

УДК 550.383

НЕВЗАИМНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОЛЬЦЕВЫХ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛАЗЕРАХ

Н. В. Кравцов, Н. И. Наумкин

(НИИЯФ)

Экспериментально исследовано возникновение амплитудной и частотной невязимностей в импульсном кольцевом комбинационном лазере на сжатом водороде. Показано, что характер и величина невязимных эффектов зависят от плотности мощности излучения в резонаторе лазера. Наблюдаемые эффекты анализируются в предположении пространственной неоднородности нелинейной среды и возникновения ОВФ-зеркала.

Среди различных эффектов, детальное изучение которых важно как для фундаментальной науки, так и для практического использования, заметное место занимают невязимные оптические эффекты.

Сущность невязимных эффектов заключается в том, что характеристики (амплитуда, частота, фаза или поляризация) световых волн, прошедших один и тот же путь через среду во встречных направлениях, оказываются различными. Наиболее ярко невязимные эффекты проявляются в кольцевых лазерах, в которых генерируются две волны, распространяющиеся навстречу друг другу.

До настоящего времени невязимные эффекты детально исследовались лишь в газоразрядных и твердотельных кольцевых лазерах (см., напр., [1–3]). Динамика генерации комбинационных и ВРМБ-лазеров, активная среда которых обладает сильными нелинейными свойствами, существенно отличается от динамики других лазеров. Поэтому представляется интересным рассмотреть особенности возникновения невязимных эффектов и в таких лазерах.

Насколько нам известно, внимание исследователей привлекли такие кольцевые лазеры на вынужденном излучении, в которых источник накачки находился вне его резонатора (см., напр., [4, 5]). В этом случае условия взаимодействия волны накачки с попутной и встречной вынужденными волнами оказываются различными [6, 7], что вызывает различия в их характеристиках. Возможность же возникновения невязимных эффектов в комбинационных лазерах, в которых и источник возбуждения, и нелинейная среда находятся в одном и том же кольцевом резонаторе, до настоящего времени не исследовалась.

Причиной возникновения невязимных свойств кольцевых лазеров с внутррезонаторным преобразованием частоты излучения, как показывают проведенные исследования, может быть продольная пространственная неоднородность (вдоль оси резонатора) нелинейной среды. Эта неоднородность может быть вызвана пространственной неоднородностью таких параметров, как плотность мощности излучения, возбуждающего нелинейную среду в резонаторе лазера (например, вследствие изменения сечения каустики волны накачки);

потери в резонаторе; коэффициенты нелинейного преобразования.

Пространственная неоднородность коэффициентов нелинейного преобразования может возникать и при последовательном расположении нескольких нелинейных сред с различными характеристиками. К аналогичному результату может привести воздействие неоднородного электрического или магнитного поля на нелинейную среду [8, 9].

Рассмотрим возможность возникновения невязимных эффектов на примере комбинационного кольцевого лазера на сжатом водороде.

1. Экспериментальная установка

Кольцевой комбинационный лазер, в резонаторе которого находились источник возбуждения (кристалл рубина) и нелинейная среда (кювета со сжатым водородом), показан на рис. 1.

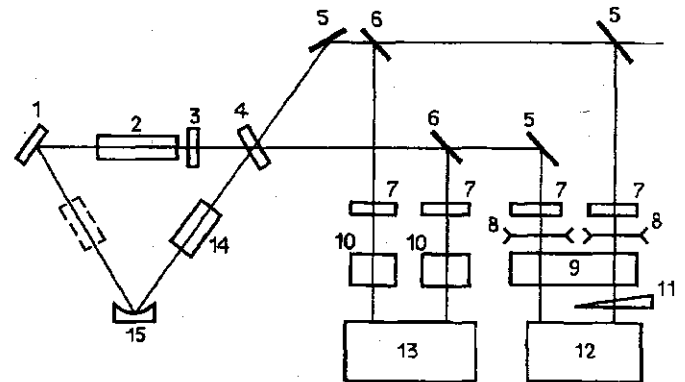


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1, 4 — плоские зеркала кольцевого резонатора, 2 — кристалл рубина, 3 — просветляющий фильтр, 5 — поворотные зеркала, 6 — светоделительные элементы, 7 — светофильтры, 8 — линзы, 9 — интерферометр Фабри-Перо, 10 — фотоприемники, 11 — оптический клин, 12 — фотоаппарат, 13 — двухлучевой осциллограф, 14 — камера со сжатым водородом, 15 — сферическое зеркало кольцевого резонатора

Особенностью (и достоинством с точки зрения эффективности комбинационного преобразования) исследуемого лазера является то, что плотность мощности возбуждения нелинейной среды в такой схеме значительно выше, чем в традиционных схемах [4, 5].

Кольцевой резонатор с периметром около 100 см был образован двумя плоскими и одним сферическим зеркалами ($R = 100$ см), имеющими высокие коэффициенты отражения в области 0,6943 мкм и практически прозрачными для стоксовой компоненты. При проведении контрольных измерений (для реализации резонатора с пространственно однородной нелинейной средой) сферическое зеркало заменялось плоским, имеющим тот же коэффициент отражения. В этом случае при тщательном подборе параметров элементов лазера (прозрачность нелинейного фильтра и пропускание зеркал резонатора) условия для встречных волн генерации лазера были идентичными, что приводило к одинаковым временным и спектральным их характеристикам.

Лазер работал на основной (TEM_{00q}) моде в режиме модуляции добротности с помощью нелинейного фильтра. В экспериментах были использованы нелинейные фильтры с начальным пропусканием от 35 до 50%. Длительность импульса генерации изменялась (в зависимости от прозрачности фильтра) от 20 до 80 нс. Энергия импульсов излучения на частоте накачки ($\lambda = 0,6943$ мкм) могла достигать 0,25 Дж.

В качестве нелинейной среды был использован сжатый водород, давление которого варьировалось в диапазоне от 10 до 70 атм. С целью устранения связи между встречными волнами камера со сжатым водородом и нелинейный фильтр были установлены в резонаторе лазера так, что нормаль к окнам камеры и поверхности фильтра составляла с осью резонатора несколько градусов. Камера со сжатым водородом устанавливалась поочередно в левое и правое плечи резонатора, где она могла перемещаться в некоторых пределах вдоль оси резонатора. Это позволяло изменять пространственную неоднородность нелинейной среды.

Встречные волны $I^\pm(t)$ после отражения от вспомогательных полупрозрачных пластин направлялись на быстродействующие фотоприемники (ФЭК-09) и интерферометр Фабри-Перо, который позволял регистрировать одновременно спектральные характеристики встречных волн.

Система светофильтров давала возможность раздельной регистрации как излучения накачки, так и излучения стоксовой компоненты.

В связи с тем, что сдвиг возникающих ВРМБ-компонент мал, спектральная селекция этих компонент не проводилась.

2. Результаты эксперимента

Были изучены зависимости временных, спектральных и пространственных характеристик излучения встречных волн на частотах накачки и стоксовой компоненты от расстояния между центром камеры со сжатым водородом в резонаторе лазера и местоположением перетяжки каустики, интенсивности накачки, давления водорода и наличия связи между встречными волнами.

Контрольные опыты показали, что в случае пространственно однородной нелинейной среды (когда резонатор был образован плоскими зеркалами и его сечение каустики было постоянным) интенсивности встречных волн как на частоте накачки, так и на частоте первой стоксовой компоненты были одинаковыми ($I^+(t)/I^-(t) = 1$), также одинаковыми были их длительность и спектральные характеристики.

Положение каустики кардинальным образом изменялось при наличии пространственной неоднородности возбуждения ВКР-активной среды. Пространственная неоднородность нелинейной среды возникала вследствие зависимости сечения каустики резонатора от продольной координаты. В этом случае в кольцевом резонаторе создавались неидентичные условия для возбуждения вынужденного излучения во встречных направлениях. В пределах камеры диаметр сечения каустики изменялся от 1,5 до 3 мм. Последнее обстоятельство и приводило к возникновению невязимости, т. е. к различию характеристик встречных волн на частоте излучения накачки ($\lambda = 0,6943$ мкм) и на частоте первой стоксовой компоненты ($\lambda = 0,97$ мкм).

В результате проведенных исследований обнаружена сильная зависимость характера невязимости от плотности мощности возбуждающего излучения, определяемой начальным пропусканием нелинейного фильтра. Так, при большой прозрачности нелинейного фильтра ($\sim 50\%$) и, следовательно, относительно небольшой плотности мощности излучения накачки, когда камера находилась в левом плече резонатора, интенсивность волны накачки, распространяющейся по часовой стрелке, оказывалась большей; уменьшение прозрачности фильтра до 35% приводило к смене направления распространения более мощной волны накачки.

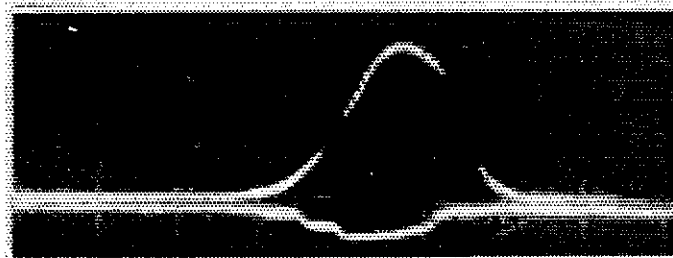


Рис. 2. Временная зависимость интенсивности встречных волн на частоте накачки

На рис. 2 показана временная зависимость интенсивности встречных волн на частоте накачки в случае, когда камера со сжатым водородом находилась в левом плече резонатора, а начальная прозрачность фильтра составляла 50%. Видно, что $I^+(t)/I^-(t) > 1$. Значительно различаются и ширины спектров: в направлении слабой волны спектр содержит одну компоненту с шириной менее $0,02 \text{ см}^{-1}$, а ширина спектра встречной волны достигает $0,06 \text{ см}^{-1}$.

Еще больше различались характеристики на частоте первой стоксовой компоненты, где отношение $I_s^+(t)/I_s^-(t)$ могло достигать нескольких десятков.

Анализ полученных спектрограмм показывает, что генерация основного излучения во встречных направлениях происходит на различных частотах, причем разность собственных частот встречных волн может достигать $0,05 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3).

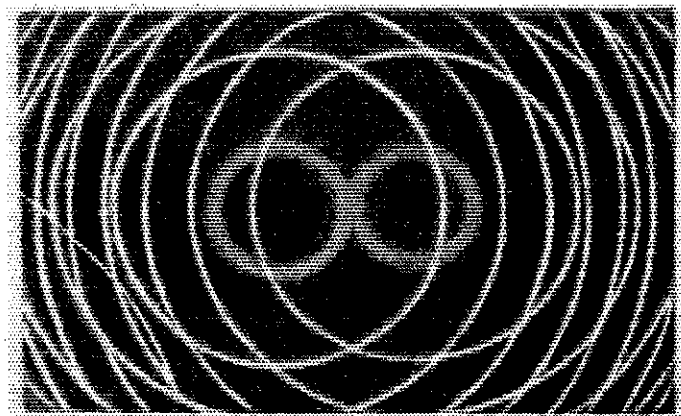


Рис. 3. Спектрограммы встречных волн (база интерферометра Фабри-Перо 0,5 см)

Различны и пространственные характеристики встречных волн: расходимость излучения на частоте рубина для более сильной волны оказывается меньшей.

Введение связи между встречными волнами с помощью тонкой стеклянной пластинки, установленной перпендикулярно оси резонатора, приводило к взаимной синхронизации встречных волн и выравниванию их характеристик.

На основании анализа проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

В кольцевом лазере на рубине, в резонаторе которого кроме активного элемента находится ВКР-активная нелинейная среда (сжатый водород), характеристики встречных волн оказываются идентичными лишь в случае, когда нелинейная среда пространственно однородна.

В случае пространственно неоднородной нелинейной среды в лазере возникает амплитудная и частотная невязанность на основной частоте и на частоте первой стоксовой компоненты.

Знак амплитудной невязанности (т.е. направление распространения более сильной волны) оказывается зависящим от плотности мощности излучения в нелинейной среде.

При больших плотностях мощности внутри резонатора одновременно с ВКР возникает как ВРМБ, так и ОВФ.

Качественно наблюдаемые зависимости можно объяснить следующим образом. В случае достаточно прозрачного фильтра, когда плотность мощности излучения внутри нелинейной среды превышает порог возбуждения вынужденного комбинационного излучения, но недостаточна для возникновения эффективного ОВФ-зеркала в кольцевом лазере, потери для встречных волн накачки оказываются неидентичными из-за различия коэффициентов преобразования в пространственно

неоднородной нелинейной среде. Последнее утверждение непосредственно следует, например, из анализа уравнений, описывающих прохождение встречных волн через такую среду, при учете пространственной зависимости коэффициента преобразования излучения накачки в первую стоксову компоненту и наличия в исследуемом канале потерь, не связанных с генерацией первой стоксовой компоненты [10]. К таким потерям относится не только уменьшение мощности накачки в результате диссипации, но и «расход» накачки, связанный с другими нелинейными процессами (например, с генерацией антистоксовой компоненты, параметрической генерацией второй стоксовой компоненты и др.).

При использовании же плотного просветляющегося фильтра плотность мощности излучения накачки внутри нелинейной среды возрастает и начинает превосходить порог возникновения ОВФ-зеркала. Наличие такого зеркала должно вести к перераспределению интенсивности встречных волн, что и наблюдается экспериментально.

Что же касается возникновения частотной невязанности, то она может быть следствием фазовой невязанности, возникающей в кольцевых лазерах при неравной интенсивности встречных волн, из-за оптического эффекта Керра [11].

Таким образом в настоящей работе впервые экспериментально исследованы невязанные эффекты в кольцевых комбинационных лазерах с пространственно неоднородной нелинейной средой. Показано, что характер и величина этих эффектов зависят от плотности мощности основного излучения.

Авторы выражают признательность А. С. Чиркину за полезное обсуждение настоящей работы.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-17326) и программы «Фундаментальная метрология».

Литература

1. Волновые и флуктуационные процессы в лазерах / Под ред. Ю. Л. Климонтовича. М., 1974.
2. Бьчков С. И., Лукьянов Д. П., Бакаляр А. И. Лазерный гироскоп. М., 1975.
3. Kravtsov N. V., Lariontsev E. G., Shelaev A. N. // Laser Phys. 1993. 3. P. 1.
4. Грасюк А. З., Лосев Л. Л., Луценко А. П. // Квант. электроника. 1988. 15. С. 2042.
5. Ефимков В. Ф., Зубарев И. С., Михайлов С. И. и др. // Там же. 1993. 20. С. 213.
6. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики. М., 1989.
7. Murray J. R., Javan A. // J. Mol. Spectr. 1972. 42. P. 1.
8. Бутылкин В. С., Фишер П. С., Хронопуло Ю. Г. // Письма в ЖТФ. 1976. 2. С. 258.
9. Кравцов Н. В., Наумкин Н. И. // Изв. АН СССР. 1988. 56, № 6. С. 1240.
10. Kravtsov N. V., Kravtsov N. N. // J. Russ. Laser. Res. 1996. 17. P. 457.
11. Кравцов Н. В., Ларионцев Е. Г. // ЖТФ. 1980. 50. С. 182.

Поступила в редакцию
13.01.97