

УДК 535.375.5+621.373:535.

ВЛИЯНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ НА КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НАКАЧКИ В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ

Беспалов В. Г., Стаселько Д. И.

Исследована когерентность излучения накачки, прошедшей через комбинационно-активную среду при нестационарном и квазистационарном режимах преобразования ВКР. Показано, что при эффективном преобразовании накачки когерентность ее излучения на выходе из среды существенно меняется по сравнению с исходным пучком. Это является следствием процесса регенерации излучения накачки из первого стоксового компонента со сдвигом фазы относительно исходного излучения, обусловленным нестационарностью режима генерации, а также параметрическими взаимодействиями компонентов ВКР. В квазистационарном режиме на когерентность излучения накачки влияют временные осцилляции, вызванные конкуренцией ВКР в направлении вперед и обратного ВКР.

В последнее время интерес исследователей привлекает проблема формирования пространственной структуры и когерентности излучения при возбуждении ВКР [1-3], что связано с перспективами использования явления ВКР для управления частотой, длительностью и направленностью лазерного излучения [4]. При этом основное внимание уделялось изучению характеристик стоксовых и антистоксовых компонентов ВКР. В ряде приложений, например при создании импульсных источников «белого» света, представляет интерес использование наряду с компонентами ВКР также и прошедшего через кювету излучения накачки [5], однако данные о влиянии ВКР на когерентность этого излучения в литературе отсутствуют.

Целью данной работы было исследование когерентности излучения накачки в зависимости от режима и условий возбуждения ВКР.

Источником накачки служил неодимовый лазер с преобразованием излучения во вторую гармонику, описанный в [6]. Пучок излучения на выходе лазера характеризовался следующими параметрами: $\lambda_n = 528$ нм, $\tau_n = 20$ нс, $\Delta \nu \leq 10^{-3}$ см⁻¹, степень пространственной когерентности $|\gamma| \geq 0.9$ между крайними точками сечения, диаметр пучка 4 мм, $W_{\max} \simeq 1.5$ Дж. В качестве среды использовался сжатый водород, давление которого изменялось от 3 до 40 атм, что соответствовало изменению времени поперечной релаксации T_2 от 4 до 0.5 нс [7]. Кювета с водородом имела длину 100 см и диаметр 6 см; окна кюветы были заклонены к оси пучка накачки приблизительно на 1.5° для устранения влияния обратной связи для стока излучения. Энергия пучков накачки и преобразованного излучения измерялась калориметрами ИКТ-1Н. Временной ход импульсов излучения регистрировался фотоприемником ФК-19 и осциллографом С7-10Б с временным разрешением ~ 1 нс. Спектры регистрировались при помощи интерферометра Фабри—Перо с базой 30 см и разрешением $\delta \nu \approx 5 \cdot 10^{-4}$ см⁻¹. Пространственная когерентность (ПК) излучения исследовалась голографическим методом [8].

Излучение накачки фокусировалось в кювету линзой с фокусным расстоянием $f = 10$ м, что обеспечивало режим возбуждения ВКР волнами, близкими к плоским, с диаметром пучка ~ 1 мм и подавление параметрических процессов во всем исследованном диапазоне давлений водорода. При малых давлениях ($p = 3$ атм) возбуждалось лишь ВКР в направлении вперед и режим генерации был нестационарным ($\tau_n \simeq 5T_2$), а при $p = 40$ атм в условиях квазистационар-

ного возбуждения ($\tau_n \approx 40T_2$) наряду с ВКР в направлении вперед наблюдалось также и обратное ВКР с эффективностью до 10 %.

При исследовании зависимости ПК прошедшего излучения накачки от мощности падающего пучка на вход когерометра одновременно с преобразованным подавался второй (исходный) пучок накачки, который не возбуждал ВКР, хотя и проходил через кювету, так как его мощность была ниже порогового значения. В этом случае измерялась степень взаимной ПК между точками, лежащими на оси преобразованного и исходного пучков. Для измерения временного хода стока излучения и прошедшей накачки использовались области диаметром 0.1 мм вблизи оси соответствующих пучков.

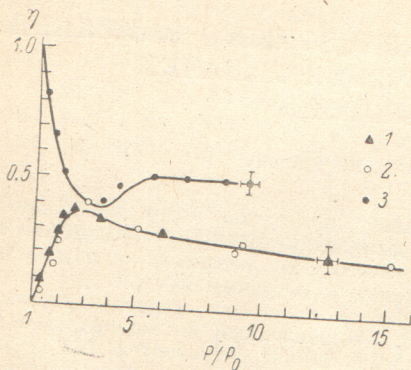


Рис. 1. Эффективность преобразования энергии накачки P в первый стоксовый компонент в зависимости от превышения пороговой энергии накачки P_0 .

1, 2 — стоксов компонент при квазистационарном и нестационарном ВКР соответственно, 3 — проходящая накачка.

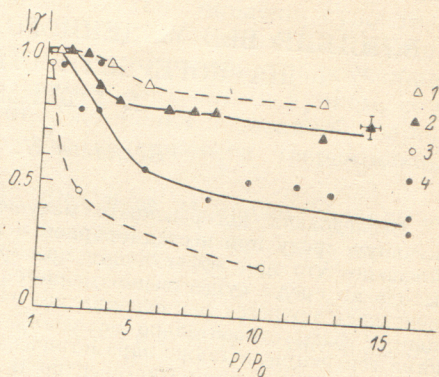


Рис. 2. Пространственная когерентность излучения проходящей накачки при квазистационарном (1, 2) и нестационарном (3, 4) ВКР.

1, 3 — расчет.

Результаты экспериментов приведены на рис. 1—4. Как следует из рис. 1, зависимость эффективности преобразования излучения накачки в первый стоксовый компонент ВКР в направлении вперед от мощности возбуждающего излучения была практически одинаковой в обоих режимах, достигая 40 % при трехкратном превышении над пороговым значением ($P/P_0 = 3$) с последующей стабилизацией на уровне 25—30 %. Пространственная когерентность прошедшего излучения накачки при $P/P_0 \leq 2-2.5$, когда эффективность преобразования не превышала 15—25 %, была близка к единице как между пучками накачки, так и по сечению преобразованного пучка. При последующем росте превышения накачки над пороговой наблюдалось снижение значений $|\gamma|_{1,2}$ до ~ 0.8 в квазистационарном и приблизительно 0.35—0.5 при нестационарном режиме возбуждения (рис. 2). Одновременно с этим происходили существенные измерения и в спектре прошедшего излучения накачки. В нестационарном режиме при $P/P_0 \geq 10$ спектр накачки уширялся более чем в 2 раза (рис. 3), тогда как в случае квазистационарного преобразования полуширина спектрального распределения накачки практически не менялась с ростом ее мощности.

Для объяснения наблюдаемых особенностей функции пространственно-временной когерентности излучения накачки обратимся к анализу изменений фазы волны накачки при стационарном и нестационарном режимах ее взаимодействия со стоксовой волной. Система уравнений для модели плоских волн без учета дисперсии среды, описывающих процесс преобразования волны накачки с амплитудой A_n в распространяющуюся вперед стоксову волну с амплитудой A_c , может быть представлена в движущейся системе координат как [9]

$$\frac{\partial A_n}{\partial z} = -\frac{g}{2} \frac{\omega_n}{\omega_c} |A_c|^2 A_n, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_c}{\partial z} = \frac{g}{2} |A_n|^2 A_c \quad (2)$$

(стационарный режим) и

$$\frac{\partial A_n}{\partial z} = -\frac{g}{2} \frac{\omega_n}{\omega_c} A_\phi A_c, \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_c}{\partial z} = \frac{g}{2} A_\phi A_n, \quad (4)$$

$$\frac{\partial A_\phi}{\partial \tau} = \frac{A_c A_n - A_\phi}{T_2} \quad (5)$$

(нестационарный режим), где $z=z'$, $\tau=t-z'n/c_0$ — координаты, g — коэффициент усиления стационарного ВКР, T_2 — время жизни оптических фононов, $A_{n,c,\phi}$, $\omega_{n,c,\phi}$ — нормированные амплитуды и частоты накачки стоксовой и фононной волны соответственно.

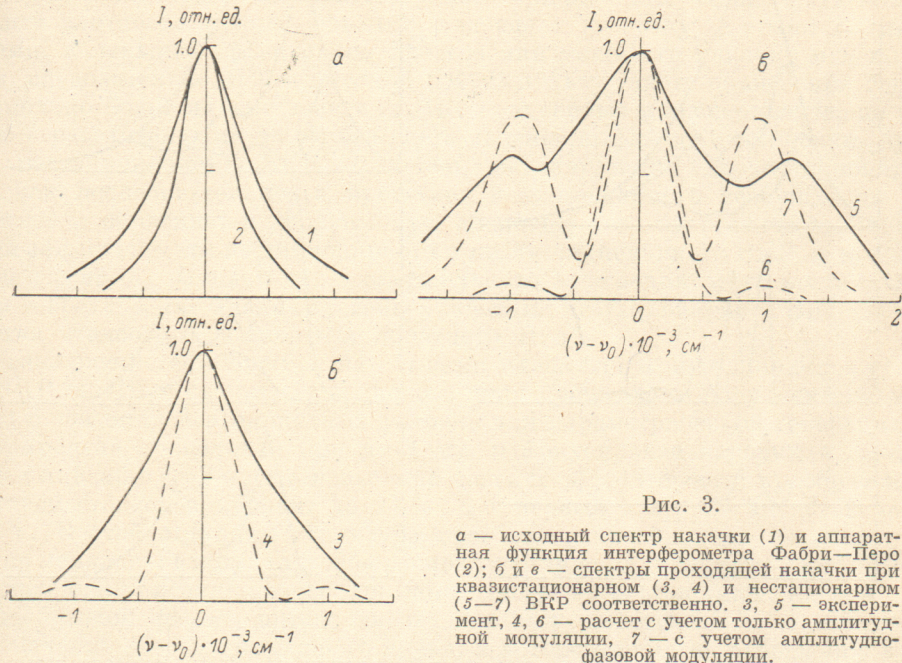


Рис. 3.

а — исходный спектр накачки (1) и аппаратная функция интерферометра Фабри—Перо (2); б и в — спектры проходящей накачки при квазистационарном (3, 4) и нестационарном (5—7) ВКР соответственно. 3, 5 — эксперимент, 4, 6 — расчет с учетом только амплитудной модуляции, 7 — с учетом амплитудно-фазовой модуляции.

Из уравнений (1), (2) следует, что фаза волны накачки в стационарном режиме взаимодействия не зависит ни от изменений фазы стоксовой волны, обусловленных флуктуациями затравочных спонтанных колебаний молекул, ни от степени истощения накачки. Таким образом, при стационарном режиме ВКР когерентность излучения накачки $|\gamma|_{1,2}^R$, определяемая как [10]

$$|\gamma|_{1,2}^R = \frac{\int_0^{\tau_n} A_1(t) A_2^*(t) dt}{\left[\int_0^{\tau_n} |A_1(t)|^2 dt \int_0^{\tau_n} |A_2(t)|^2 dt \right]^{1/2}}, \quad (6)$$

где $A_1(t)$ и $A_2(t)$ — амплитуды колебаний прошедшей накачки в различных точках ее сечения либо на оси пучков, относящихся к различным каналам, зависит лишь от временного хода интенсивности накачки.

В то же время в нестационарном режиме, согласно (3), (4), (5), к моменту полного истощения накачки, когда амплитуда A_n достигает нулевого значения, фононная и стоксова волны сохраняют свои фазы, обеспечивающие производной $\partial A_n / \partial z$ знак, противоположный знаку A_n . В результате после прохождения амплитуды волны накачки через ноль амплитуда A_n в соответствии с (3) меняет свой знак, что равносильно сдвигу фазы волны на π [11]. Как будет видно из дальнейшего, это обстоятельство способно привести к резкому изменению степени когерентности прошедшего излучения накачки.

Для количественной оценки величины $|\gamma|_{1,2}^n$ в рассматриваемых режимах, согласно выражению (6), необходимо знать временной ход импульсов проходящего излучения накачки. Типичные осциллограммы этих импульсов, а также стоксовых импульсов приведены на рис. 4 для квазистационарного и нестационарного режимов ВКР при различных уровнях накачки.

В случае квазистационарного режима ВКР импульсы стоксова рассеяния вперед и прошедшей накачки характеризовались наличием осцилляций с периодом около 6 нс, близким к времени двойного прохода излучения по длине

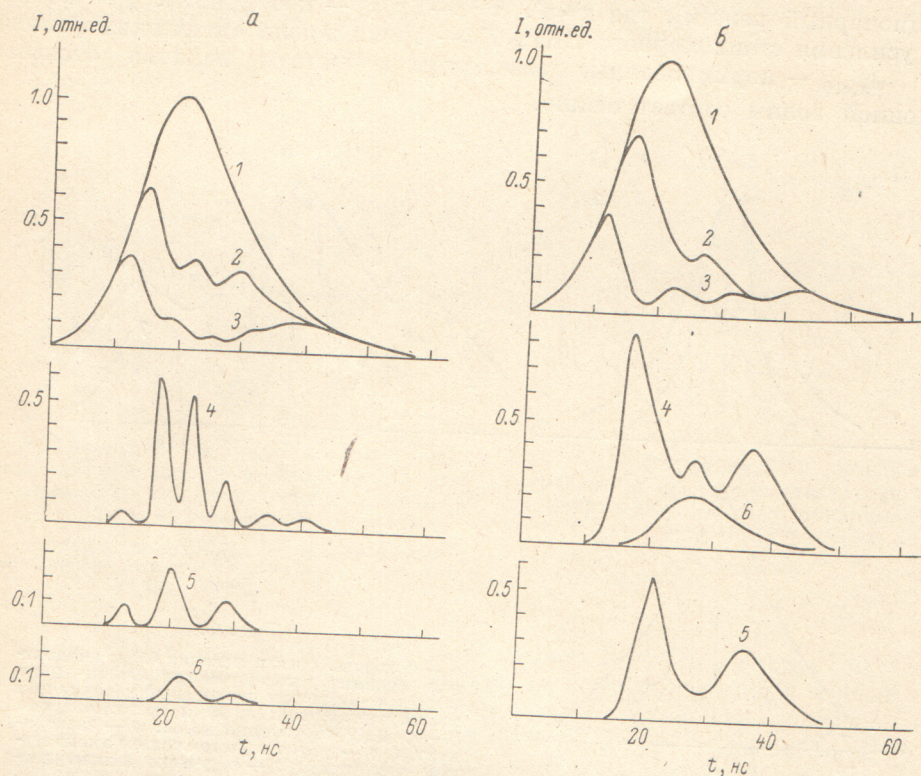


Рис. 4. Осциллограммы импульсов проходящей накачки (1—3) и стоксова компонента (4—6) в режимах квазистационарного (а) и нестационарного (б) ВКР.
 $P/P_0 \approx 1$ (1, 6); $P/P_0 \approx 2$ (2, 5); $P/P_0 \approx 5$ (3, 4).

кюветы. Это обстоятельство, а также наличие заметного (до 10 % от мощности накачки) обратного ВКР указывают на то, что причиной наблюдаемых осцилляций является срыв ВКР, направленного вперед, вследствие конкуренции с ним обратного рассеяния [12]. При нестационарном режиме ($p = 4$ атм) обратное ВКР отсутствовало, а осцилляции накачки и стоксова излучения не имели отмеченной выше периодичности.

Полученные осциллограммы были использованы для оценки значений $|\gamma|_{1,2}^n$ с использованием выражения (6), а также для оценки спектральных распределений интенсивности излучения прошедшей накачки с помощью фурье-преобразования временного хода амплитуды импульса

$$I(\omega) = \left[\int_0^{\tau_n} A(t) e^{-i\omega t} dt \right]^2. \quad (7)$$

При этом учитывалось, что в точке наибольшего истощения волны накачки при нестационарном ВКР фаза ее колебаний меняется на π . Результаты численных расчетов (по (6) и (7)) представлены на рис. 2, 3. Качественное соответствие их экспериментальным данным показывает, что причиной падения пространственной когерентности и уширения спектра проходящего излучения накачки

в нестационарном режиме действительно является колебательный характер энергообмена между взаимодействующими волнами и связанные с ним скачкообразные изменения фазы волны накачки, поскольку без учета этих скачков картина пространственно-временной когерентности в обоих исследованных режимах должна быть примерно одинаковой.

Несколько другой подход к объяснению сравнительно высокой степени ПК прошедшего излучения накачки при квазистационарном возбуждении может быть связан с отмеченным выше экспериментальным фактом периодического срыва генерации ВКР, направленного вперед, из-за конкуренции с обратным ВКР (рис. 3). Длительность осцилляций стока излучения составляла около 3 нс по уровню половинной мощности и, следовательно, в пределах каждой осцилляции процесс возбуждения ВКР приближался к нестационарному. При этом отличие развития ВКР в отдельных осцилляциях от нестационарного возбуждения одиночным импульсом при $p=3$ атм состоит в существенно меньшей плотности фотонов накачки, падающих на среду за время T_2 , иными словами, в меньшем эффективном превышении мощности накачки над пороговой и, следовательно, более высокой ПК. В пользу такого объяснения говорят и несколько более низкие значения ПК, полученные в эксперименте, по сравнению с рассчитанными по (6) без учета изменения фаз волны накачки, присущего нестационарному ВКР. Наконец, интерпретация квазистационарного ВКР как последовательности процессов нестационарного возбуждения ВКР качественно объясняет и наблюдаемую аналогию хода энергетических зависимостей эффективности нестационарного и квазистационарного ВКР от мощности накачки (рис. 1). Однако для окончательного выяснения этого вопроса необходим теоретический анализ системы уравнений нестационарного ВКР с учетом влияния стокового компонента обратного ВКР.

В заключение остановимся на влиянии параметрических процессов генерации ВКР на ПК и структуру волнового поля прошедшего излучения накачки. С целью создания благоприятных условий для параметрической генерации ряд экспериментов проводился при $p=3$ атм и фокусировке накачки в середину кюветы линзой с $f=2$ м, что позволяло достичь эффективности преобразования во второй стоковый компонент до 30 %, а в первый и второй антистоковые до 1—3 %. В этой ситуации структура преобразованного пучка накачки существенно менялась: вокруг гауссова распределения поля, примерно соответствующего исходному, возникал довольно заметный ореол, состоящий из набора пятен кольцеобразной формы, интенсивность которых достигала 5 % от максимального значения на оси прошедшего пучка, а когерентность по отношению к центральной зоне накачки не превышала 0.3. В то же время когерентность в пределах центральной зоны практически не зависела от возбуждения параметрических процессов. Поскольку площадь, занимаемая ореолом, существенно превышала площадь исходного пучка, но находилась в пределах областей, занимаемых первым и вторым стоковыми компонентами, то его возникновение связано, по-видимому, с параметрическим процессом обратного преобразования излучения первого стокового компонента в излучение накачки, аналогичным генерации антистоковой волны и определяемым условием фазового синхронизма [13]

$$k_{\pi} + k_{20} = 2k_0 \quad (8)$$

При этом вследствие нестационарности волнового фронта первого стокового компонента [2, 3] расходимость его непрерывно меняется, что может объяснить нерегулярность кольцевой структуры в ореоле накачки. Низкие значения $|\gamma|$ ореола по отношению к центральной области пучка прошедшей накачки, по нашему мнению, обусловлены существенным различием процессов перехода энергии излучения первого стокового компонента в излучение накачки (регенераций накачки) при нестационарном взаимодействии и при параметрической генерации с участием высших стоковых компонентов [13].

В целом проведенное исследование показало, что возбуждение ВКР существенно влияет на пространственно-временную когерентность прошедшего излучения накачки, особенно в условиях нестационарного и параметрического взаимодействия компонентов ВКР с накачкой. Наиболее высокие значения

когерентности прошедшей накачки могут быть достигнуты, по-видимому, при стационарном преобразовании в отсутствие осцилляций, вызываемых обратным ВКР.

Авторы благодарны В. А. Горбунову за полезные обсуждения результатов работы.

Литература

- [1] Беспалов В. И., Пасманик Г. А. — ДАН СССР, 1973, т. 210, с. 309—312.
- [2] Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Киселев А. М., Пасманик Г. А. — Квант. электрон., 1979, т. 6, № 5, с. 996—1003.
- [3] Беспалов В. Г., Духовный А. М., Стаселько Д. И. — Опт. и спектр., 1985, т. 58, в. 6, с. 1038—1042.
- [4] Басов Н. Г., Грасюк А. З., Карев Ю. И., Лосев Л. Л., Смирнов В. Г. — Квант. электрон., 1979, т. 6, № 6, с. 1329—1331.
- [5] Беспалов В. Г., Духовный А. М., Стаселько Д. И. — В кн.: Проблемы оптической голографии. М., 1981, с. 55—66.
- [6] Артемьев Е. Ф., Беспалов В. Г., Брыскин В. З., Ворзобова Н. Д., Ермолаев М. М., Стаселько Д. И. — В кн.: Оптическая голография и ее применения. Л., 1985.
- [7] Murrey J. R., Javan A. — J. Mol. Spectr., 1972, v. 42, N 1, p. 1—26.
- [8] Стаселько Д. И. — В кн.: Оптическая голография. Л., 1973, с. 4—70.
- [9] George S. M., Harris C. B. — Phys. Rev. A, 1983, v. 28, N 2, p. 863—878.
- [10] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1977. 720 с.
- [11] Горбунов В. А. — Квант. электрон., 1982, т. 9, № 1, с. 152—155.
- [12] Johnson R. V., Margburger J. H. — Phys. Rev. A, 1971, v. 4, N 3, p. 1175—1182.
- [13] Бутылкин В. С., Каплан А. Е., Хронопуло И. Г., Якубович Е. М. Резонансные взаимодействия света с веществом. М., 1977. 351 с.

Поступило в Редакцию 13 января 1986 г.