

# Двухчастотная синхронизованная генерация в YAG : Nd<sup>3+</sup>-лазере с непрерывной накачкой

Б.И.Галаган, Ю.К.Данилейко, Н.Н.Ильичев, А.В.Масалов, В.Я.Молчанов, В.А.Чиков

*Теоретически и экспериментально проанализирована синхронизация двух взаимно-ортогональных поляризационных мод непрерывного твердотельного YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера с ламповой накачкой. Теоретически показана возможность синхронизации поляризационных мод с помощью радиосигнала. Определена предельная для существования синхронизации расстройка. Экспериментально исследована синхронизация на частоте 23 МГц.*

**Ключевые слова:** непрерывный неодимовый двухчастотный лазер, синхронизация частоты.

## Введение

В связи с развитием твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой усилился интерес к двухчастотным лазерам, разность частот генерации которых лежит в радиодиапазоне. Интерес к подобным лазерам связан с возможностью повышения точности и чувствительности различных оптических измерений. Это может быть, например, оптическая дальнометрия, дистанционное зондирование атмосферы, оптическая гироскопия и др.

Двухчастотная генерация исследовалась в газовых [1, 2] и твердотельных лазерах [3–6]. Было отмечено, что основной проблемой в достижении стационарной двухчастотной генерации является конкуренция генерирующих мод вследствие нелинейного взаимодействия в активной среде. Для подавления конкуренции мод было предложено использовать либо их пространственное разделение [7] (как продольное, так и поперечное), либо генерацию двух ортогонально поляризованных типов колебаний [2]. Последний способ подавления конкуренции был реализован в работе [3], где с помощью регулируемой механическими напряжениями анизотропии была получена девиация разностной частоты при двухчастотной генерации. Следует также отметить работу [8], в которой стабилизация двухчастотной генерации в анизотропном резонаторе осуществлялась за счет нелинейного взаимодействия мод при внутриврезонаторной ГВГ.

Отметим, что возможности двухчастотных лазеров в оптических измерениях могут быть значительно расширены при увеличении стабильности разностной частоты. Очевидно, что проблема абсолютной стабилизации частот генерирующих мод значительно сложнее, чем проблема стабилизации их разности. Последняя может быть в какой-то мере решена просто стабилизацией параметров резонатора и накачки лазера, а также чисто радиотехнически – путем синхронизации разностной частоты внешним радиочастотным сигналом при нелинейном взаимодействии в активной среде. Исследованию именно такого способа стабилизации разностной частоты генерации и посвящена настоящая работа.

## 1. Теоретический анализ двухчастотной генерации в условиях ее синхронизации на разностной частоте

Рассмотрим лазер на основе кристалла YAG:Nd<sup>3+</sup> с анизотропным резонатором и непрерывной накачкой. При этом предположим, что анизотропия резонатора, создаваемая сосредоточенным элементом (тонким одноосным кристаллом), такова, что разность хода волн для *o*- и *e*-поляризаций обеспечивает необходимый частотный интервал между модами с различными взаимно-ортогональными поляризациями. В дальнейшем будем также предполагать, что генерируется только одна продольная мода каждой поляризации. При этих предположениях сводится к минимуму конкуренция генерирующих мод, связанная с пространственной неоднородностью инверсной населенности вследствие межмодовой интерференции.

Для синхронизации по разностной частоте введем в резонатор дополнительный элемент, осуществляющий межмодовое взаимодействие следующим образом. Поляризация части излучения одной электромагнитной волны меняется на ортогональную со сдвигом по частоте вверх и вниз на  $\Omega$ , определяемым внешним сигналом. Аналогичная операция выполняется с излучением другой поляризации. Будем считать, что частотный сдвиг  $\Omega$  близок к межмодовому расстоянию  $|\omega_1 - \omega_2|$ , т. е.  $\Delta = \Omega - |\omega_1 - \omega_2|$  удовлетворяет условию  $|\Delta| \ll \Omega$ . Возможные устройства, осуществляющие подобную операцию, будут обсуждены ниже.

Для качественного описания динамики генерации в рассматриваемом лазере используем систему уравнений [9] для инверсной населенности  $N$  и полей мод  $E_1$  и  $E_2$  в приближении гармонического осциллятора со слабой нелинейностью:

$$\begin{aligned} \ddot{E}_{1,2} + 2 \left[ \delta - \frac{\alpha}{1 + (E_1^2 + E_2^2)/E_s^2} \right] \dot{E}_{1,2} + \omega_{1,2}^2 E_{1,2} \\ = 2\mu\omega_{1,2}^2 \hat{E}_{1,2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\omega_{1,2}$  – собственные резонансные частоты поляризационных мод;  $\hat{E}$  – сдвинутое в пространстве частот на  $\Omega$  поле  $E$ ;  $\delta$  – параметр затухания поля моды, связанный с

добротностью пассивного резонатора;  $\alpha$  – параметр, пропорциональный мощности накачки [9];  $E_s$  – амплитуда поля, насыщающего лазерный переход [10];  $\mu = \xi E / \omega_0$  – параметр связи между модами;  $\xi$  – коэффициент переброса излучения по мощности из одной поляризационной моды в другую;  $E$  – частотный интервал между двумя ближайшими аксиальными модами одной поляризации;  $\omega_0 \approx \omega_1 \approx \omega_2$ . Для простоты анализа параметры  $\mu$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  выбраны одинаковыми для обеих мод.

Решение системы (1) в приближении медленно меняющихся амплитуд будем искать в виде

$$E_1(t) = x(t) \cos(\omega_1 t + \varphi(t)),$$

$$E_2(t) = y(t) \cos(\omega_2 t + \psi(t)).$$

Громоздкость системы уравнений для амплитуд  $x(t)$ ,  $y(t)$  и фаз  $\varphi(t)$ ,  $\psi(t)$ , а также ее анализа на наличие стационарного режима синхронизованных по разностной частоте колебаний не позволяет привести их в рамках данной статьи; ограничимся лишь перечислением некоторых результатов аналитического и численного рассмотрения.

Как показал анализ, устойчивая синхронизованная генерация возможна лишь при расстройке  $|A| < \omega_0 \mu \sqrt{2}/8$ . При этом, как показали анализ и численный счет, в случае  $A = 0$  амплитуды колебаний в каждой из поляризационных мод равны, а разность фаз между колебаниями в одной из мод и колебаниями другой моды, сдвинутой по частоте на  $\Omega$ , равна нулю. При  $A \neq 0$  между указанными колебаниями появляется фазовый сдвиг, а амплитуды мод перестают быть равными. Данный факт, конечно, является отрицательным с точки зрения создания синхронизованного оптического генератора. Однако по критерию минимизации фазового сдвига может быть осуществлена электронная обратная связь, автоматически подстраивающая резонатор в состояние  $\omega_1 - \omega_2 = \Omega$ .

## 2. Экспериментальные результаты

Для проверки рассматриваемого метода синхронизации был построен непрерывный лазер на кристалле YAG:Nd<sup>3+</sup> на длине волны 1.06 мкм (рис. 1). В экспериментах использовался одноламповый квантрон 1 типа К-301В с кристаллом длиной 100 мм. Резонатор был образован плоским зеркалом 2 с коэффициентом отражения не хуже 98 % и пятислойной стопой 3 из плавленого кварца. Оптическая длина резонатора была близка к 280 мм, что отвечало межмодовому расстоянию  $E = 576$  МГц. Использование в резонаторе селектора аксиальных мод (стопы) и селектора поперечных мод (диафрагмы 4 диаметром 1–2 мм) надежно обеспечивало одномодовую и одночастотную генерацию в случае изотропного резонатора при превышении порога до 10 %.

Для создания анизотропии в резонатор помещалась просветленная на длину волны 1.06 мкм пластина 5 из ниобата лития толщиной 0.3 мм с оптической осью, лежащей в плоскости пластины. Поворотом вокруг оптической оси эффективная толщина пластины подбиралась такой, чтобы оптическая разность хода для о- и е-поляризаций была кратной  $\lambda/2$ . Заметим, что при точной кратности  $\lambda/2$  собственные частоты двух поляризационных мод должны совпадать. Исследование поляризационных свойств генерируемого в этом случае излучения пока-

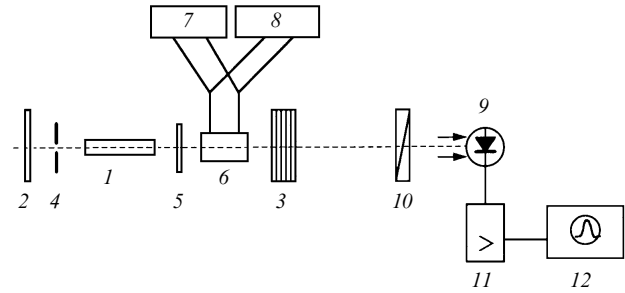


Рис.1. Экспериментальная установка:

1 – квантрон с активным элементом; 2 – глухое зеркало резонатора; 3 – стопа (выходное зеркало); 4 – селектирующая диафрагма; 5 – анизотропная пластина; 6 – электрооптический модулятор; 7 – низкочастотный (50 Гц) источник питания модулятора; 8 – высокочастотный (23 МГц) источник питания модулятора; 9 – фотодиод; 10 – вращающийся поляризатор; 11 – резонансный усилитель; 12 – осциллограф.

зало, что интенсивность излучения, поляризованного вдоль оптической оси пластины 5 и перпендикулярно ей, зависит от положения диафрагмы 4 относительно оптической оси активного элемента. Выбором положения диафрагмы удавалось уравнивать интенсивности поляризационных компонент с точностью не хуже 70–80 %.

Для создания динамической связи между модами различной поляризации в резонатор вводился электрооптический модулятор 6 из кристалла ниобата лития толщиной 12 мм. Кристалл тщательным образом юстировался на совпадение его оптической оси с оптической осью резонатора. При этом модулятор устанавливался так, чтобы ось наведенного электрическим полем двулучепреломления составляла с осью пластины 5 угол 10–15°.

Модулятор питался от двух источников переменного тока. Первый источник 7 с частотой 50 Гц использовался для настройки и медленного сканирования собственных частот поляризационных мод. Выбор напряжения постоянного тока и напряжения амплитуды тока на частоте  $\Omega = 50$  Гц осуществлялся так, чтобы разность собственных частот поляризационных мод  $|\omega_1 - \omega_2|$  была близка к частоте внешней модуляции и сканировалась около нее (см. ниже). В качестве второго источника использовался радиогенератор 8, работающий на частоте  $\Omega = 23$  МГц.

Для анализа выходного излучения использовался лавинный фотодиод 9, перед которым устанавливался вращающийся поляризатор 10. Сигнал с фотодиода подавался на резонансный усилитель 11 с полосой пропускания около 500 кГц, настроенный на частоту 23 МГц, затем детектировался с постоянной времени 1.5 мкс и подавался на цифровой осциллограф 12.

Эксперимент по частотной синхронизации мод проводился следующим образом. На модулятор 6 подавалось питание с частотой 50 Гц и амплитудой, достаточной для получения дополнительной (в одной из поляризаций) разности хода  $\sim \lambda/4$ . Такая разность хода обеспечивала совпадение разностной частоты с частотой  $\Omega$ . Одновременно с подачей питания на модулятор подавалось высокочастотное напряжение на частоте  $\Omega = 23$  МГц и появлялся сигнал на выходе усилителя 11.

Оптимизация сигнала на модуляционной частоте осуществлялась следующим образом. Уменьшалась амплитуда низкочастотного напряжения на модуляторе, при этом уменьшалась девиация частоты  $|\omega_1 - \omega_2|$ , а совпадение ее с  $\Omega$  поддерживалось выбором наклона пластины 5. Для подтверждения того, что наблюдаемый сигнал

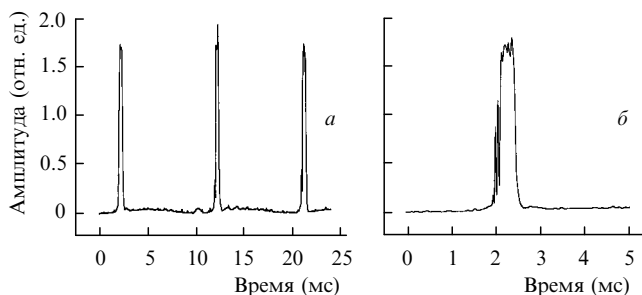


Рис.2. Осциллограммы амплитуды выходного сигнала на частоте 23 МГц при различных скоростях развертки.

действительно обусловлен межмодовыми биениями на частоте  $\Omega$ , производилось вращение поляризатора 10 перед фотоприемником 9. При этом наблюдались четыре положения поляризатора, при которых выходной сигнал был минимальным. Этот факт свидетельствует о том, что на выходе лазера имеются два излучения с ортогональными поляризациями, причем в каждом из них отсутствует модуляция на частоте  $\Omega$ .

Увеличение времени существования сигнала на частоте  $\Omega$  (увеличение допустимой расстройки  $\Delta = |\omega_1 - \omega_2| - \Omega$ , не приводящей к срыву синхронизации) осуществлялось подбором амплитуды модуляционного напряжения частоты  $\Omega$  и оптимального угла между оптической осью пластины 5 и осью наведенного двулучепреломления в кристалле модулятора 6. Типичная осциллограмма наблюдаемого сигнала при 45-градусной ориентации поляризатора 10, соответствующей максимуму амплитуды межмодовых биений, приведена на рис.2. При этом амплитуда биений на выходе фотодиода достигала 1.7–1.8 от амплитуды сигнала в каждой из поляризационных мод.

О том, что полученный режим работы лазера является режимом синхронизованной по разностной частоте генерации двух мод, свидетельствует уменьшение длительности сигнала на выходе резонансного усилителя при падении амплитуды генерации на частоте  $\Omega$ . При полном выключении модуляции указанный сигнал снижался до уровня шумов, что, возможно, связано с отсутствием двухчастотной генерации, по крайней мере при близости

(по сравнению с межмодовым расстоянием) частот излучений со взаимно-ортогональной поляризацией.

Заметим, что попытка получить стационарную синхронизацию путем снижения до нуля амплитуды сканирующего напряжения при соответствующей подстройке постоянного напряжения не увенчалась успехом. Синхронизация срывалась, по-видимому, из-за воздействия паразитных акустических колебаний на резонатор.

Таким образом, указанным способом может быть получена синхронизованная двухмодовая генерация при заданном межмодовом частотном интервале. Однако для стабильности синхронизации, по-видимому, имеет смысл использовать моноблочные резонаторы и полупроводниковую накачку активного элемента, а также систему автоподстройки анизотропии резонатора, минимизирующую расстройку  $\Delta = |\omega_1 - \omega_2| - \Omega$ .

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (грант № 98-02-16665).

1. Ермаченко В.М., Петровский В.Н., Проценко Е.Д., Рурукин А.Н., Шананин Р.А. *Квантовая электроника*, **12**, 571 (1985).
2. Гулелев В.Г., Измайлов А.Ч., Ясинский В.М. *Квантовая электроника*, **15**, 263 (1988).
3. Owyong A., Eshtick P. *Optics Letts*, **12**, 999 (1987).
4. Шананин Р.А., Петровский В.Н., Проценко Е.Д., Шатрова Е.А., Пантелеев А.В., Иолтуховский А.А., Цветков Ю.В. *Квантовая электроника*, **24**, 127 (1997).
5. Zayhowsky J.J., Mooradian A. *Optics Letts*, **14**, 618 (1989).
6. James G.E., Harrell E.M., Roy R. *Phys.Rev.A*, **41**, 2778 (1990).
7. Бакаев Д.С., Гончуков С.А., Ермаченко В.М., Усов П.А. *Квантовая электроника*, **14**, 2428 (1987).
8. Наний О.Е., Палеев М.П. *Квантовая электроника*, **20**, 761 (1990).
9. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. *Введение в статистическую радиофизику и оптику* (М., Наука, 1981).
10. Ханин Я.И. *Динамика квантовых генераторов* (М., Сов. радио, 1975).

**B.I.Galagan, Yu.K.Danileiko, N.N.Ilichev, A.V.Masalov, V.Ya.Molchanov, V.A.Chikov. Continuously pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser operating on two locked frequencies.**

Experimental and theoretical study of locking of two mutually orthogonal polarisation modes in a cw flashlamp-pumped Nd<sup>3+</sup>:YAG laser is reported. The possibility of locking polarisation modes by a radio signal is shown. The limiting detuning allowing the existence of locking is determined. Locking at 23 MHz is experimental studied.