

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2008, том 44, № 6

УДК 535.015

**ДВУХРЕЗОНАТОРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР
С САМОСИНХРОНИЗАЦИЕЙ ФАЗЫ***

**Д. Б. Колкер^{1,2}, А. К. Дмитриев^{1,2}, А. С. Дычков²,
П. Горелик³, Ф. Вонг³, Ж. Ж. Зонди⁴**

¹*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
E-mail: dkolker@mail.ru*

²*Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

³*Массачусетский технологический институт, г. Бостон, США*

⁴*Институт национальной метрологии, г. Париж, Франция*

Представлены результаты исследования динамики прецизионного делителя частоты на 3 на основе как двухрезонаторного, так и трехрезонаторного параметрических генераторов с самосинхронизацией фазы. Показано, что в обоих случаях признаки самосинхронизации фазы проявляются в возникновении провала интенсивности и уширении собственной моды резонатора.

Введение. Эффект самосинхронизации фазы сигнальной и холостой волн в оптическом параметрическом генераторе (ОПГ) в настоящее время позволяет исследовать статическое и динамическое поведение оптических систем с высокой нелинейностью. Оптические параметрические генераторы с самосинхронизирующейся фазой (ОПГССФ) могут быть использованы в комбинации с фемтосекундным лазером для прецизионного измерения оптических частот, а также в квантово-информационных задачах [1, 2]. В ряде работ отмечается возможность применения ОПГССФ для генерации сжатых состояний света [3] и ярких запутанных состояний света [4]. ОПГССФ включает в себя дополнительный механизм для фазового захвата параметрически

* Работа выполнена при поддержке программы DoD MURI (грант № N00014-02-1-0717), программы MIT-France, а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-02-16989).

взаимодействующих сигнальной и холостой волн, разность фаз между которыми остается величиной постоянной в отличие от традиционного ОПГ. Важной особенностью ОПГССФ является наличие пассивного механизма фазового захвата, который не требует использования электронных устройств фазовой привязки. ОПГССФ можно отнести к прецизионным оптическим делителям частоты, в которых отношение между частотами накачки, сигнальной и холостой является целым числом ($n=2,3,4$). Другая отличительная особенность ОПГССФ – это возможность генерации n стабильных состояний, связанных по фазе и эквидистантно разнесенных на величину $2\pi/n$, что позволяет кодировать информацию в координатах интенсивность–фаза применительно к квантово-информационным задачам.

Целью данной работы является исследование динамики двухрезонаторного ОПГССФ в сравнении с трехрезонаторным ОПГ, представленным в [4], а также исследование области устойчивости и выходных характеристик ОПГССФ для потенциального использования как мультиоктавного синтезатора при абсолютном измерении оптических частот.

Теоретическая модель параметрического генератора с самосинхронизацией фазы. В традиционном невырожденном ОПГ разность фаз сигнальной и холостой волн – случайная величина, которая возникает из-за стохастического процесса, происходящего от спонтанного параметрического шума флуоресценции. Механизм фазового захвата в ОПГССФ может быть объяснен взаимной инжекцией двух параметрически взаимодействующих сигнальной и холостой волн и удвоенной холостой волны (процесс генерации второй гармоники). Стабильность и динамика двухрезонаторного и трехрезонаторного ОПГ с самосинхронизирующейся фазой были исследованы теоретически в [1]. Конкуренция двух нелинейностей ведет к бистабильности, и только верхняя ветвь решения для этой системы является стабильной. При достаточных мощностях накачки ОПГССФ может быть дестабилизирован посредством хопф-раздвоения. Диапазон фазового самозахвата может быть в несколько раз больше собственной ширины линии резонатора ОПГ, так как устройство устойчиво работает и в припороговых состояниях [1].

Рассмотрим динамику ОПГССФ для кольцевого резонатора с нелинейной средой в виде двухсекционного кристалла (рис. 1). В первой секции происходит параметрическая генерация, во второй секции – удвоение сигнальной волны. Системы уравнений связанных волн с начальными условиями

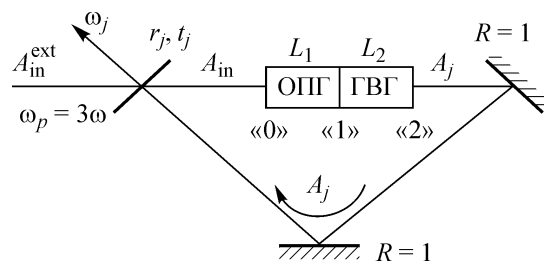


Рис. 1. Схема модели кольцевого резонатора ОПГССФ ($\Delta k_{\text{ОПГ}} = k_p - k_i - k_s = 0$, $\Delta k_{\text{ГВГ}} = k_i - 2k_s$). Нелинейная среда (ОПГ и ГВГ) состоит из кристалла периодически поляризованного ниобата лития (PPLN)

для секций ОПГ и ГВГ (генератор второй гармоники) и комплексными амплитудами A_j запишем как в [1]:

$$\begin{cases} \partial_z A_p = i A_s A_i, \\ \partial_z A_s = i A_p A_i^*, \\ \partial_z A_i = i A_p A_s^*; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \partial_{z'} A_p = 0, \\ \partial_{z'} A_s = i S A_i^2 \exp(+i 2 \xi z'), \\ \partial_{z'} A_i = i S A_s A_i^* \exp(-i 2 \xi z'), \end{cases}$$

$$A_j(t + \tau, z = 0) = r_j \exp(i \Delta_j) A_j(t, L_1 + L_2) + A_{in}(j). \quad (2)$$

Здесь индекс $j = p, s, i$ соответствует либо волне накачки (p), либо сигнальной (s), либо холостой (i) волнам; индексы 1 и 2 (при L) относятся к ОПГ- и ГВГ-секциям соответственно; Δ_j – расстройка частоты для каждой из длин волн относительно максимума пропускания резонатора ОПГ.

Введем следующие параметры:

$$A_j = g_1 L_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_0 c V}{2 \hbar \omega_j}} E_j, \quad S = g_2 L_2 / g_1 L_1,$$

$$g_1 = \frac{\chi_{\text{ОПГ}}^{(2)}}{2c} \sqrt{\frac{2 \hbar \omega_i \omega_s \omega_p}{\varepsilon_0 V n_i n_s n_p}}, \quad g_2 = \frac{\chi_{\text{ГВГ}}^{(2)}}{2c} \sqrt{\frac{2 \hbar \omega_i^2 \omega_s}{\varepsilon_0 V n_i^2 n_s}},$$

$$\chi^{(2)} = S e^{(-i \xi)} (\sin \xi / \xi),$$

где A_j ($j = p, s, i$) – комплексная амплитуда для волн накачки, сигнальной и холостой соответственно; g_1 и g_2 – коэффициенты усиления для ОПГ- и ГВГ-секций в кристалле; S – параметр нелинейной связи; r_j – потери за один обход резонатора для волн накачки, сигнальной и холостой; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\chi^{(2)}$ – нелинейная диэлектрическая восприимчивость второго порядка; L_1 и L_2 – длины ОПГ- и ГВГ-секций соответственно; n_i, n_s, n_p – показатели преломления в кристалле на частотах накачки, сигнальной и холостой; E_j – напряженность электрического поля на частотах накачки, сигнальной и холостой; $\xi = \frac{1}{2} \Delta k_{\text{ГВГ}} L_2$ – фазовая расстройка при ГВГ-процессе.

Системы уравнений (1) решаются численно и аналитически. Аналитические решения получаются интегрированием (1) при подстановке комплексных амплитуд, разложенных в степенной ряд Маклорена

$$A_j(z) = A_j(0) + \sum_{n=1}^{\infty} [\partial_z^{(n)} A_j]_0 z^n / n!$$

При решении систем уравнений (1) ограничимся квадратичным приближением. Обозначим эту аппроксимацию как ML1.

Для первого типа взаимодействия в периодически поляризованном кристалле эффективный нелинейный коэффициент $d_{\text{ОПГ}} \approx d_{\text{ГВГ}}$, при этом

$$n_1 \approx n_2 \approx n_3 \quad \text{и} \quad \omega_p = 3\omega, \quad \omega_s = 2\omega, \quad \omega_i = \omega,$$

тогда параметр нелинейной связи S может быть аппроксимирован как

$$S = (L_2/L_1)/\sqrt{3},$$

например для $L_2/L_1 = 1/3$ параметр $S \approx 0,2$.

На выходе ГВГ кристалла аппроксимация ML1 дает решения для амплитуд сигнальной и холостой волн в зависимости от амплитуд на выходе ОПГ кристалла (на рис. 1 точки обозначены как «0» и «1»):

$$A_p(t, L_1 + L_2) = A_p(t, 0) + iA_s(t, 0)A_i(t, 0), \quad (3a)$$

$$A_i(t, L_1 + L_2) = A_i(t, 0) + iA_p(t, 0)A_s^*(t, 0) + i\chi^* A_s^2(t, 0), \quad (3б)$$

$$A_s(t, L_1 + L_2) = A_s(t, 0) + iA_p(t, 0)A_i^*(t, 0) + i\chi A_i(t, 0)A_s^*(t, 0). \quad (3в)$$

Стационарные решения уравнений (3) для двухрезонаторного ОПГССФ, в котором только сигнальная и холостая волны находятся в резонансе, приводятся в [1].

Стабильность решения систем (1) исследована методом линейного анализа. Параллельно системы уравнений (1) решались и методом численного интегрирования (1) с граничными условиями (2). На рис. 2 приведено сравнение решений систем (1), полученных аналитически и численно. Хопф-раздвоение возникает при отношении входной интенсивности к пороговой при $N = 1,65$ (где $N = I/I_{\text{th}}$ – интенсивность накачки, приведенная к пороговой). Экспериментальное наблюдение этих нестабильностей может потребовать более высокой интенсивности накачки. Динамическое поведение ОПГССФ представлено хопф-раздвоением (только верхняя ветвь устойчива), в то время как обычный ОПГ показывает суперкритическое раздвоение (рис. 3).

Следуя работе [1], запишем фазовые соотношения для волн накачки, сигнальной и холостой (для суммы и разности соответственно) в виде

$$\sin \mu = \sqrt{I_0/I_p}, \quad \mu = \varphi_p - \varphi_s - \varphi_i, \quad (4)$$

$$\sin \eta = -\frac{1}{2|\chi|\sqrt{I_i}} [\kappa_i \sqrt{\Delta_s/\Delta_i} - \kappa_s \sqrt{\Delta_i/\Delta_s}], \quad \eta = \varphi_p - 2\varphi_s - \xi.$$

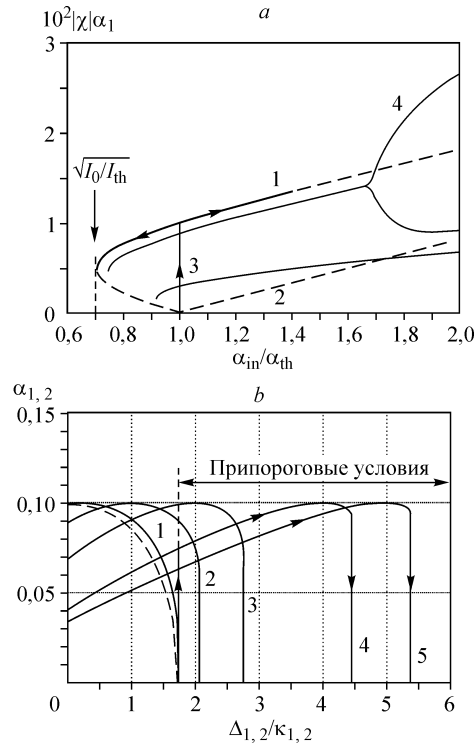


Рис. 2. Сравнение стационарных решений для двухрезонаторного ОПГССФ: *a* – аналитическое (аналитическая верхняя ветвь (кривая 1), штриховая часть линии обозначает нестабильные решения, аналитическая нижняя ветвь (2), численные решения для $\chi = 0,05$ (3) и для $\chi = 0,20$ (4)); *b* – численное (форма перестроенных кривых ОПГССФ, рассчитанная теоретически: $\chi = 0,01$ (кривая 1), $\chi = 0,05$ (2), $\chi = 0,10$ (3), $\chi = 0,20$ (4), $\chi = 0,25$ (5))

Здесь I_i – интенсивность поля сигнальной частоты; $\Delta_p, \Delta_s, \Delta_i$ – расстройка частоты ОПГ на длинах волн накачки, сигнальной и холостой относительно максимума пропускания резонатора [1]. Таким образом, фазы сигнальной и холостой волн в ОПГССФ привязаны к фазе накачки (4).

Генерация трех фазовых состояний описывается как

$$\varphi_{s(i)} = \varphi_0, \varphi_0 \pm 2\pi/3.$$

В этом случае возможна ситуация, когда одной величине интенсивности будут соответствовать три состояния фазы, разнесенные на $2\pi/3$.

Двухрезонаторный параметрический генератор. В [3] был продемонстрирован трехрезонаторный ОПГССФ, который накачивался стабилизированной по внешнему интерферометру диодной системой МОРА (Master Oscillator Power Amplifier), частота которой могла перестраиваться в области 842 нм в пределах нескольких нанометров. Особый дизайн кристалла PPLN дал возможность выбрать соотношение периодов между ОПГ- и ГВГ-секциями для достижения оптимального коэффициента преобразования при

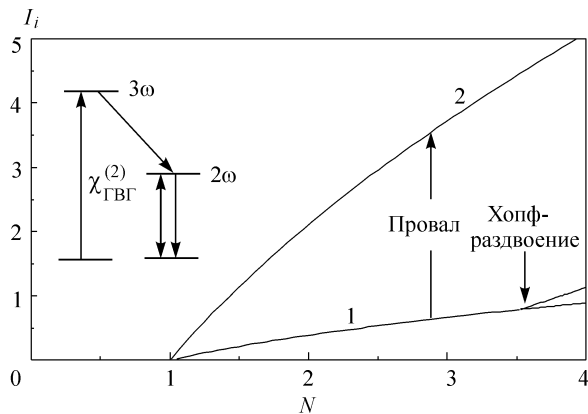


Рис. 3. Зависимость выходной интенсивности ОПГ от N : кривая 1 – для ОПГССФ ($S = 0,2$, $L_1 = 20$ мм, $L_2 = 10$ мм, $N = N_{in}/N_{th}$), кривая 2 – для традиционного ОПГ ($S = 0$, $L_2 = 0$)

фиксированной температуре, таким образом, конструкция нового кристалла PPLN с переменным периодом $\Lambda_{ГВГ}$ в новом эксперименте позволила сделать процесс оптимальным [4]. В отличие от работы [3] использовался специально разработанный для этого эксперимента монолитный резонатор (рис. 4).

Двухрезонаторный оптический параметрический генератор с самосинхронизирующейся фазой (ДОПГССФ) накачивался Nd-лазером мощностью 5 Вт. Мощность накачки превышала пороговую мощность ($P_{th} = 35$ мВт) в 15 раз. В качестве нелинейного элемента использовалась двухсекционная пе-

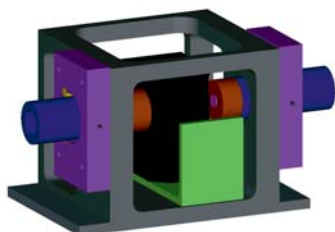
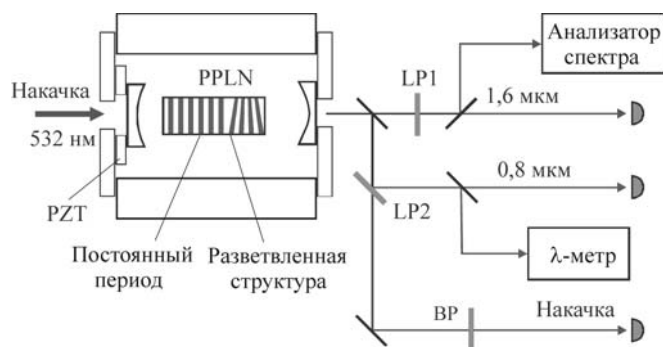


Рис. 4. Схема экспериментальной установки ОПГССФ и конструкция монолитного резонатора (PZT – пьезокерамика, ВР (Band Pass Filter) – полосовой фильтр, пропускающий излучение накачки, LP1, LP2 – фильтры для сигнальной и холостой волн)

риодическая структура из ниобата лития $10 \times 0,5 \times 20$ мм. Первая секция длиной 13 мм и периодом $\Lambda_{\text{ОПГ}} = 7,2$ мкм применялась для параметрической генерации в режиме деления частоты на 3, а вторая секция с переменным периодом $\lambda_{\text{ГВГ}} = 19,45\text{--}19,75$ мкм – для удвоения сигнальной частоты. Кристалл термостабилизировался при температуре $203,6$ °С. Для наблюдения кластеров на длинах волн $\lambda_s \sim 798,45$ нм и $\lambda_i \sim 1596,9$ нм несимметричный резонатор параметрического генератора сканировался при приложении пилообразного напряжения на пьезокерамику одного из зеркал резонатора. Межмодовый интервал ОПГ составлял 1500 МГц.

Было получено два режима генерации ОПГ: каскадный режим и режим самосинхронизации фазы ОПГССФ. В каскадном режиме ОПГ сигнальная волна является источником накачки вторичного параметрического генератора, причем этот режим наблюдался при отстройке частоты ОПГ от режима 3ω , 2ω , ω . Перестройка длины волны достигается с помощью температурной перестройки и перемещения по оси Y кристалла PPLN со специальной структурой с переменным периодом $\Lambda_{\text{ГВГ}}$. При достижении пороговой мощности для вторичного параметрического генератора происходит насыщение выходной мощности для первичной сигнальной волны (рис. 5). В этом случае выходная мощность вторичного ОПГ растет линейно в зависимости от мощности накачки, что соответствует теории [3]. Пороговая мощность накачки для первичного ОПГ составила 35 мВт (минимум 20 мВт), порог вторичного ОПГ не превышал 70 мВт. В данной работе продемонстрирована частотная перестройка вторичного ОПГ без всякого воздействия на первичный ОПГ. Для этого кристалл перемещался в резонаторе ОПГ по оси Y при фиксированной температуре 204 °С. Длина сигнальной волны первичного ОПГ измерялась с помощью λ -метра синхронно с измерением длины волны в области 1,6 мкм оптическим анализатором спектра. Ранее были проведены исследования в диапазоне перестройки 200 нм относительно первичной холостой волны [5].

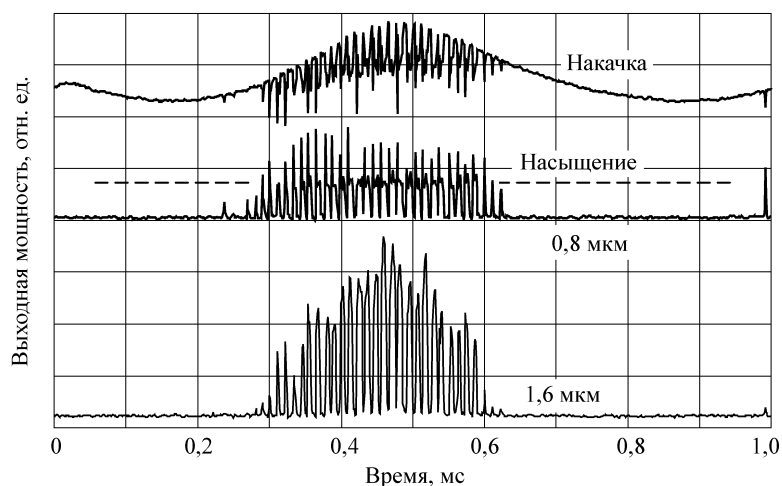


Рис. 5. Каскадный режим генерации в ОПГ

Каскадный режим не наблюдался в трехрезонаторном параметрическом генераторе [4], так как порог генерации вторичного ОПГ был намного выше.

Режим самосинхронизации фазы в ДОПГССФ был продемонстрирован около точки деления частоты на 3, где каскадный (пятичастотный) режим не наблюдался. Действительно, провал интенсивности, идентичный [3], возникал при превышении мощности накачки над пороговой в 10 раз (рис. 6, *a*). В этом случае не наблюдалось никакого насыщения выходной мощности сигнальной волны в отличие от каскадного режима. Поведение кластеров как на сигнальной, так и на холостой частотах было идентичным. Диапазон самозахвата фазы линейно возрастал при увеличении мощности накачки. При

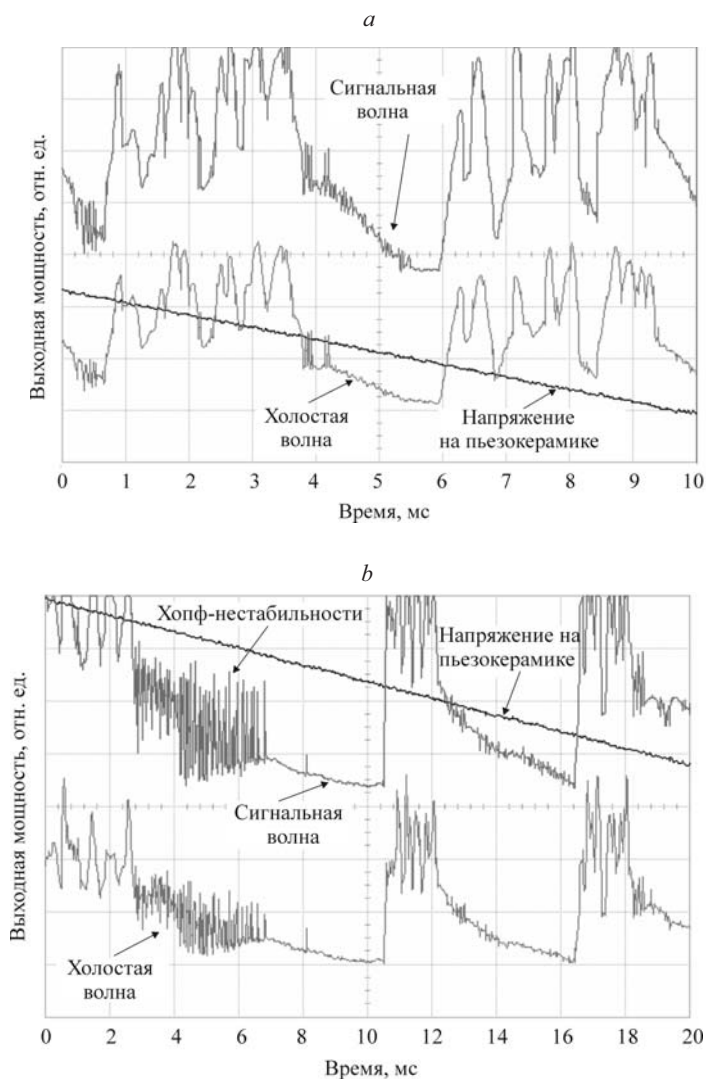


Рис. 6. Режим самосинхронизации фазы в двухрезонаторном ОПГ: наблюдается провал интенсивности и уширение моды резонатора [4] (*a*), хопф-нестабильности в ОПГССФ при $N = 20$ (*b*)

$N > 20$ система дестабилизировалась и экспериментально наблюдались хопф-нестабильности (рис. 6, b).

Внутрирезонаторные биения на частоте от 80 до 110 МГц были получены с помощью PIN-фотодиода между удвоенной холостой и сигнальной частотами прямо на выходе резонатора ОПГ. Безусловно, сигнал биений дрейфовал, так как Nd-лазер не был стабилизирован в отличие от [3] (стабильная накачка МОР-системы в области 842 нм) и система термоконтроля не позволяла поддерживать температуру лучше чем 0,1 К.

Заключение. Наблюдаемые признаки самосинхронизации фазы в двухрезонаторном и трехрезонаторном параметрических генераторах идентичны, что хорошо согласуется с теоретическими результатами [1]. При сканировании частоты ОПГ вблизи точки деления на 3 возникает провал интенсивности и уширение собственной моды резонатора ОПГ при $N = 10$. Хопф-нестабильности наблюдались при мощности накачки, превышающей пороговую мощность в 20 раз. Для трехрезонаторного ОПГ данный эффект наблюдался уже при $N = 4$. Диапазон самосинхронизации фазы в двухрезонаторном и трехрезонаторном ОПГ линейно зависит от мощности накачки. Внутрирезонаторные биения между удвоенной холостой и сигнальной частотами наблюдались на выходе двухрезонаторного ОПГ при настройке генератора вблизи точки деления на 3. На выходе ОПГССФ также наблюдались и комбинационные частоты: удвоенная сигнальная ($2\omega + 2\omega = 4\omega$) и суммарная для частоты накачки и сигнальной частоты ($3\omega + 2\omega = 5\omega$).

Провал интенсивности на сигнальной и холостой частотах значительно облегчает диагностику эффекта фазового самозахвата, а уширение собственной моды резонатора ОПГ приводит к выгодному увеличению полосы пропускания системы фазовой привязки.

Исследование квантовых аспектов прецизионных делителей частот показало, что ОПГССФ может быть использован в квантово-информационных технологиях и в качестве яркого источника запутанных состояний света.

ОПГССФ, в которых применяется принцип конкуренции двух нелинейностей $\chi^{(1)} : \chi^{(2)}$, в комбинации с фемтосекундным лазером [6, 7] могут быть использованы для абсолютного измерения оптических частот в широком диапазоне спектра (от УФ- до среднего ИК-диапазона).

Замена Nd-лазера накачки стандартом частоты Nd:YAG/I₂ позволит применять данную систему в качестве автономного мультиоктавного синтезатора оптических частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zondy J.-J., Douillet A., Tallet A. et al.** Theory of self-phase-locked optical parametric oscillators // Phys. Rev. A. 2001. **63**. P. 023814.
2. **Zondy J.-J.** Stability of the self-phase locked pump-enhanced singly resonant parametric oscillator // Phys. Rev. A. 2003. **67**. P. 035801.
3. **Laurat J., Longchambon L., Fabre C., Coudreau T.** Experimental investigation of amplitude and phase quantum correlations in a type II optical parametric oscillator above threshold: from nondegenerate to degenerate operation // Opt. Lett. 2005. **30**, Is. 10. P. 1177.
4. **Zondy J.-J., Kolker D., Wong F. N. C.** Dynamical signatures of self-phase-locking in a triply resonant optical parametric oscillator // Phys. Rev. Lett. 2004. **93**. P. 043902.

5. **Gorelik P. V., Wong F. N. C., Kolker D., Zondy J.-J.** Cascaded optical parametric oscillation with a dual-grating periodically poled lithium niobate crystal // Opt. Lett. 2006. **31**, Is. 13. P. 2039.
6. **Bagayev S. N., Chepurov S. V., Klementyev V. M. et al.** Application of femtosecond lasers for the frequency synthesis in radio-optical ranges and for the creation of an optical clock // Laser Phys. 2001. **11**, N 10. P. 1094.
7. **Rovera G. D., Bruschi A., Kolker D. et al.** Chaîne de mesure pour fréquences optiques de très grande stabilité // Bull. BNM. 2004. **2003-2**. P. 76.

Поступила в редакцию 9 января 2008 г.
