

Б.В. Бондарев, А.В. Караблев, С.М. Кобцев, В.М. Лунин

## ЧАСТОТНО-СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ НЕПРЕРЫВНЫЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ С ПРЕЦИЗИОННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Разработан непрерывный одночастотный лазер на красителях с повышенной стабильностью и линейностью перестройки частоты генерации. Ширина линии излучения лазера за 1 с не превышает  $10^{-4}$  см<sup>-1</sup>, нелинейность сканирования частоты генерации в области 0,5 см<sup>-1</sup> составляет менее 0,1%. Существенное уменьшение нелинейности сканирования достигнуто за счет контроля базы опорного термостатированного интерферометра Фабри–Перо с помощью емкостного датчика и использования системы обратной связи для необходимой коррекции сигнала, управляющего изменением базы интерферометра. Подробно описаны: схема лазера, электронные блоки управления, конструкция опорного интерферометра Фабри–Перо. Разработанный лазер предназначен для широкодиапазонных спектроскопических исследований с абсолютной точностью порядка ширины линии излучения лазера.

Одной из задач по совершенствованию непрерывных одночастотных лазеров на красителях (НОЛК) с узкой линией генерации (~ 1 МГц) и широкой областью плавной перестройки частоты генерации (= 10–30 ГГц) является задача улучшения линейности перестройки длины волны излучения. Нелинейность перестройки определяется отклонением зависимости изменения частоты генерации от изменения управляющего перестройкой электрического сигнала от линейной на границе области плавного сканирования. В существующих НОЛК такое отклонение составляет значение, превышающее, как минимум, на 1–2 порядка ширину линии излучения лазера. Так, например, в промышленных моделях НОЛК фирм *Coherent* и *Spectra-Physics* нелинейность перестройки частоты генерации в области 30 ГГц составляет ~ 2% [1, 2], что может приводить к ошибке в установке линии генерации вблизи границы области плавного сканирования в несколько сот мегагерц относительно предполагаемого спектрального положения при ширине линии излучения ~ 1 МГц. Ошибка в установке линии генерации, обусловленная нелинейностью перестройки, не позволяет производить с помощью НОЛК спектроскопические измерения с точностью порядка ширины линии излучения лазера без дополнительных средств контроля изменения частоты генерации, без так называемых «маркеров». Задачу более точного определения спектрального положения линии генерации НОЛК можно решить использованием суперпрецизионных измерителей длин волн излучения [3], однако наиболее доступные промышленные модели измерителей [4, 5] не годятся для этой цели, так как их погрешность определения частоты генерации лазера составляет, как правило, также несколько сот мегагерц.

Линеаризация функциональной зависимости частоты излучения лазера от параметра управляющего сигнала позволяет определять положение линии генерации с точностью порядка ширины линии во всей области плавного сканирования, если по крайней мере в одном произвольном месте внутри области плавного сканирования спектральное положение линии генерации определено с точностью до ширины линии. Абсолютная калибровка частоты генерации лазера с такой точностью в произвольном месте внутри произвольной области плавного сканирования может осуществляться по отдельным линиям реперного спектра, частоты линий которого измерены с необходимой точностью другими способами. Отметим, что для калибровки частоты генерации лазера внутри каждой области плавного сканирования необходима только одна линия реперного спектра и не нужен ни «маркер», ни ультраточный измеритель длин волн излучения.

Целью настоящей работы являлась разработка НОЛК с повышенной стабильностью и линейностью перестройки частоты генерации для спектроскопии высокого разрешения.

Нелинейность перестройки в частотно-стабилизированных НОЛК определяется, обычно, способом изменения базы опорного интерферометра Фабри–Перо, по которому осуществляется стабилизация частоты генерации лазера. При изменении базы опорного интерферометра с помощью пьезокерамики нелинейность сканирования в области ≈ 30 ГГц может достигать 20%, 2% она составляет при изменении базы с помощью наклонной брестерской пластинки. Одним из вариантов дальнейшего уменьшения нелинейности сканирования является использование мини-компьютера для коррекции сигнала, управляющего изменением базы опорного интерферометра [5], однако этот способ невозможно реализовать в НОЛК, оснащенных только аналоговыми электронными блоками управления. В разработанном нами НОЛК значительное уменьшение нелинейности сканирования частоты генерации достигается использованием датчика для контроля изменения базы опорного интерферометра и системы обратной связи для коррекции управляющего изменением этой базы сигнала. Исполняющим электромеханическим элементом системы является пьезокерамика, контрольным элементом — емкостный датчик.

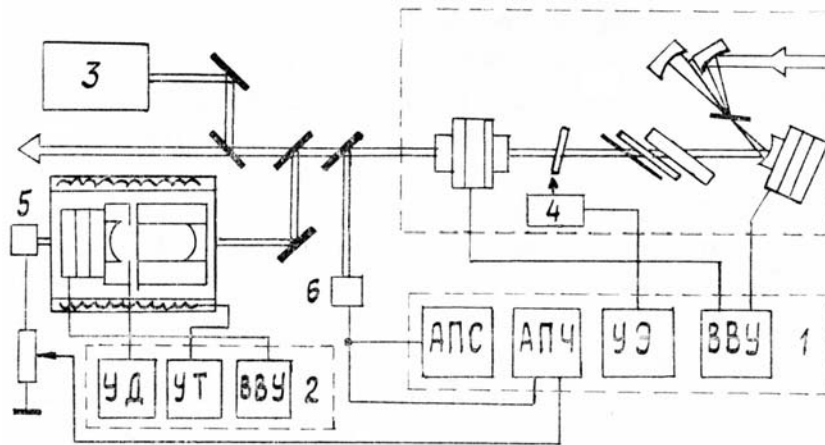


Рис. 1. Блок-схема разработанного НОЛК: 1 – блок управления лазером; 2 – блок управления опорным интерферометром; 3 – система визуального контроля спектра генерации; 4 – электромеханический привод тонкого эталона; 5, 6 – фотоприемники

На рис. 1 изображена блок-схема разработанного линейного НОЛК. В лазере использована базовая конструкция излучателя и системы циркуляции жидкости [6, 7]. Селекторами НОЛК являются: трехкомпонентный двулучепреломляющий фильтр, изготовленный по рекомендациям [8]; кварцевый эталон Фабри–Перо толщиной 0,5 мм с коэффициентом отражения поверхностей  $R = 0,4$ ; поглощающая пленка из алюминия с коэффициентом пропускания в бегущей волне  $T = 0,7$ . Особенности оптической схемы лазера состоят в том, что, во-первых, тонкий эталон может перестраиваться с помощью специального электромеханического привода, во-вторых, используется специальный моноблок для совместного расположения поглощающей пленки и выходного зеркала.

Моноблок представляет собой склейку из двух кварцевых дисков с отверстиями в центрах и пьезокерамики ПП-4 посередине. Выходное зеркало и поглощающая пленка крепятся к противоположным поверхностям склейки, расстояние между ними составляет 2 см и может варьироваться в пределах нескольких микрон с помощью пьезокерамики. Моноблок изготавливается так, что непараллельность его противоположных поверхностей составляет всего несколько угловых секунд, поэтому вся конструкция юстируется как единый оптический элемент – селективный отражатель с поглощающей пленкой. Воздушный промежуток между выходным зеркалом и поглощающей пленкой изолирован от пыли и потоков воздуха. Применение моноблочной конструкции селективного отражателя позволяет упростить конструкцию НОЛК, его юстировку, улучшить стабильность одночастотного режима генерации. Алюминиевая пленка наносилась на подложку из плавленного кварца, другая сторона подложки просветлялась. Подложка обращена поглощающей пленкой в сторону выходного зеркала. Поглощающая пленка не имеет защитного покрытия, его отсутствие не приводит к ухудшению каких-либо характеристик селективного отражателя за время не менее одного года.

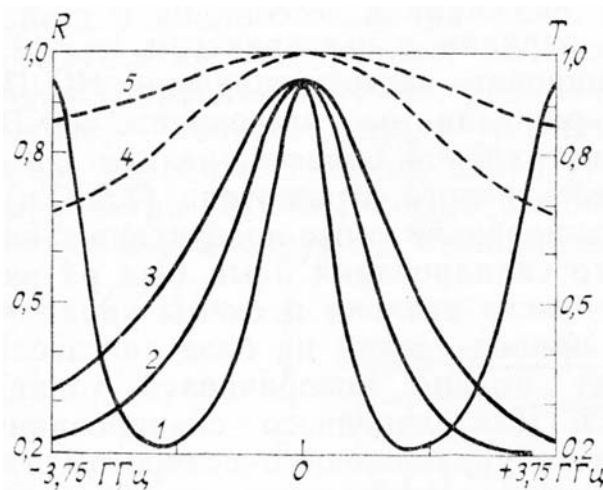


Рис. 2. Функции частотно-селективных потерь:  $T(\nu)$  для эталонов Фабри–Перо с базой 10 мм,  $R_{1,2} = 0,04$  (кривая 5) и  $R_{1,2} = 0,1$  (4),  $R(\nu)$  для селективного отражателя с поглощающей пленкой при расстоянии между пленкой и зеркалом 4 (1), 2 (2), 4/3 см (3)

Отметим, что использованный нами селективный отражатель обладает сравнительно высокой избирательностью и позволяет получать одночастотный режим генерации при увеличении длины резонатора лазера до  $\sim 1$  м. Это является важным моментом с точки зрения перспектив применения разработанного НОЛК для, например, внутррезонаторной оптико-акустической спектроскопии и в других целях. На рис. 2 приведены функции частотно-селективных потерь толстых эталонов Фабри–Перо, традиционно используемых в НОЛК, и селективного отражателя с поглощающей пленкой. Для расчета характеристик селективного отражателя использован метод, описанный в [9]. Видно, что в широком диапазоне значений баз используемый нами селективный отражатель является более избирательным селектором, чем толстый эталон Фабри–Перо. Отсюда следует также, что базу селективного отражателя для НОЛК необязательно выбирать из условия внесения максимальных потерь для моды, неконкурирующей с выделенной из-за эффекта пространственно-неоднородного насыщения усиления в тонкой активной среде лазера, как это было сделано в [10].

Электронная система, обеспечивающая повышенную стабильность и линейность перестройки частоты генерации НОЛК, выполнена в виде двух функционально независимых блоков: блока управления лазером и блока управления опорным интерферометром.

Блок управления лазером включает в себя электронные схемы следующих систем: системы автоподстройки селектора (АПС) – поглощающей пленки – к узлу выделенной моды; системы автоподстройки частоты (АПЧ) по опорному интерферометру Фабри–Перо, а также схему управления приводом эталона (УЭ) и высоковольтные усилители (ВВУ) для управления базой селективного отражателя с помощью пьезокерамики и положением коллимирующего зеркала резонатора с помощью трех пьезокерамик. Система АПС аналогична описанной [11]. Модуляция базы селективного отражателя производится с частотой 5 кГц. В данном лазере система АПС дополнена схемой автоматической регулировки усиления для улучшения режима работы синхронного детектора во всем диапазоне мощностей выходного излучения лазера. Работа системы АПЧ основана на принципе стабилизации частоты генерации лазера по склону пика пропускания опорного интерферометра Фабри–Перо. Важным элементом системы АПЧ является схема нормировки сигнала ошибки на выходную мощность лазера на красителе, что позволяет поддерживать неизменным усиление и полосу пропускания системы АПЧ во всей области генерации красителя.

При помощи коллимирующего зеркала с пьезоупаком из трех пьезокерамик П-3 можно плавно сканировать частоту излучения НОЛК в диапазоне 15 ГГц при размахе напряжения на пьезоупаке 500 В. Плавное сканирование частоты в спектральной области, размер которой превышает область дисперсии селективного отражателя (7,5 ГГц), возможно только при синхронном сканировании пика пропускания тонкого эталона. Для обеспечения такого сканирования нами был разработан электромеханический привод тонкого эталона и схемы управления приводом. Электромеханический привод сделан на базе двигателя постоянного тока ДПП-52 и позволяет плавно поворачивать тонкий эталон на  $\pm 2,5^\circ$  с частотой до 100 Гц. Для линейного сканирования пика пропускания эталона относительно управляющего поворотом эталона напряжения используется специальная схема сопряжения, которая «извлекает» из управляющего напряжения корень квадратный и управляет приводом с помощью полученного таким образом сигнала. Синхронное сканирование частоты генерации и пика пропускания тонкого эталона осуществляется подачей напряжения, управляющего сканированием, в определенной пропорции на пьезоупак коллимирующего зеркала и схему управления приводом эталона. Схема управления приводом эталона и привод испытывались отдельно в автосканируемом непрерывном узкополосном лазере на красителе [12] в режиме, когда длина волны излучения задается положением тонкого эталона. Дополнительных флуктуаций или дрейфа длины волны излучения из-за применения привода эталона не наблюдалось. При этом нелинейность сканирования длины волны излучения, осуществляемого с помощью тонкого эталона, в диапазоне 180 ГГц не превышала 1,5%.

Блок управления опорным интерферометром содержит электронные схемы управления емкостным датчиком (УД), термостатом (УТ), высоковольтный усилитель (ВВУ). В качестве опорного интерферометра использован сканируемый конфокальный интерферометр с областью дисперсии 1,5 ГГц и фактором резкости 3. Интерферометр термостатирован, нестабильность его температуры не превышает  $0,005^\circ\text{C}$ . Конструкция опорного интерферометра показана на рис. 3. Внешняя теплоизоляционная оболочка конструкции изготовлена из твердого пенопласта. Внутри этой оболочки расположен нагреватель с термодатчиком, необходимые для активной стабилизации температуры интерферометра. Одно из зеркал интерферометра жестко связано с цилиндром из плавленого кварца, который расположен между зеркалами интерферометра и его длина на несколько миллиметров меньше базы интерферометра.

В этом специально предусмотренном зазоре находится емкостный датчик для контроля изменения базы интерферометра. Одной обкладкой датчика является серебряное покрытие торца кварцевого цилиндра, нанесенное химическим способом, противоположной обкладкой является металлический диск, связанный с другим зеркалом интерферометра, которое может перемещаться вдоль оси интерферометра с помощью трех пьезокерамик ПП-4. Расстояние между обкладками емкостного датчика составляет 200 мкм. Емкостный датчик является частью *LS*-генератора, схема которого размещена на инваровом корпусе интерферометра, а индуктивность образована спиралью серебряного покрытия, нанесенного тем же химическим способом на боковую поверхность кварцевого цилиндра. Изменение базы интерферометра приводит к изменению частоты этого *LS*-генератора (средняя частота

≈ 30 МГц) и регистрируется специальной схемой в блоке управления интерферометром. Схема преобразует изменение частоты *LS*-генератора в цифровой код, который с помощью 12-разрядного ЦАП переводится в аналоговое напряжение. Полученный таким образом сигнал подается на вход разностной схемы, сравнивающей уровень этого сигнала с уровнем сигнала, управляющего сканированием базы интерферометра. Разность между уровнями этих сигналов подается в противофазе на один из входов ВВУ, управляющего пьезокерамиками интерферометра. Таким образом, любые отклонения от линейности сканирования компенсируются отрицательной обратной связью.

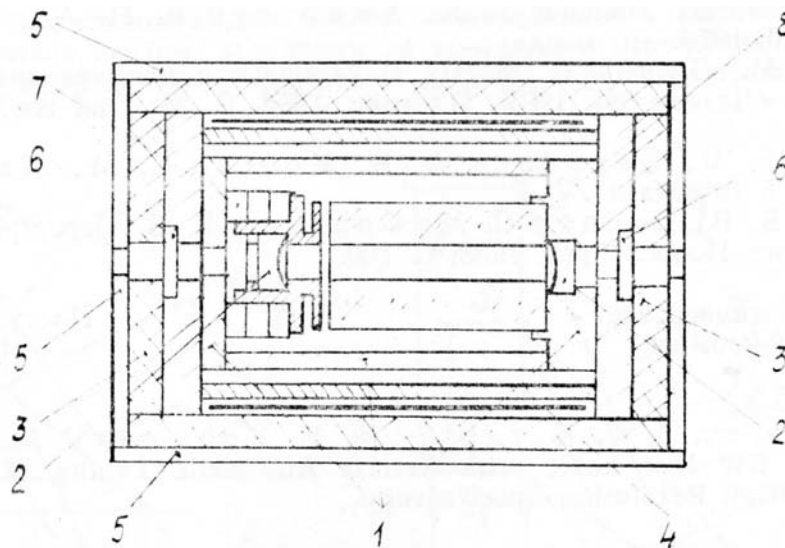


Рис. 3. Конструкция опорного интерферометра: 1 – внутренний инваровый корпус интерферометра; 2 – зеркало интерферометра; 3 – твердый пенопласт; 4 – обмотка нагревателя; 5 – корпус интерферометра; 6 – просветленное кварцевое окно; 7 – пьезокерамики ПП-4; 8 – кварцевый цилиндр

Спектр генерации НОЛК контролировался с помощью двух сканирующих интерферометров Фабри-Перо с областями дисперсии 15 ГГц и 250 МГц и факторами резкости не менее 50. Подробно вся система визуального контроля спектра генерации непрерывных узкополосных лазеров, используемая нами, описана в [13]. Выходная мощность НОЛК контролировалась измерителем мощности LM-2. В качестве лазера накачки использован аргоновый лазер *ILA-120-1*.

Разработанный непрерывный одночастотный лазер на красителе родамин 6Ж имеет следующие характеристики:

- максимальная выходная мощность более 50 мВт при накачке всеми линиями линейно-поляризованного излучения аргонового лазера мощностью 3 Вт;
- ширина линии излучения за 1 с – не более 3 МГц;
- скорость дрейфа частоты генерации – не более 60 МГц/час;
- диапазон плавной перестройки частоты генерации – 15 ГГц;
- нелинейность перестройки частоты генерации не более 0,1%.

Диапазон перестройки созданного НОЛК на трех отечественных родаминовых красителях – незамещенном, 6Ж и 4С перхлорат – составляет около 550–650 нм [14]. Разработанный лазер позволяет значительно расширить возможности многих методов исследований в области спектроскопии высокого разрешения, и проводить прецизионные спектроскопические исследования с абсолютной точностью порядка ширины линии излучения лазера. Точность  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  является достаточной для большого многообразия спектроскопических измерений.

1. CR-599 Dye laser systems. Coherent Inc. USA, 1984.
2. Series 380 ring dye lasers. Spectra – Physics Inc., USA, 1984.
3. Monchalin J. - P. et al. //Applied Optics. 1981. V. 20. № 5. P. 736.
4. Измеритель длин волн перестраиваемых лазеров непрерывного действия, автоматизированный ИДВ-2. Паспорт. Новосибирск, 1985.
5. Ring dye laser systems. Coherent Ins. USA, 1988.
6. Бондарев Б. В., Кобцев С. М., Сорокин В. Б. //ПТЭ. 1986. № 3. С. 245.
7. Бондарев Б. В., Кобцев С. М., Сорокин В. Б. //ПТЭ. 1986. № 1. С. 176.
8. Кобцев С. М. //Оптика и спектроскопия. Т. 63. Вып. 5. С. 1139.
9. Троицкий Ю. В. Одночастотная генерация в газовых лазерах. Новосибирск: Наука, 1975. 159 с.
10. Бетеров И. М., Василенко Л. С., Захаров М. И. и др. //Лазеры с перестраиваемой частотой. Новосибирск. 1980. С. 48.
11. Троицкий Ю. В., Ханов В. А., Хюппенен В. П. А. с. 392 871 СССР, МКИ НО 1 S3/10. 1976.

12. Кобцев С.М., Луин В.М. // III Национальная конференция с международным участием «Лазеры-88». НРБ, Пловдив, 1988. С. 33; Они же // ПТЭ. 1989. № 1. С. 240.
13. Бондарев Б.В., Караблев А.В., Кобцев С.М., Макашев В.Т. // ПТЭ. 1989. № 5 (в печати).
14. Бондарев Б.В., Кобцев С.М., Сорокин В.Б. // Перестраиваемые лазеры и их применение. Новосибирск, 1988. С. 100.

Новосибирский госуниверситет им. Ленинского комсомола

Поступила в редакцию  
24 августа 1989 г.

**B. V. Bondarev, A. V. Karablev, S. M. Kobtsev, V. M. Lunin. A Frequency Stabilized CW Dye Laser with Precise Automatic Tuning of the Wavelength Radiation for the High Resolution Spectroscopy.**

A single-frequency CW dye laser with high stability and linearity of tuning the laser frequency has been developed. The laser line width is less than  $10^{-4}$   $\text{cm}^{-1}/\text{sec}$ , non-linearity of the scanning laser frequency in range  $0,5 \text{ cm}^{-1}$  is less than 0,1%.