

Параметрическая генерация в кристалле PPLN при накачке излучением Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности и синхронизацией мод: сравнение суперлюминесцентного и однорезонаторного режимов

В.И.Донин, Д.В.Яковин, А.В.Грибанов, М.Д.Яковин

Проведено сравнение выходных характеристик излучения в двух режимах параметрической генерации света: параметрической суперлюминесценции и параметрической генерации синхронно накачиваемым однорезонаторным параметрическим генератором света (ПГС) на кристалле PPLN (длиной 50 мм) с накачкой излучением Nd:YAG-лазера с длительностью импульса 50 пс. Суммарная средняя выходная мощность на длинах волн сигнальной ($\lambda = 1475$ нм) и холостой ($\lambda = 3820$ нм) волн в режиме суперлюминесценции составила ~ 120 мВт (пиковая мощность ~ 120 кВт). Максимальная суммарная эффективность преобразования по поглощенной мощности в режиме суперлюминесценции была равна $\sim 60\%$. Максимальная эффективность преобразования в холостую волну по поглощенной мощности накачки составила 15% и 25% (квантовая эффективность 54% и 90%) соответственно для режимов суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС. Максимальные значения средней выходной мощности на длине холостой волны равнялись ~ 30 и ~ 60 мВт при коэффициенте истощения накачки 47% и 55% для режимов суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС соответственно.

Ключевые слова: параметрический генератор света, средний ИК диапазон, синхронная накачка, параметрическая суперлюминесценция.

1. Введение

В кристаллах ниобата лития с периодически поляризованной структурой (PPLN), накачиваемых излучением пикосекундных лазеров с высокой пиковой мощностью, возможно получение эффективной параметрической генерации как с использованием резонатора (см., напр., [1,2]), так и без него – в режиме суперлюминесценции [3–6]. Ранее в работе [6] нами была продемонстрирована эффективная суперлюминесцентная параметрическая генерация с наиболее высоким (из приведенных в известных публикациях) КПД преобразования (свыше 80% по поглощенной мощности накачки) при накачке излучением Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности и синхронизацией мод (QML). Вопросы возможного улучшения выходных характеристик за счет использования резонатора в [6] не рассматривались, а публикации, посвященные исследованию влияния резонатора на характеристики параметрической генерации с большим усилением в кристалле PPLN при пикосекундной накачке, крайне редки и их результаты не совсем понятны. Так, в работе [4] сравнивались характеристики параметрической генерации в безрезонаторном и резонаторном режимах при накачке излучением дискового Yb:YAG-лазера с пассивной синхронизацией мод, а в работе [7] – при накачке излучением Nd:YLF-лазера с модуляцией добротности. В [4, 7] наблюдалось увеличение мощности холостой волны на $\sim 10\%$ в резонаторном режиме по сравнению с безрезо-

наторным режимом при интенсивности излучения накачки ~ 0.2 ГВт/см². В [2] интенсивность накачки была равна ~ 2 ГВт/см² и указанная мощность увеличилась в ~ 3 раза, однако длина рабочего кристалла при этом была в 2.5 раза меньше, чем в [6]. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты и проведено сравнение выходных характеристик параметрической генерации в режимах суперлюминесценции и однорезонаторной генерации при накачке кристалла PPLN (длиной 50 мм) излучением Nd:YAG-лазера с QML с длительностью импульсов 50 пс.

2. Режим суперлюминесцентной параметрической генерации света

Используемая схема безрезонаторного параметрического генератора света (ПГС) приведена на рис. 1 и аналогична схеме из работы [6].

Лазером накачки служил Nd:YAG-лазер с QML, описанный в [8,9]. Его линейно поляризованное излучение представляло собой следующие с частотой 2 кГц дуги импульсов длительностью ~ 150 нс, длительность отдель-

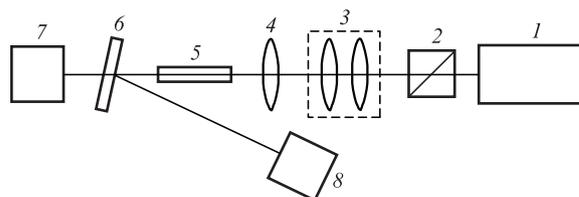


Рис.1. Схема эксперимента для режима суперлюминесценции: 1 – Nd:YAG-лазер с QML; 2 – поляризационный регулятор мощности; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – фильтрующий элемент; 7, 8 – измерители мощности.

В.И.Донин, Д.В.Яковин, А.В.Грибанов, М.Д.Яковин. Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: donin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 27 июня 2018 г., после доработки – 27 июля 2018 г.

ных импульсов в цуге была равна ~50 пс при частоте их следования 100 МГц. Максимальные средняя и пиковая мощности составляли ~400 мВт и ~0.15 МВт соответственно. Излучение лазера фокусировалось в нелинейный кристалл PPLN линзой 4 с фокусным расстоянием 280 мм. Диаметр перетяжки пучка излучения накачки в кристалле равнялся 160 мкм. Регулировка мощности накачки проводилась поляризационным регулятором 2. Объектив 3 применялся для уменьшения расходимости излучения лазера накачки в 3.5 раза. Общая расходимость излучения после объектива составила ~0.57 мрад. В качестве фильтрующего элемента 6 использовалось зеркало с большим коэффициентом отражения на $\lambda = 1064$ нм или пластинка из германия соответственно при измерении суммарной мощности или мощности холостой волны. Мощность холостой волны и суммарная мощность измерялись измерителем мощности 7 (OPHIR), а измеритель мощности 8 (Gentec) применялся для измерения мощности прошедшего через кристалл излучения накачки. Кристалл PPLN, допированный MgO (5 мол.%), имел размер $5 \times 1 \times 50$ мм и период регулярной доменной структуры $\Lambda = 29.5$ мкм. На торцы кристалла были нанесены антиотражающие покрытия с коэффициентами отражения $R < 1\%$ на $\lambda = 1.064$ мкм, $R < 2\%$ на $\lambda = 1.4-1.5$ мкм и $R < 1\%$ на $\lambda = 3.6-3.8$ мкм. Все измерения проводились при температуре кристалла 24 °С.

На рис.2 представлены зависимости выходной мощности сигнальной ($\lambda = 1475$ нм) и холостой ($\lambda = 3820$ нм) волн от мощности излучения накачки, полученные в режиме суперлюминесценции.

Максимальная средняя выходная мощность холостой и сигнальной волн достигала ~30 и ~80 мВт при эффективности преобразования ~7.2% и ~21% соответственно. Пороговая мощность излучения накачки составляла 100 мВт.

Была также измерена мощность излучения накачки на выходе из кристалла PPLN P_{out} в зависимости от ее величины на входе в кристалл P_{in} , и по этой зависимости рассчитан коэффициент истощения накачки (рис.3):

$$\eta = 1 - \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{1}$$

Максимум коэффициента η достигал $47\% \pm 3\%$. Следовательно, эффективность преобразования по поглощенной мощности излучения накачки составляла ~60% и ~15% соответственно для суммарной и холостой волн.

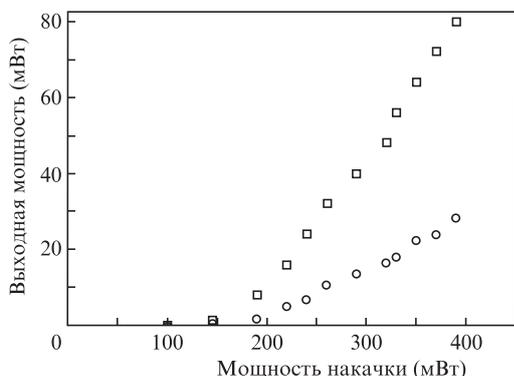


Рис.2. Зависимости выходной мощности сигнальной (■) и холостой (○) волн от мощности излучения накачки в режиме суперлюминесценции.

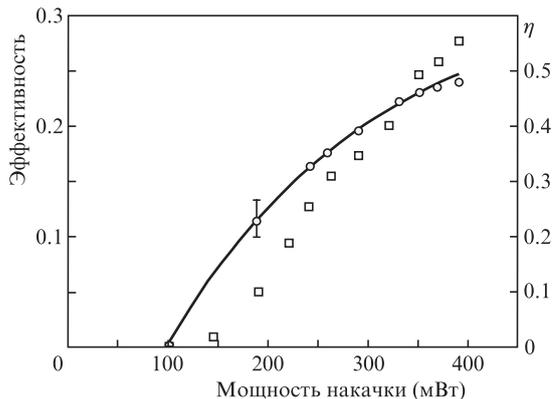


Рис.3. Суммарная эффективность преобразования (■) и коэффициент истощения накачки (○) в зависимости от мощности излучения накачки в режиме суперлюминесценции. Сплошная кривая – аппроксимация.

Для измерения коэффициента истощения накачки за двойной проход через нелинейный кристалл использовалась схема, представленная на рис.4. Медное сферическое зеркало 6 устанавливалось на таком расстоянии H от перетяжки пучка накачки в кристалле PPLN, чтобы его радиус кривизны ($r = 125$ мм) почти совпадал с радиусом кривизной волнового фронта, т.е. $H \approx r$. Сапфировая пластинка 9 использовалась для отражения на измеритель мощности части излучения накачки после его двойного прохода через нелинейный кристалл. Коэффициент истощения рассчитывался по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_{out}}{R[(1 - R)P_{in}]}, \tag{2}$$

где R – коэффициент отражения от двух граней пластинки; P_{out} – мощность излучения накачки, попадающего на измеритель мощности; P_{in} – мощность излучения накачки перед сапфировой пластинкой. При $P_{in} = 360$ мВт коэффициент η за два прохода составил 50% в отличие от $\eta = 45\%$ за один проход.

В режиме суперлюминесценции расходимость излучения определяется геометрией излучающей области, т.е. практически расходимостью падающей на кристалл волны накачки [6]. Измеренная в горизонтальной плоскости расходимость суперлюминесценции в дальней зоне (на расстоянии 2 м от кристалла PPLN) на $\lambda = 619$ нм (сум-

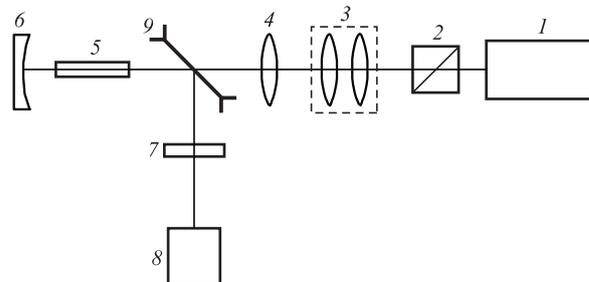


Рис.4. Схема измерения коэффициента истощения накачки за два прохода: 1 – Nd:YAG-лазер с QML; 2 – регулятор мощности излучения накачки; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – медное сферическое зеркало; 7 – узкополосный фильтр на $\lambda = 1064$ нм; 8 – измеритель мощности; 9 – сапфировая пластинка.

ма сигнальной волны и волны накачки) составила 33 ± 5 мрад. Измерения проводились по схеме, приведенной на рис.1: излучение, отраженное от фильтра 6, через светофильтр КС-15 попадало на фотоприемник 8 (фотодиод ФД-2 с диаметром чувствительной области 1.3 мм), который крепился на координатном столике и передвигался в горизонтальном направлении перпендикулярно оси лазерного пучка. Такая же величина расходимости была получена для сигнальной и холостой волн. Эти данные в пределах ошибки измерений совпали с данными работы [6]. Пороговая мощность излучения накачки 100 мВт соответствует плотности мощности в перетяжке ~200 МВт/см². Значение этой плотности мощности, рассчитанное по формуле [10]

$$I_{th} = 5 \frac{\epsilon_0 c \lambda_s \lambda_i}{FL^2}, \tag{3}$$

составило 160 МВт/см², что неплохо согласуется с данными измерений. В формуле (3) $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ Ф/см – электрическая проницаемость вакуума; $\lambda_s = 1475$ нм и $\lambda_i = 3820$ нм – длины сигнальной и холостой волн соответственно; $F = d_{eff}^2/n^3 = 19.75$ пм²/В² – нелинейно-оптический показатель качества кристалла; d_{eff} – эффективный коэффициент нелинейности; n – показатель преломления нелинейного кристалла; $L = 5$ см – длина нелинейного кристалла.

Найденная суммарная эффективность преобразования по поглощенной мощности (~60%) меньше полученной нами в работе [6]. Данный факт связан, по-видимому, с более низким качеством кристалла, использовавшегося в настоящей работе (на что указывает и более высокий порог генерации).

3. Режим однорезонаторного ПГС

Схема однорезонаторного ПГС с синхронной накачкой представлена на рис.5 и аналогична схеме, использованной в работе [2]. Различие заключалось в том, что длина кристалла PPLN в настоящей работе была равна 50 мм (в [2] – 20 мм), а фокусное расстояние фокусирующей линзы составляло 280 мм (в [2] – 250 мм). Накачка проводилась описанным выше Nd:YAG-лазером с QML при частоте следования цуга импульсов 2 кГц. Резонатор ПГС был образован зеркалами 7–9. Зеркало 7 имело радиус кривизны 100 мм, коэффициент отражения $R_{1.4-1.7} = 99.5\%$ на $\lambda = 1.4-1.7$ мкм и коэффициент пропускания

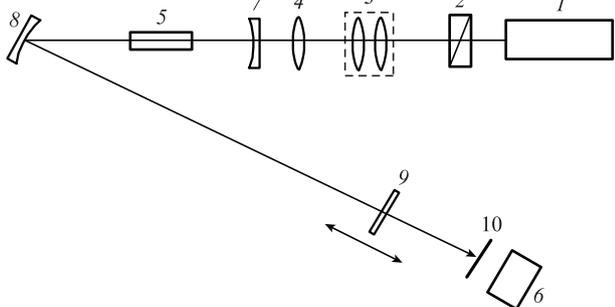


Рис.5. Схема однорезонаторного ПГС: 1 – Nd:YAG-лазер с QML; 2 – регулятор мощности; 3 – объектив; 4 – фокусирующая линза; 5 – нелинейный кристалл PPLN; 6 – измеритель мощности (OPHIR); 7–9 – зеркала резонатора ПГС; 10 – германиевая пластинка.

около 99% на $\lambda = 1.064$ мкм. Радиус кривизны медного зеркала 8 был равен 125 мм, коэффициенты его отражения $R_{1.0-1.7} = 90\%$ и $R_{3.0-4.0} = 97\%$. Плоское выходное зеркало 9 на подложке из ZnSe ($R_{1.2-1.7} = 99.5\%$) имело коэффициенты пропускания 78% на $\lambda = 1.06$ мкм и 99.5% на $\lambda = 3.0-4.0$ мкм. Это зеркало можно было перемещать вдоль оси резонатора с помощью юстировочного устройства.

Порог генерации ПГС составил 60 мВт, что соответствует $I_{th} = 120$ МВт/см². Это значение сильно отличается от рассчитанного по формуле из [11, 12]:

$$I_{th} = \frac{l}{L^2} \frac{n^3 \epsilon_0 c \lambda_s \lambda_i}{8\pi^2 d_{eff}^2 g_s g_t h_{sm}} \approx 13 \text{ МВт/см}^2, \tag{4}$$

где $l = 0.3$ – общие потери в резонаторе за двойной проход для длины сигнальной волны; $g_s = 0.4$ – коэффициент пространственного согласования; $g_t = 0.6$ – коэффициент временного согласования; $h_{sm} = 0.1$ (функция h_{sm} определена в [11]). По-видимому, данное различие связано с тем, что мы определяли порог генерации визуально (через красный светофильтр) по моменту появления излучения с $\lambda = 619$ нм на зеркале резонатора, т.е. фактически наблюдался порог возникновения излучения с суммарной частотой $\omega_s + \omega_p$ (ω_s и ω_p – частоты сигнальной волны и излучения накачки соответственно).

При максимальной мощности накачки средняя выходная мощность холостой волны ($\lambda = 3820$ нм) составила ~60 мВт.

Проводились также измерения мощности излучения накачки, прошедшего через резонатор ПГС в отсутствие нелинейного кристалла. По результатам этих измерений была рассчитана зависимость коэффициента истощения накачки от мощности накачки по формуле

$$\eta_{res} = 1 - (1 + \alpha) \frac{P_{out}}{P_{in}}, \tag{5}$$

где $\alpha = 0.28$ – измеренные на $\lambda = 1064$ нм потери на поглощение в зеркалах резонатора; P_{in} – мощность излучения накачки, падающего на кристалл; P_{out} – измеренная мощность излучения накачки, прошедшего через резонатор с нелинейным кристаллом; $(1 + \alpha)P_{out}$ – рассчитанная мощность излучения накачки на выходе нелинейного кристалла в резонаторе. Зависимость (5) представлена на рис.6.

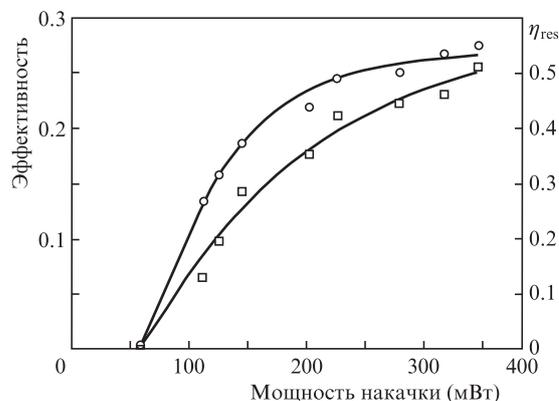


Рис.6. Зависимости эффективности преобразования в холостую волну по поглощенной мощности (□) и коэффициента истощения накачки в резонаторе ПГС (○) от мощности излучения накачки, падающего на кристалл. Сплошные кривые – аппроксимация.

Максимум коэффициента истощения составил ~55% при мощности накачки 360 мВт, что превышает его значения в режиме суперлюминесценции за один (45%) и за два (50%) прохода излучения накачки через кристалл PPLN.

Была также вычислена эффективность преобразования в холостую волну по поглощенной мощности накачки. Из рис.6 видно, что максимальная эффективность преобразования по поглощенной мощности была равна ~25%, что соответствует квантовой эффективности преобразования ~90%. Если учесть, что на длине холостой волны 3820 нм коэффициент поглощения в рабочем кристалле равен ~19% [6], то квантовая эффективность по поглощенной мощности достигает ~110%.

Расходимость излучения на длинах холостой и сигнальной волн измерялась в дальней зоне на расстоянии 5 м. Излучение ПГС выводилось из резонатора с помощью сапфировой пластинки, которая располагалась вблизи плоского выходного зеркала резонатора. В качестве светофильтра использовалась германиевая пластинка для фильтрации излучения на длине холостой волны, а для фильтрации излучения на длине сигнальной волны вместо германиевой пластинки использовались плоское зеркало (плотное для $\lambda = 1064$ нм) и светофильтр ИКС-5. Детектор излучения крепился на двухкоординатный столик, который мог перемещаться по горизонтали (вдоль оси x в плоскости резонатора) и по вертикали (вдоль оси y перпендикулярно плоскости резонатора) перпендикулярно направлению распространения излучения. Измерялось пространственное распределение интенсивности пучка по осям x , y и по полученным значениям вычислялась полная расходимость излучения. При измерениях на длине сигнальной волны детектором излучения служил германиевый фотодиод ФД-2, а при измерениях на длине холостой волны – пироприемник МГ-30 (площадь приемной площадки 1 мм²). Данные фотоприемников регистрировались цифровым осциллографом и представлены на рис.7.

Полная расходимость выходного излучения в дальней зоне по осям x и y на длине холостой волны составила $\Theta_x = 6$ мрад и $\Theta_y = 4$ мрад, а на длине сигнальной волны

– $\Theta_x = 3$ мрад и $\Theta_y = 2.6$ мрад. Различие расходимостей по осям x и y вызвано астигматизмом резонатора лазера накачки [13]. Погрешности измерения расходимостей равнялись $\pm 10\%$.

4. Анализ результатов

Полученные данные позволяют провести сравнительный анализ режимов параметрической суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС.

Из зависимостей на рис.2 и 6 видно, что наличие плотного резонатора на длине сигнальной волны по сравнению с режимом суперлюминесценции приводит к снижению порога генерации в ~1.7 раза (от 100 до 60 мВт) и к увеличению средней выходной мощности на длине холостой волны от ~30 до ~60 мВт. Это связано с накоплением энергии в резонаторе на длине сигнальной волны при синхронной накачке. Увеличение числа фотонов сигнальной волны приводит к уменьшению пороговой мощности накачки и увеличению мощности холостой волны, поскольку в резонаторе происходит генерация разностной частоты этих волн (сигнальной и волны накачки):

$$\hbar\omega_i = \hbar\omega_p - \hbar\omega_s, \tag{6}$$

$$k_p - k_s = k_i + 2\pi/\Lambda.$$

Более низкая эффективность преобразования в режиме суперлюминесценции по сравнению с результатами, полученными нами в [6], объясняется более низким качеством используемого кристалла. Из рис.2 было найдено, что усредненное по всему диапазону измерений отношение числа фотонов сигнальной волны к числу фотонов холостой волны составляет ~1.3, и это свидетельствует о наличии поглощения в кристалле (~20%) в области $\lambda = 3.8$ мкм, как это уже отмечалось в [6].

Порог генерации в режиме суперлюминесценции составляет ~200 МВт/см², что примерно совпадает с расчетным значением ~160 МВт/см² [10]. При синхронной накачке однорезонаторного ПГС измеренный порог (~120 МВт/см²) почти на порядок больше рассчитанного по формулам из [11, 12], что связано, по-видимому, с особенностями точного экспериментального определения порога генерации.

Коэффициент истощения накачки в режиме однорезонаторного ПГС составил ~55%, а в режиме суперлюминесценции – около 45% для одного прохода и 50% для двойного прохода. Отсюда следует, что нет смысла применять более длинные нелинейные кристаллы. Данный факт обусловлен насыщением коэффициента усиления уже за один проход при превышении порога генерации в 5 и более раз, что неплохо согласуется с результатами теоретического анализа [14]. Поскольку в исследуемых режимах суперлюминесценции и однорезонаторного ПГС имело место максимальное превышение мощности накачки над пороговой в 4 и 6.5 раза, то коэффициенты истощения накачки согласно [14] должны были бы составлять 65% и 70% соответственно. Различие в результатах связано с тем, что в теоретической модели [14] рассматривалось одномодовое излучение накачки, а в настоящей работе использовался лазер, работающий в многомодовом режиме, в котором эффективность преобразования ниже [15].

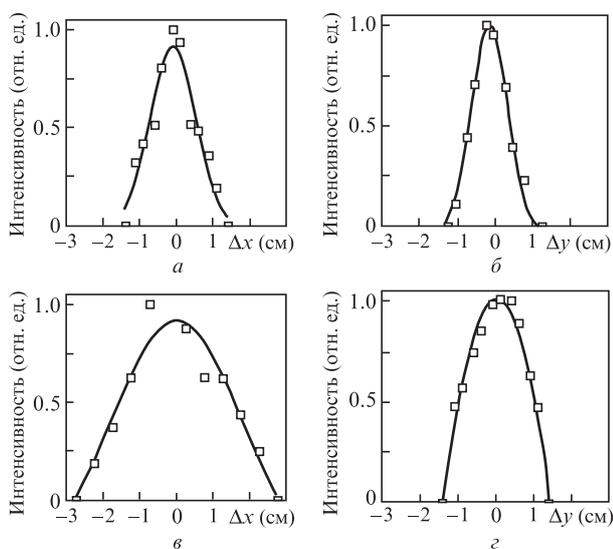


Рис.7. Пространственные распределения по осям x (а, в) и y (б, г) интенсивности излучения в дальней зоне на длине сигнальной волны 1475 нм (а, б) и на длине холостой волны 3820 нм (в, г).

5. Выводы

Таким образом, в настоящей работе исследованы безрезонаторный ПГС в режиме суперлюминесценции и однорезонаторный ПГС с синхронной накачкой излучением Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности и синхронизацией мод методом СЗАОМ (сферическое зеркало–акустооптический модулятор) [9, 16]. Показано, что наличие резонатора приводит к увеличению эффективности преобразования в холостую волну примерно в 2 раза и к уменьшению порога генерации не менее чем в 1.7 раза по сравнению с режимом суперлюминесценции.

В режиме суперлюминесценции в спектре выходного излучения присутствует мощная сигнальная волна, и общая эффективность преобразования по поглощенной мощности довольно высока (60%–80%). Эту эффективность можно существенно повысить за счет получения мощного перестраиваемого излучения в красной области спектра путем суммирования сигнальной волны и волны накачки. Для этого достаточно за исследуемым кристаллом PPLN поместить кристалл PPLN с периодом Λ , необходимым для генерации суммарной частоты. Как было отмечено выше, это излучение с перестраиваемой линией генерации будет иметь ту же расходимость, что и ИК параметрическая суперлюминесценция. Очевидным преимуществом суперлюминесцентного режима ПГС является

отсутствие резонатора, а значит, и необходимости его согласования с резонатором лазера накачки.

1. Graf T., McConnell G., Ferguson A.I., et al. *Appl. Opt.*, **38**, 3324 (1999).
2. Донин В.И., Яковин Д.В., Яковин М.Д. *Квантовая электроника*, **46**, 601 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 601 (2016)].
3. Zayhowski J.J. *Opt. Lett.*, **22**, 169 (1997).
4. Sudmeyer T., Aus der Au J., Paschotta R., et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**, 2433 (2001).
5. Kir'yanov A.V., Klimentov S.M., Powers P.E., et al. *Laser Phys. Lett.*, **5**, 281 (2008).
6. Donin V.I., Yakovin D.V., Yakovin M.D., Gribanov A.V. *Laser Phys. Lett.*, **15**, 035005 (2018).
7. Zhang X., Wang Y., Ju Y., et al. *Chin. Opt. Lett.*, **6**, 204 (2008).
8. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. *Квантовая электроника*, **45**, 1117 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 1117 (2015)].
9. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В., Яковин М.Д. *Оптический журн.*, **85** (4), 8 (2018).
10. Agnesi A., Piccinini E., Reali G.C., Solcia C. *Opt. Lett.*, **22**, 1415 (1997).
11. Guha S., Wu F.-J., Falk J. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **18**, 907 (1982).
12. Cheung E.C., Liu J.M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **7**, 1385 (1990).
13. Грибанов А.В., Донин В.И., Яковин Д.В. *Квантовая электроника*, **48**, 699 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 699 (2018)].
14. Bjorkholm J.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **7**, 109 (1971).
15. Marshall L.R., Kaz A., Aytur O. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 177 (1996).
16. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. *Квантовая электроника*, **42**, 107 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 107 (2012)].