

Каскадный режим генерации частот в оптическом параметрическом генераторе

Д.Б.Колкер, А.К.Дмитриев, П.Горелик, Ф.Вонг, Ж.Ж.Зонди

В параметрическом генераторе специальной двухсекционной конфигурации на основе периодической структуры из ниобата лития наблюдался каскадный режим генерации частот, при котором сигнальная волна является источником накачки вторичного параметрического генератора и порождает вторичные сигнальную и холостую волны. Реализован широкий диапазон перестройки вторичного параметрического генератора (~ 200 нм) относительно фиксированной частоты первичной холостой волны.

Ключевые слова: параметрический генератор, каскадный режим, стандарт частоты.

1. Введение

В настоящее время большой интерес представляет создание универсальных прецизионных источников оптического излучения в ИК диапазоне. Оптические параметрические генераторы света (ПГС) используются в качестве источников излучения для оптических спектрометров, а также для создания новых стандартов частоты. ПГС с самосинхронизацией фазы может применяться в квантово-информационных задачах для кодирования информации в координатах интенсивность – фаза [1]. Стабилизированный по резонансам насыщенного поглощения метана на колебательно-вращательных переходах с малыми вращательными числами ПГС с самосинхронизацией фазы может быть использован в качестве репера для фемтосекундного оптического синтезатора.

Каскадный двухсекционный ПГС является перспективным источником когерентного оптического излучения на пяти заданных частотах, которые могут быть определены выбором периодов соответствующих секций в периодически поляризованной структуре из ниобата лития. Пятичастотный режим генерации был продемонстрирован в двухрезонаторном параметрическом генераторе, который первоначально был предназначен для деления частоты на три [1–4]. В настоящей работе экспериментально реализован каскадный параметрический генератор, в котором генерируются первичные сигнальная и холостая, а также вторичные сигнальная и холостая волны. Теоретически показано и экспериментально под-

тверждено, что в режиме деления частоты на три пятичастотный режим также вырожден.

2. Каскадный ПГС

Двухрезонаторный параметрический генератор накачивался излучением лазера Verdi (Coherent) мощностью 5 Вт, при этом пороговая мощность $P_{th} = 25 - 35$ мВт (рис.1). В качестве нелинейного элемента использовалась двухсекционная периодическая структура из ниобата лития размером $10 \times 0.5 \times 20$ мм. Первая секция длиной 13 мм с периодом структуры $L_{OPG} = 7.2$ мкм применялась для параметрической генерации, а вторая, с переменным периодом структуры ($L_{SHG} = 19.45 - 19.75$ мкм), – для удвоения сигнальной частоты. Кристалл был термостабилизирован при температуре $T = 205$ °С. Для наблюдения кластеров* в области $\lambda_s \sim 800$ нм (сигнальная волна) и $\lambda_i \sim 1600$ нм (холостая волна) несимметричный резонатор ПГС (межмодовый интервал 1500 МГц) сканировался при приложении пилообразного напряжения к пьезокерамике, на которой расположено одно из зеркал резонатора.

На рис.2 представлены кластерные структуры для волн накачки, а также сигнальной и холостой волн при мощности накачки, не превышающей порога генерации вторичного ПГС. На пьезокерамику с расположенным на ней одним из зеркал резонатора ПГС подавалось пилообразное напряжение от генератора, при этом поведение кластеров оставалось традиционным [1, 2]. При достижении пороговой мощности накачки e_{p1} наблюдалось истощение накачки, при котором энергия из волны накачки перекачивалась в сигнальную и холостую волны.

При увеличении мощности накачки мощность излучения на частоте сигнальной волны насыщалась, а на частоте холостой волны увеличивалась. При увеличении мощности накачки ПГС свыше 70 мВт (вторичный порог генерации) наблюдались стабильное насыщение мощности излучения на частоте сигнальной волны и дальней-

J.-J.Zondy. Institute National de Metrology, Conservatoire National des Arts et Metiers, 61 rue du Landy, 93210, La Plaine St. Denis, France

Д.Б.Колкер, А.К.Дмитриев. Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092 Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20; Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13/3; e-mail: dkolker@mail.ru, dak@ftf.nstu.ru

P.Gorelik, F.Wong. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

Поступила в редакцию 3 апреля 2008 г., после доработки – 9 сентября 2008 г.

*Под кластером понимается совокупность мод параметрического генератора, объединенная в группы и возникающая при сканировании резонатора ПГС [1].

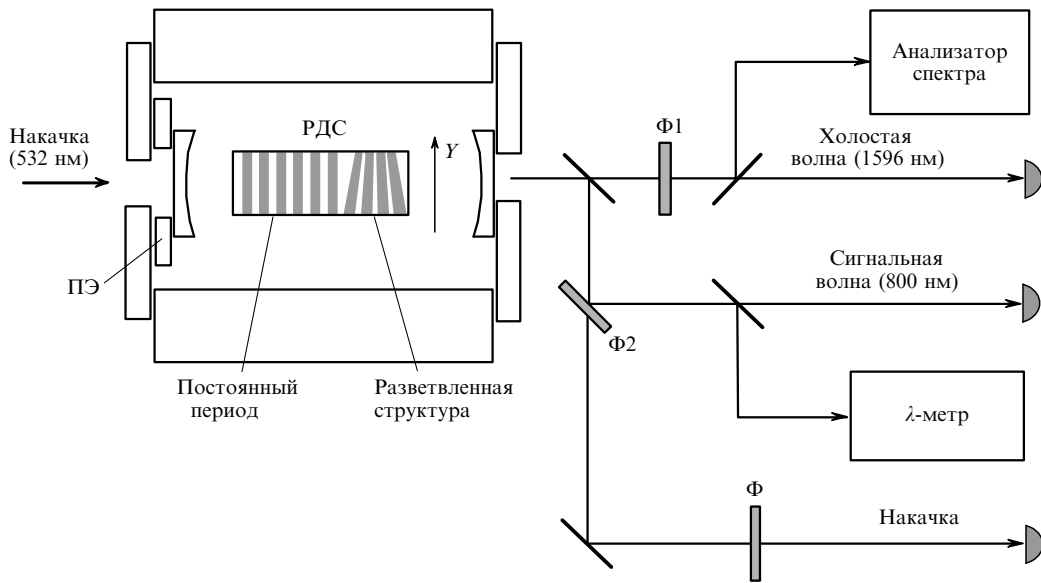


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

Ф1 – фильтр, пропускающий холодную волну; Ф2 – фильтр, пропускающий излучение накачки и отражающий сигнальную волну; РДС – периодическая доменная структура из ниобата лития; ПЭ – пьезоэлемент; Ф – фильтр, пропускающий излучение накачки.

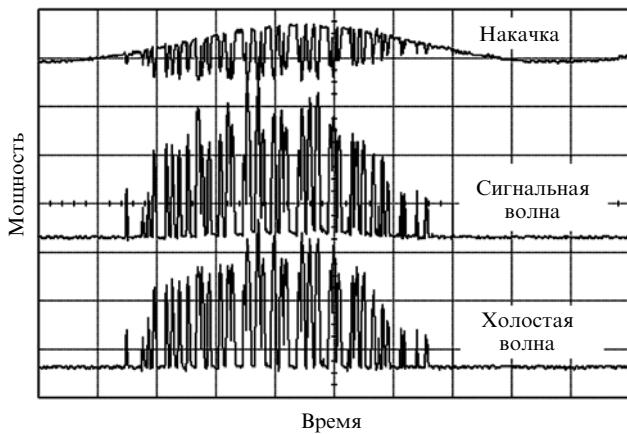


Рис.2. Форма кластеров при сканировании резонатора для традиционного ПГС.

шее увеличение сигнала на частоте холодной волны (рис.3). В данном случае сигнальная волна фактически является источником накачки вторичного ПГС, которым служит вторая секция нелинейного кристалла из ниобата лития, и порождает вторичные сигнальную и холодную

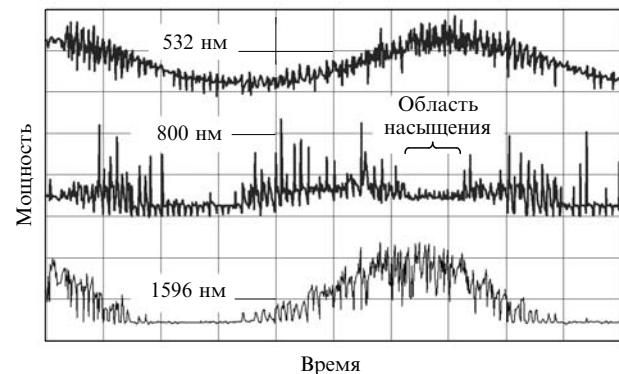


Рис.3. Стабильное насыщение мощности сигнальной волны при увеличении мощности накачки (321 мВт) и использовании двухсекционной РДС.

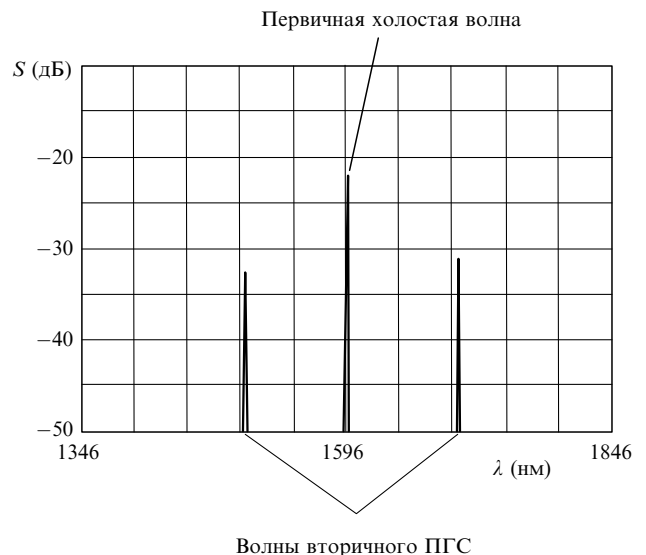


Рис.4. Спектральная мощность S каскадного ПГС в области 1596 нм.

волны. В этой ситуации реализуется пятичастотный режим генерации в ПГС на частотах накачки, а также первичных и вторичных сигнальных и холодных волн. На рис.4 приведен спектр генерации ПГС в области 1596 нм, полученный с помощью оптического анализатора спектра.

На рис.5 представлен диапазон перестройки вторичного ПГС относительно фиксированной частоты первичного ПГС. Перестройка вторичного ПГС в этом случае осуществлялась путем перемещения кристалла ниобата лития вдоль оси Y (см. рис.1). При этом частота первичной сигнальной волны не менялась, т.к. период структуры в первой секции ПГС оставался неизменным, а во второй варьировался в области 200 нм за счет изменения положения кристалла вдоль оси Y .

При изменении мощности накачки ПГС в диапазоне 60–300 мВт выходная мощность вторичного ПГС в области 1596 нм изменяется от 0.5 до 15 мВт, при этом выходная мощность на частоте первичной сигнальной

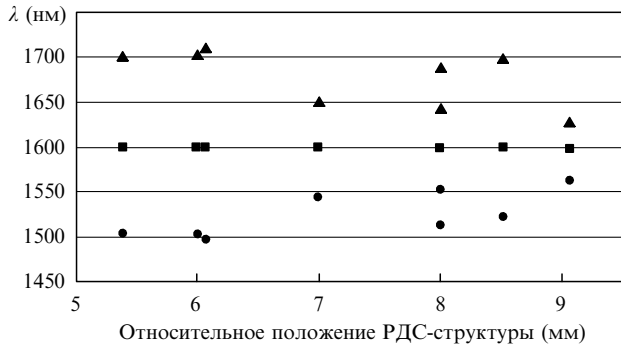


Рис. 5. Диапазон перестройки вторичного ПГС при изменении положения РДС-структуры вдоль оси Y для вторичной холостой (▲), первичной холостой (■) и вторичной сигнальной (●) волн.

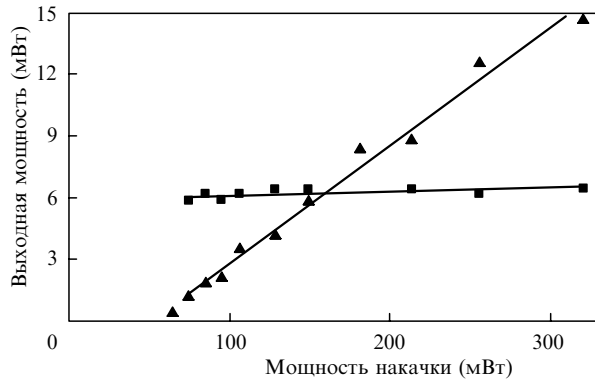


Рис. 6. Зависимости выходной мощности каскадного ПГС на частотах первичной (■) и вторичной (▲) сигнальной волн от мощности накачки на длине волны 532 нм.

волны варьируется в диапазоне 5.8–6.2 мВт и насыщается при мощности накачки ПГС, соответствующей порогу генерации вторичного ПГС (рис. 6).

3. Теоретическая модель каскадного ПГС

Для невырожденного ПГС в случае точного совпадения частот его резонатора с частотами холостой и сигнальной волн при заданной температуре T представим производные комплексных амплитуд полей по времени в следующем виде:

$$\dot{A}_p = -\kappa_p A_p - \chi_1 A_s A_i + \sqrt{2\kappa_p} e_p, \quad (1)$$

$$\dot{A}_s = -\kappa_s A_s - \chi_1 A_p A_i^* - \chi_2 A_+ A_-, \quad (2)$$

$$\dot{A}_i = -\kappa_i A_i - \chi_1 A_p A_s^*, \quad (3)$$

$$\dot{A}_+ = -\kappa_+ A_+ - \chi_2 A_s A_+^*, \quad (4)$$

$$\dot{A}_- = -\kappa_- A_- - \chi_2 A_s A_-^*. \quad (5)$$

В этих уравнениях $A_{p,s,i}$ – комплексные амплитуды полей на частотах накачки, а также сигнальной и холостой волн; $\kappa_{p,s,i}$ – потери за один обход резонатора на частотах накачки, сигнальной и холостой волн первичного ПГС; κ_+ и κ_- – аналогичные потери на частотах сигнальной и холостой волн вторичного ПГС; χ_1 и χ_2 – нелинейности второго порядка для первой и второй секций в нелинейном элементе ниобата лития; e_p – входная мощность накачки (в фот./с).

Представим комплексную амплитуду в виде $A_j = r_j \times \exp(i\phi_j)$, где $j = p, s, i$. При условии $A_j = 0$ получим стационарные решения системы (1)–(5) для двух режимов: над порогом для первичного ПГС, но ниже порога для вторичного ПГС и над порогом как для первичного, так и для вторичного ПГС. Предположим, что $\chi_2 = 0$ и запишем стационарные решения только для первичного ПГС в случае нулевой расстройки резонатора. Очевидно, что внутрирезонаторное поле накачки насыщается. Тогда

$$\phi_p = \phi_s + \phi_i, \quad r_p^2 = \kappa_s \kappa_i / \chi_1^2, \quad (6)$$

$$2\kappa_s r_s^2 = 2\kappa_i r_i^2 = 4e_{p1}^2 (e_p / \tilde{e}_p - 1), \quad (7)$$

$$e_{p1}^2 = \kappa_p \kappa_s \kappa_i / (2\chi_1^2). \quad (8)$$

В этих уравнениях $r_{p,s,i}$ – внутрирезонаторные поля накачки, сигнальной и холостой волн; $\phi_{p,s,i}$ – фазы соответствующих волн; e_{p1} и \tilde{e}_p – пороговые мощности накачки первичного и вторичного ПГС.

Отметим, что эффективность преобразования в выражении (7) пропорциональна корню квадратному из мощности накачки e_p . При высоких мощностях накачки поле сигнальной волны достигает значения, достаточного для «включения» вторичного ПГС при отличных от нуля амплитудах A_+ и A_- . Запишем стационарные решения для полной системы уравнений:

$$\phi_p = \phi_s + \phi_i, \quad \phi_s = \phi_+ + \phi_-, \quad (9)$$

$$2\kappa_s r_s^2 = 2\kappa_s \kappa_+ \kappa_- / \chi_2^2 \equiv 4e_{p2}^2, \quad (10)$$

$$2\kappa_+ r_+^2 = 2\kappa_- r_-^2 = 4e_{p2}^2 (e_p^2 / \tilde{e}_p^2 - 1), \quad (11)$$

$$2\kappa_p r_p^2 = 4e_{p1}^2 e_p^2 / \tilde{e}_p^2, \quad 2\kappa_i r_i^2 = 4e_{p2}^2 e_p^2 / \tilde{e}_p^2, \quad (12)$$

$$\tilde{e}_p^2 = e_{p2}^2 (1 + e_{p2}^2 / e_{p1}^2)^2, \quad (13)$$

где ϕ_+ и ϕ_- – фазы сигнальной и холостой волн вторичного ПГС; r_+ и r_- – внутрирезонаторные поля этих волн; e_{p2} – мощность накачки первичного ПГС на выходе из РДС.

В случае, если излучение накачки не в резонансе с резонатором ПГС, и при условии, что κ_p значительно больше, чем другие потери в резонаторе ($e_{p1} \gg e_{p2}$), пороговая мощность вторичного ПГС \tilde{e}_p будет немного превышать пороговую мощность первичного ПГС e_{p1} . В присутствии вторичного ПГС поле внешней накачки r_p не насыщается. При этом, как показывает выражение (10), внутрирезонаторное поле первичной сигнальной волны r_s насыщается и в каскадном ПГС происходит оптическое ограничение амплитуды A_s . Стоит отметить, что в вырожденном случае ($A_+ = A_- = A_i$) наблюдается самосинхронизация фаз [5], и статическое поведение системы существенно отличается от динамического. При этом не происходит насыщения ни накачки, ни сигнальной волны, а выходная мощность на частотах сигнальной и холостой волн ниже, чем в случае традиционного односекционного ПГС.

Действительно, каскадный ПГС является более эффективным, чем традиционный ПГС, источником когерентного излучения при преобразовании мощности накачки в мощности вторичных сигнальной и холостой волн, линейно зависящие от мощности накачки.

4. Заключение

Каскадный режим параметрической генерации открывает возможности для создания непрерывных пятичастотных оптических ПГС с заданными комбинациями частот, которые определяются периодами L_{OPO} и L_{SHG} соответствующей секции периодически поляризованной структуры из ниобата лития или КТР. Специальная разветвленная конфигурация структуры нелинейного элемента позволяет перестраивать вторичный ПГС в широком (достигающем нескольких сотен нанометров) диапазоне независимо от первичного ПГС. При этом частоты первичного ПГС не меняются, поскольку период структуры в первой секции ПГС не зависит от поперечной координаты.

В перестраиваемом каскадном ПГС имеется возможность контролировать фазовый синхронизм для вторичного ПГС независимо от первичного. Выходная мощность вторичного ПГС линейно зависит от мощности накачки ПГС. Нами достигнута перестройка по длине волны в широком диапазоне (~ 200 нм). Самосинхронизация фаз сигнальной и холостой волн в двухрезонатор-

ном ПГС наблюдалась, когда частоты накачки, сигнальной и холостой волн находились в соотношении 3 : 2 : 1 [3–6]. При этом пятичастотный режим генерации также был вырожден.

Созданная система может быть использована в качестве источника когерентного оптического излучения, перестраиваемого во всем диапазоне прозрачности ниобата лития, для спектроскопических, метрологических, а также специальных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ DoD MURI (грант № N00014-02-1-0717) и MIT-France Seed Fund.

1. Zondy J.-J. et al. *Phys. Rev. A*, **63**, 023814 (2001).
2. Zondy J.-J. *Phys. Rev. A*, **67**, 03581 (2003).
3. Zondy J.-J., Kolker D., Wong F.N.C. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 043902 (2004).
4. Kolker D., Dmitriyev A., Gorelik P.V., Wong F.N.C., Zondy J.-J. *Laser Phys.*, **18** (6), 794 (2008).
5. Gorelik P.V., Wong F.N.C., Kolker D., Dmitriyev A., Zondy J.-J. *Proc. ICONO 2007* (Minsk, Belarus, 2007).
6. Zondy J.-J., Kolker D., Wong F.N.C. *Proc. MPLP 2004* (Novosibirsk, Russia, 2004).