форму. Использование сферического зеркала обеспечивает формирование такого устойчивого резонатора ТЧЛ, в котором каустика основной моды генерируемого излучения может хорошо согласовываться со сходящимся пучком излучения накачки. Любое пространственное рассогласование пучка накачки и основной моды резонатора приводит к условиям возбуждения поперечных мод высших порядков ТЧЛ.

Для обеспечения условий устойчивости резонатора кольцевого ТЧЛ необходимо правильно сформировать из монокристалла активной среды многогранную призму, обеспечивающую замкнутый лучевой контур. На рис. 2 показан один из вариантов рассчитываемой конструкции кольцевого резонатора. Пунктирной линией обозначен ход луча, который, отражаясь от граней  $S1, S2, S3$  под углом полного внутреннего отражения и после полного прохода по замкнутому контуру, попадает в ту же точку  $M$ , из которой вышел. Потери в резонаторе, связанные с отражением от граней резонатора, будут стремиться к минимуму, если сечение основной моды будет полностью помещаться на гранях призмы.

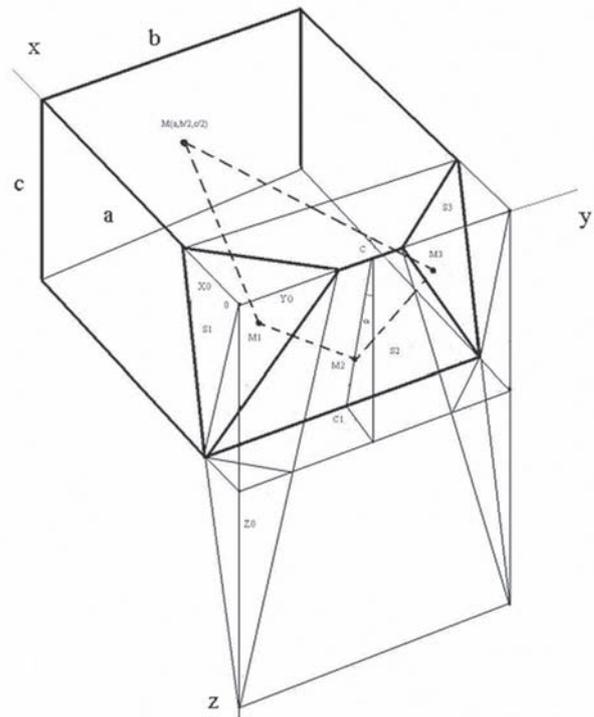


Рис. 2. Схема расчета кольцевого резонатора ТЧЛ

Следует отметить, что разработанный метод расчета кольцевого резонатора использует угол полного внутреннего отражения, который определяется показателем преломления используемой активной среды. В предложенной модели углы полного отражения от передней грани  $\alpha_2$  и от боковых граней  $\alpha_1$  можно задавать отдельно, учитывая значение угла полного отражения для данного кристалла.

Анализируя приведенный рисунок, можно сказать, что угол между плоскостью  $S2$  и прямой  $M1M2$  можно уменьшать до тех пор, пока отражаемое от этой грани пятно генерируемой моды

находится на ней же, в противном случае будут резко увеличиваться потери. Но в то же время, при уменьшении этого угла, достигается уменьшение области, отсекаемой плоскостью  $S1$ . На плоскостях  $S1$  и  $S3$  также должно выполняться условие, что модовые пятна должны помещаться в окрестности точки отражения  $M1$  и  $M3$ . Таким образом, при выборе точки отражения  $M2$  и расчете точек  $M1$  и  $M3$  учитывались вышеуказанные условия.

При задании исходных параметров для расчетов учитывались следующие условия. Плоскость  $S2$  задается двумя параметрами: расстоянием от оси  $z$  до её верхней линии сечения ( $zf$ ) и углом ее наклона к боковой грани ( $\alpha$ ). При этом, точка отражения  $M2$  ( $x2, y2, z2$ ) лежит на отрезке  $CC1$ , а координаты по оси  $Z$  задавались произвольно, обеспечивающими оптимизацию. Грани  $S1, S3$  являются симметричными, и поэтому полный расчет пространственной конфигурации сводился к вычислению одной из граней (в нашей задаче  $S1$ ). При выборе исходных данных нужно учитывать размеры каустик на гранях, которые в некоторых случаях могут выходить за пределы отражающих граней (дальнейшие модификации программы смогут автоматически учитывать размеры каустик).

Полный расчет траектории прохождения центрального луча в призме начинался с выбора начальной точки  $M(a, b/2, c/2)$ , где  $a, b, c$  – линейные размеры заготовки кристалла. Поставленная задача решалась в два этапа. Сначала устанавливались координаты точки  $M1$  ( $x1, y1, z1$ ). Затем находилось уравнение плоскости, которая проходит через точку  $M1$  и удовлетворяет условию полного внутреннего отражения. При нахождении координат точки отражения от грани  $S1$  решалась система уравнений:

$$\begin{cases} (c - zf) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot mx + (c - zf) \cdot mz = 0, \\ \cos(90 - \alpha) = \frac{y2 - y1}{\sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2 + (z2 - z1)^2}}, \\ \cos(2 \cdot \alpha) = \frac{nx \cdot mx + ny \cdot my + nz \cdot mz}{\sqrt{nx^2 + ny^2 + nz^2} \cdot \sqrt{mx^2 + my^2 + mz^2}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $mx, my, mz$  координаты вектора  $\overline{M2M1}$ ,  $nx, ny, nz$  координаты вектора  $\overline{MM1}$ .

Нахождение вектора нормали к плоскости полного внутреннего отражения было осуществлено при решении системы уравнений (2). Решая систему уравнений (2), получим значения координат вектора нормали к отражающей плоскости  $A, B, C$ :

$$\begin{cases} y = \frac{b}{2} \\ x - x1 = tx, y - y1 = ty, z - z1 = tz, \\ \cos \alpha = \frac{|tx \cdot nx + ty \cdot ny + tz \cdot nz|}{\sqrt{tx^2 + ty^2 + tz^2} \cdot \sqrt{nx^2 + ny^2 + nz^2}}, \\ \cos \alpha = \frac{|tx \cdot kx + ty \cdot ky + tz \cdot kz|}{\sqrt{tx^2 + ty^2 + tz^2} \cdot \sqrt{kx^2 + ky^2 + kz^2}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $kx, ky, kz$  координаты вектора  $\overline{M1M2}$ .

Уравнение искомой плоскости будет иметь вид

$$A \cdot (x - x1) + B \cdot (y - y1) + C \cdot (z - z1) = 0. \quad (3)$$

Зная уравнение плоскости (3) можно найти отрезки, которые отсекает плоскость от граней заготовки кристалла

$$X0 = \frac{D}{A}, Y0 = \frac{D}{B}, Z0 = \frac{D}{C}, \quad (4)$$

где  $D = A \cdot x1 + B \cdot y1 + C \cdot z1$ .

Таким образом, для создания конфигурации кольцевого резонатора необходимо у исходного кристалла фронтальную плоскость срезать на расстоянии  $zf$  от оси  $z$  до её верхней линии сечения и под углом  $\alpha$  к боковой грани. Боковые плоскости срезаются симметрично под углом  $\operatorname{arctg}(Y0/Z0)$  проходя через точки  $X0$  и  $Y0$ .

Окончательные расчеты резонатора связаны с выбором радиуса торцевой сферической поверхности, который в свою очередь определяется из условия совмещения каустики пучка накачки и пучка генерируемого излучения.

## 2. РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ ТЧЛ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СТАБИЛИЗАЦИЮ ПО ЛИНИЯМ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЙОДЕ

Анализируя условия генерации в кольцевых монолитных лазерах, необходимо первоначально обратить внимание на условия генерации в линейных ТЧЛ. Эти лазеры, как правило, формируются из дискретных элементов. Длина активной среды, используемая в линейных ТЧЛ, выбирается из условия максимального поглощения мощности накачки. Практически вся вводимая мощность накачки поглощается активной средой ТЧЛ на длине около 5 мм. Сверхтонкие линии поглощения в парах молекулярного йода обычно регистрируют в условиях насыщенного поглощения во внешней ячейке. Эти условия достигаются при воздействии на поглощающую среду двух встречных волн. Одна из них мощнее другой и является насыщающей волной. Другая волна называется пробной и обеспечивает регистрацию насыщенной линии поглощения. В линейном лазере реализуется оптическая схема, приведенная на рис. 3. Волна излучения проходит через поглощающую среду, насыщает ее и, отразившись от зеркала с коэффициентом отражения меньше 1, проходит через ячейку как пробная волна. Управление частотой осуществляется путем изменения длины резонатора с помощью пьезоэлемента. С помощью этого же элемента осуществляется поисковая модуляция длины резонатора.

В отличие от линейных ТЧЛ, у которых режим одночастотной генерации достигается путем выбора длины резонатора, в кольцевых ТЧЛ длина резонатора влияет на генерацию по значительно сложному закону. Кроме того, в них могут развиваться различные режимы генерации, в том числе и хаотические, которые представляют собой динамический хаос. Из наиболее интересных режимов генерации, для задач стабилизации час-

тоты, можно выделить два. Первый – одночастотный режим бегущей волны и второй – режим генерации двух встречных волн с одинаковыми частотами, но разными амплитудами. Излучение кольцевого ТЧЛ в режиме одной бегущей волны (рис. 4) можно использовать для взаимодействия с поглощающей средой таким же образом, как и в случае линейного лазера. В работе [7] представлен оптический стандарт частоты, выполненный на дискретных элементах кольцевого Nd:YAG лазера. Частота излучения этого лазера стабилизировалась по линиям насыщенного поглощения в молекулярном йоде. Одночастотное излучение, также как и в случае линейного лазера, использовалось как для насыщения, так и для регистрации резонансов насыщенного поглощения. Несмотря на кажущуюся простоту режима бегущей волны, динамика генерации ТЧЛ достаточно сложна. Невозможно подавить одну волну без ухудшения условий генерации для другой волны. Кроме того, в ТЧЛ в режиме бегущей волны существуют релаксационные колебания. Частоты этих колебаний находятся в области сотен кГц, однако они оказывают существенное влияние на автомодуляционные процессы.

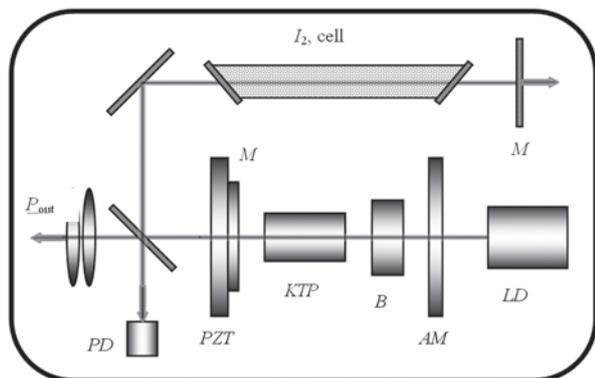


Рис. 3. Твердотельный линейный чип лазер с йодной ячейкой для стабилизации частоты излучения: *AM* – активная среда Nd:YVO<sub>4</sub>; *LD* – полупроводниковый лазер накачки; *B* – прозрачная пластина под углом Брюстера; *KTP* – нелинейный кристалл; *M* – выходное зеркало; *PZT* – пьезоэлемент; *I<sub>2</sub>* – йодная ячейка; *PD* – фотодетектор

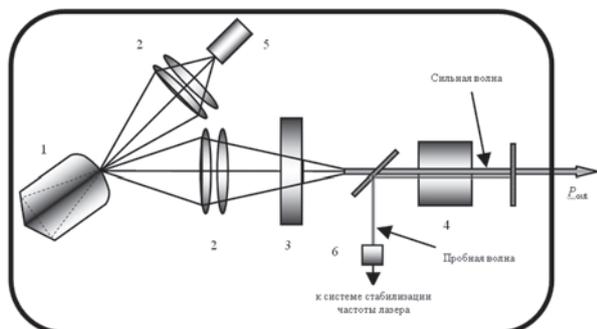


Рис. 4. Оптическая схема монолитного кольцевого ТЧЛ, работающего в режиме бегущей волны: 1 – активная среда чип лазера; 2 – коллимирующая оптика; 3 – кристалл КТР; 4 – кювета с йодом; 5 – полупроводниковый лазер; 6 – фотодетектор

Перспективным, для создания стабилизированного по частоте монолитного кольцевого лазера, является стационарный режим генерации встречных волн с вырожденными частотами и неравными интенсивностями излучения. При таком режиме генерации, когда частоты встречных волн равны, а интенсивности оказываются неравными и не зависящими от времени, оптическая схема лазера может иметь вид, представленный на рис. 5.

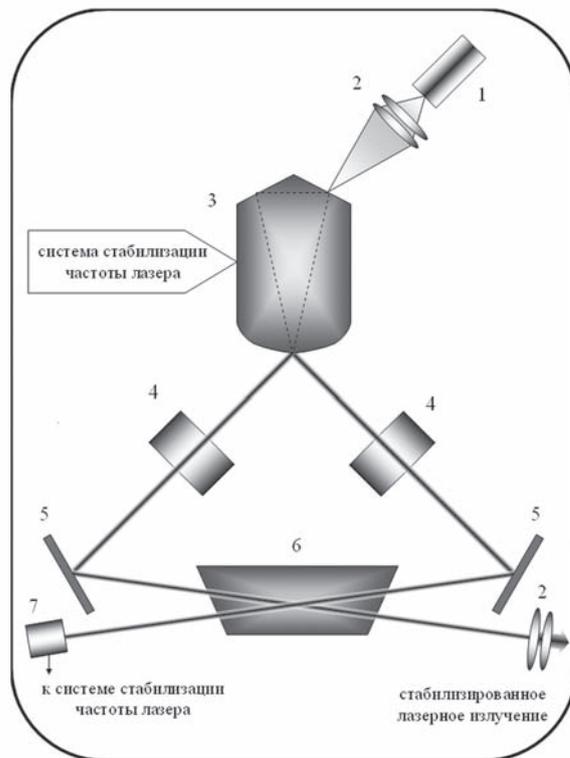


Рис. 5. Упрощенная оптическая схема монолитного кольцевого ТЧЛ стабилизированного на насыщении поглощения внешней йодной ячейкой:

- 1 – полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 808 нм; 2 – коллимирующая оптика;
- 3 – активная среда чип лазера; 4 – кристалл КТР;
- 5 – зеркала; 6 – кювета с йодом; 7 – фотодетектор

### 3. УСЛОВИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ТЧЛ

При решении задачи стабилизации частоты монолитного кольцевого ТЧЛ необходимо установить, какие режимы генерации являются устойчивыми и, следовательно, могут быть использованы. Одним из стационарных режимов генерации, который может быть использован, является режим синхронизации встречных волн. В этом случае частоты встречных волн равны, а интенсивности оказываются неравными и не зависящими от времени. Перестройка частоты излучения монолитного ТЧЛ может быть осуществлена с помощью создания и регулирования механических напряжений в активном элементе. Периметр кольцевого резонатора может быть изменен путем нагрева моноблока. Величина ко-

эффицента перестройки частоты излучения для Nd:YAG лазеров составляет 3,2 ГГц/С. Таким образом, если использовать излучение накачки еще и для нагрева моноблока, то можно осуществить управление частотой излучения через мощность накачки. В этой ситуации при рабочей температуре активного кристалла, устанавливаемой с помощью термоэлемента, при температуре ниже чем нормальная рабочая температура, нагрев кристалла позволит устанавливать требуемый режим работы.

Вторым необходимым условием, которое обеспечит применения монолитных кольцевых ТЧЛ в составе стабилизированного по частоте лазера, является возможность осуществления поисковой модуляции. При этом необходимо, чтобы внешняя низкочастотная модуляция не оказывала влияния на устойчивость выбранного режима генерации и не приводила к развитию нерегулярных хаотических колебаний. Кроме того, преобразование внешней модуляции в лазере не должно приводить к появлению гармоник частоты модуляции.

В условиях монолитного лазера реализовать необходимый режим поисковой модуляции и перестройки частоты излучения можно через амплитудную модуляцию излучения накачки. Теоретические и экспериментальные исследования динамики излучения двунаправленных кольцевых лазеров показали, что модуляция накачки и модуляция потерь резонатора идентичны по результату воздействия на спектр излучения ТЧЛ [5]. В настоящей работе предлагается поисковую модуляцию также реализовать через накачку ТЧЛ. При использовании стандартной системы уравнений [11], в которой превышение пороговой мощности накачки можно описать следующим уравнением

$$\eta = \eta_0 + h \cos \omega_p t.$$

В этом случае оптическая частота излучения  $\omega_0$  имеет периодическую девиацию

$$\omega = \omega_0 + \alpha_d \cos \omega_p t.$$

Здесь  $\alpha_d$  — амплитуда девиации оптической частоты. Регистрация резонансов насыщенного поглощения в йоде осуществляется на частоте  $3\omega_0$  [12]. Наличие в спектре излучения четных гармоник приведет к модуляционному сдвигу и снижению воспроизводимости стабилизированной частоты излучения.

Отличительной особенностью выбранного режима является то, что частоты модуляции, необходимые для реализации модуляционного метода стабилизации частоты, лежат в области от 1 кГц до 3 кГц. В зависимости от конструкции лазера и выбранных линий поглощения йода подбирается как частота модуляции, так и ее амплитуда. Девиация оптической частоты  $\alpha_d$  должна быть в интервале от 4 до 6 МГц. Частоты модуляции значительно ниже релаксационных и автомодуля-

ционных частот, что позволяет получить в излучении только частоту модуляции без каких-либо комбинационных частот. В отличие от работ [13], в рассматриваемом случае необходимо избегать условий, при которых развиваются хаотические процессы.

Спектральная чистота модуляционного сигнала в излучении ТЧЛ обеспечивает отсутствие модуляционного сдвига, который влияет на частоту, реально воспроизводимую при стабилизации по пику поглощения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен один из типов высокостабильных одночастотных лазеров — твердотельный монолитный чип лазер с полупроводниковой накачкой. Этот лазер обладает уникальными характеристиками: высокой стабильностью частоты и интенсивностью излучения, чрезвычайно малой шириной спектра излучения, большим КПД и малыми габаритами.

В системе компьютерной математики MathCAD 14 Professional был произведен расчет возможной конструкции кольцевого резонатора для ТЧЛ. В результате был разработан метод, который позволяет рассчитать кольцевой резонатор чип лазера.

Прогресс в деле создания нового поколения высокостабильных монолитных твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой открывает широкие возможности их применения в различных областях науки и техники. Уже в ближайшее время можно ожидать практического использования таких лазеров в когерентной оптической связи, доплеровских измерительных системах, дистанционной диагностике окружающей среды, метрологии, лазерной гироскопии, прецизионных оптических измерительных системах.

## Литература.

- [1] Брославец Ю.Ю., Фомичев А.А., Коваль Ю.П., Кобякова М.Ш., Кузьмин О.В. Спектральные характеристики излучения микрочип лазера с высококонцентрированной активной средой Nd:LSB и накачкой лазерным диодом. 2000. Москва, МФТИ.
- [2] Dabu R., Stratan A., Neagu L. Design and characterization of an end-pumped Nd:YAG microlaser. // Romanian Reports: Physics / 2004. V. 56, №2, pp. 294 – 305.
- [3] Dascalu T., Taira T. High efficient pumping configuration for microchip solid-state laser. // Optics express / V/ 14, №2, pp. 670–677.
- [4] Vitushkin L., Orlov O. A compact frequency – stabilized Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP/I<sub>2</sub> laser at 532 nm for laser interferometry and wavelength standards. / 2005. V. 5856, pp. 281–286.
- [5] Кравцов Н.В., Наний О.Е. Высокостабильные одночастотные твердотельные лазеры // Квантовая электроника. 1993. Т. 20, №4. С. 332–340.
- [6] Золотоверх И.И., Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г. Увеличение эффективности второй гармоники в микролазере // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, С. 565–566.

- [7] *Скворцов М.Н., Охупкин М.В., Невский А.Ю., Багаев С.Н.* Оптический стандарт частоты на основе YAG: Nd<sup>3+</sup> – лазера, стабилизированного по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде с использованием второй гармоники излучения. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 12. С. 1101–1106.
- [8] *Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г.* Нелинейная динамика твердотельных кольцевых лазеров // Квантовая электроника. 2006. Т. 36, № 3. С. 192–220.
- [9] *Кравцов Н.В.* Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 8. С. 661–677.
- [10] *Кравцов Н.В., Приезжев А.В., Шувалов В.В.* Лазерная физика и нелинейная оптика в МГУ // Квантовая электроника, 2007. Т. 35, № 1.
- [11] *Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г.* Режимы генерации твердотельных кольцевых лазеров при модуляции их параметров // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 6. С. 487–505.
- [12] *Кравцов Н.В., Ларионцев Е.Г.* Автомодуляционные колебания и релаксационные процессы в твердотельных кольцевых лазерах // Квантовая электроника. 1994. Т. 21, № 10. С. 903–918.
- [13] *Летохов В.С., Чеботаев В.П.* Резонансные явления при насыщении поглощения лазерным излучением. // Успехи физических наук. 1974. Т. 113, № 3. С. 385–431.



Поступила в редколлегию 3.02.2009  
**Мачехин Юрий Павлович**, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.



**Приходько Дмитрий**, студент ХНУРЭ. Область научных интересов: лазерная физика, оптические стандарты частоты, твердотельные лазеры с полупроводниковой накачкой.