

## СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

# Прецизионная модуляция лазерного излучения акустооптическим модулятором для стабилизации Nd:YAG-лазера по оптическим резонансам в молекулярном иоде

В.И.Денисов, С.М.Игнатович, Н.Л.Квашнин, М.Н.Скворцов, С.А.Фарносов

*Представлена система прецизионной частотной модуляции лазерного излучения акустооптическим модулятором, позволяющая одновременно стабилизировать мощность излучения и подавлять сопутствующую частотной паразитную амплитудную модуляцию до уровня  $10^{-8}$  от полной мощности излучения на третьей гармонике рабочей частоты модуляции, равной  $\sim 500$  Гц. Использование данной системы для оптического стандарта частоты Nd:YAG/I<sub>2</sub>, а также применение методов цифровой техники синтеза и обработки сигналов позволило достичь уровня нестабильности стандарта частоты  $\sim 10^{-15}$  за времена  $\sim 6 \times 10^4$  с.*

**Ключевые слова:** спектроскопия насыщенного поглощения, лазеры, оптические стандарты частоты, люминесценция, акустооптический модулятор, молекулярный иод.

## 1. Введение

В настоящее время Nd:YAG-лазеры (1064 нм) с удвоением частоты, стабилизированные по частоте по оптическим нелинейным резонансам в молекулярном иоде, являются компактными, наиболее широко используемыми на практике оптическими стандартами частоты. Существует множество методов регистрации резонансов насыщенного поглощения. Н.Г.Басовым и В.С.Летоховым [1] было предложено наблюдать резонансы в интенсивности люминесценции при насыщении поглощения в стоячей волне. Данный метод в определенных случаях обладает целым рядом преимуществ, позволяющих достигать высоких результатов в долговременной стабильности и воспроизводимости частоты лазеров [2, 3]. По нашим сведениям, лучший результат по достижению долговременной стабильности частоты  $4 \times 10^{-15}$  за время измерения  $10^4$  с получен в работе [4] при использовании четырехпроходной I<sub>2</sub>-ячейки, в которой обеспечивалось взаимодействие между пучками Nd:YAG-лазера и парами иода на длине 180 см.

При использовании метода люминесценции для регистрации нелинейного резонанса применяется техника стабилизации по нулю третьей гармоники в отклике на пробную частотную модуляцию лазерного излучения. При этом одним из наиболее больших сдвигов частоты, определяющих воспроизводимость и долговременную стабильность частоты оптического стандарта Nd:YAG/I<sub>2</sub>, является сдвиг, связанный с величиной и качеством пробного сигнала модуляции частоты лазера. Поэтому развитие методов цифровой техники обработки сигналов позволяет принципиально по-новому решать проблемы, связанные с прецизионной модуляцией частоты лазера и

синхронным детектированием сигнала, что может дать положительный результат и минимизировать данный сдвиг частоты.

## 2. Экспериментальная установка

Созданная установка содержала два идентичных оптических стандарта на базе одночастотных Nd:YAG-лазеров с внутррезонаторным удвоением частоты (модель ILP 1064/532–30/50–2A; разработана в Институте лазерной физики СО РАН). Подробное описание лазера приводится в работах [5, 6]. Для получения высокой кратковременной стабильности частоты Nd:YAG-лазера осуществлялась предварительная стабилизация по высокостабильному оптическому резонатору. Применялся метод стабилизации Паунда–Дривера–Холла с использованием пробной фазовой модуляции излучения электрооптическим фазовым модулятором (ЭОМ). Для получения высокой долговременной стабильности частоты осуществлялась стабилизация на второй гармонике излучения лазера (532 нм) по резонансам насыщенного поглощения в иодной поглощающей ячейке. Применялся метод стабилизации по нулю третьей гармоники пробной частотной модуляции. Для того чтобы излучение самого лазера не подвергалось частотной модуляции, использовался внешний акустооптический модулятор (АОМ).

С целью получения более высоких результатов для регистрации люминесценции молекулярного иода в поглощающей ячейке вместо ФЭУ (см. [2, 3]) использовались кремниевые фотодиоды, которые обладают более высоким квантовым выходом. На рис.1 сравниваются чувствительности кремниевого фотоприемника и мультищелочного фотокатода (S20). В настоящее время появились кремниевые фотодиоды с достаточно большой приемной площадкой ( $\sim 1$  см<sup>2</sup>), малым темновым током ( $\sim 200$  пА) и высокой обнаружительной способностью ( $\sim 1.5 \times 10^{-14}$  Вт·Гц<sup>-0.5</sup>), например фотоприемники FDS10×10 (Thorlabs). При работе с малыми сигналами необходимо, чтобы сопротивление нагрузки было большим ( $\sim 1$  МОм), т. е. следует использовать трансимпедансный усилитель с

В.И.Денисов, С.М.Игнатович, Н.Л.Квашнин, М.Н.Скворцов, С.А.Фарносов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: denisov@laser.nsc.ru, knl@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 19 января 2016 г.

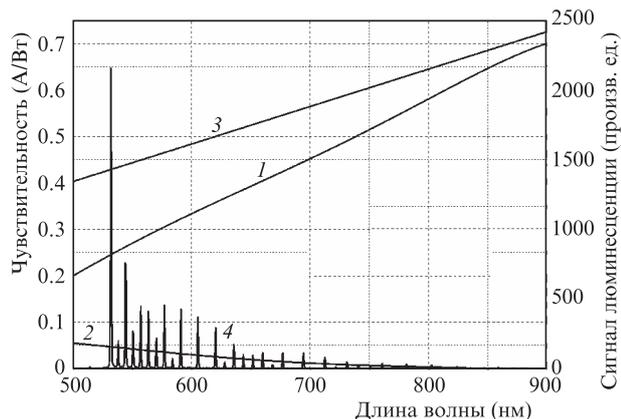


Рис.1. Зависимости от длины волны токовой чувствительности кремниевое фотоприемника (1) и мультищелочного фотокатода S20 (2), теоретический предел для токовой чувствительности при единичном квантовом выходе (3), а также сигнал люминесценции молекулярного иода при возбуждении линии поглощения R56(32-0) (4).

малым токовым шумом ( $\sim 2.5 \times 10^{-15}$  А·Гц<sup>-0.5</sup>), например на микросхеме ADA4817-1. Приемник, набранный из десятка подобных фотодиодов, превосходит по отношению сигнал/шум ранее используемый ФЭУ-125.

Блок-схема оптического стандарта частоты Nd:YAG/I<sub>2</sub> показана на рис.2. Каждый стандарт располагался на отдельной плите. Частота лазера автоматически подстраивалась на частоту нелинейного оптического резонанса в молекулярном иоде по нулю третьей гармоники в сигнале отклика на пробную модуляцию.

Для пробной модуляции вторая гармоника излучения Nd:YAG-лазера модулировалась по частоте с помощью АОМа AFM-402A20 (рабочая частота  $\sim 40$  МГц). Частота модуляции была выбрана равной  $\sim 500$  Гц (выбор достаточно низкой частоты модуляции обоснован в работе [3]).

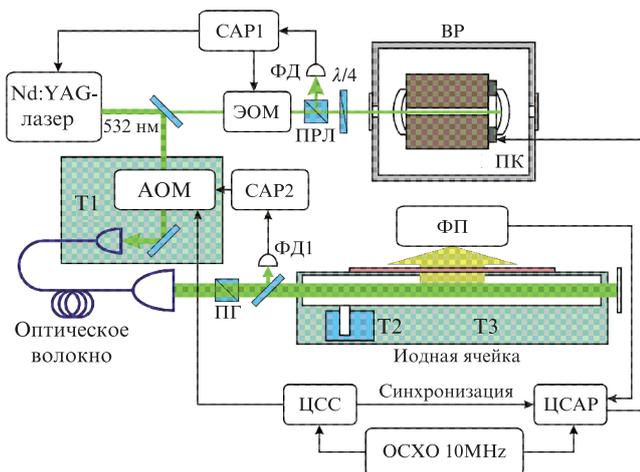


Рис.2. Блок-схема оптического стандарта частоты Nd:YAG/I<sub>2</sub>: САР1 – система автоматического регулирования Паунда–Дривера–Холла; ФД, ФД1 – фотодетекторы; ВР – вакуумированный резонатор; ПРЛ – поляризационный расщепитель луча; ПК – пьезокерамика; ПГ – поляририд Глана; ЭОМ – электрооптический модулятор; АОМ – акустооптический модулятор; САР2 – система автоматического регулирования, стабилизирующая мощность излучения; ФП – фотоприемник люминесценции; Т1 – термостабилизация оптической схемы с АОМом; Т2 – термостабилизация отрезка иодной ячейки; Т3 – термостабилизация самой иодной ячейки; ЦСС – цифровой синтезатор сигнала; ЦСАР – цифровая система автоматического регулирования; ОСХО 10MHz – кварцевый генератор.

Оптимальная девиация частоты при стабилизации по нулю третьей гармоники в сигнале отклика составляет  $\sim 1.64\Gamma$ , где  $\Gamma$  – полуширина на полувысоте оптического резонанса. Для стабилизации оптического стандарта частоты Nd:YAG/I<sub>2</sub> была выбрана компонента *a*1 перехода R56(32-0) с контрастом наблюдаемого нелинейного оптического резонанса  $k \approx 3 \times 10^{-2}$  и характерной полушириной резонанса  $\Gamma \approx 4 \times 10^5$  Гц. В нашем случае для оптических резонансов в молекулярном иоде оптимальная девиация для пробной модуляции составила  $\sim 0.66$  МГц.

Использование внешнего АОМа имеет ряд преимуществ: не модулируется частота выходного излучения лазера, а модулируется только часть излучения, которая заводится в иодную поглощающую ячейку. Кроме того, с помощью АОМа можно стабилизировать мощность оптического излучения, управляя мощностью высокочастотного сигнала, подаваемого на модулятор с помощью системы автоматического регулирования.

Для наблюдения оптического резонанса использовалось излучение после АОМа в первом порядке дифракции на бегущей звуковой волне, сдвинутое на частоту высокочастотного сигнала, подаваемого на модулятор. За счет различного сдвига частот в двух разных оптических стандартах можно получить сигнал на разностной частоте биений, удобной для проведения измерений дисперсии Аллана.

Для ввода излучения в иодную ячейку использовалось одномодовое оптическое волокно с сохранением поляризации, на выходе которого для дополнительного контроля поляризации использовался поляририд Глана (см. рис.2). Такая конструкция позволяет исключить перестройку лазерного излучения по углу в ячейке при изменении частоты звуковой волны. Часть излучения, прошедшего через оптическое волокно и поляририд Глана, поступала на фотоприемник ФД1, и полученный сигнал использовался для подавления амплитудных шумов лазерного излучения через активную систему стабилизации САР2, входящую в состав блока управления АОМа.

В описанной выше схеме при перестройке частоты модуляции происходит угловая перестройка поляризации излучения и при вводе его в оптическое волокно возникает паразитная амплитудная модуляция. И хотя существуют варианты двухпроходного прохождения излучения через АОМ, компенсирующие угловую перестройку излучения при изменении частоты модуляции [7], кроме указанной причины возникновения паразитной амплитудной модуляции, есть и другая, связанная с неидеальным режимом бегущей акустической волны в модуляторе. Характерные размеры поперечного сечения пучка лазерного излучения составляют 0.1–1 мм, длина звуковой волны равна скорости звука (4170 м/с), деленной на частоту звука ( $\sim 40$  МГц), что составляет  $\sim 0.1$  мм. В зависимости от того, укладывается ли целое число звуковых полуволн на длине рабочего тела АОМа, наблюдается резонанс звуковых колебаний, связанный с интерференцией прямой и обратной звуковой волны, что отражается на эффективности работы модулятора, и изменяется доля мощности излучения, дифрагирующего в первый порядок.

На рис.3 показаны изменения мощности лазерного излучения, наблюдаемые на фотоприемнике, в зависимости от перестройки рабочей частоты модулятора. Как следует из рисунка, при отклонении частоты от центральной рабочей частоты менее 400 кГц основным механизмом паразитной амплитудной модуляции становится вто-

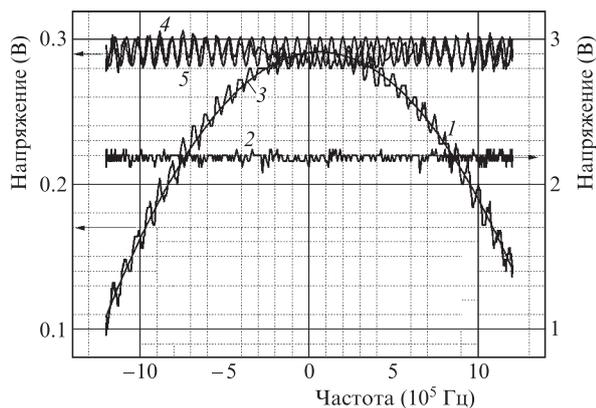


Рис.3. Частотные зависимости мощности излучения сигнала после прохождения АОМа и оптического волокна:

1 – изменение сигнала при перестройке частоты модулятора относительно центральной рабочей частоты; 2 – то же в отсутствие перестройки частоты; 3 – аппроксимация полиномом изменения сигнала из-за паразитной модуляции, обусловленной изменением угла ввода в оптическое волокно; 4 – искажение сигнала за вычетом модуляции из-за изменения угла ввода в оптическое волокно, обусловленное наличием частично стоячей звуковой волны; 5 – аппроксимация синусоидальной функцией искажения сигнала, обусловленного наличием частично стоячей звуковой волны.

рой, обусловленный изменением сигнала из-за частично стоячей звуковой волны. Двухпроходное прохождение излучения через АОМ компенсирует угловую перестройку, поэтому больший вклад вносит второй механизм. Однако двухпроходная схема приводит к большим потерям оптической мощности, по этой причине мы остановились на блок-схеме стандарта, показанной на рис.2.

Амплитудно-частотная и фазовая характеристики подавления шумов лазерного излучения и паразитной амплитудной модуляции, осуществляемого активной системой стабилизации мощности лазерного излучения, которая входит в состав блока управления АОМа, приведены на рис.4.

Рабочая полоса системы стабилизации мощности лазерного излучения принципиально ограничена быстродействием АОМа, управляющего амплитудой лазерного излучения. Быстродействие определяется временем прохождения звука от границы рабочего тела модулятора, где он возбуждается, до лазерного пучка и через сам пучок. Амплитудно-частотная и фазовая характеристики АОМа также показаны на рис.4. Использование модулятора позволило реализовать рабочую полосу системы стабилизации мощности лазерного излучения с единичным коэффициентом на частоте  $\sim 300$  кГц, при этом коэффициент подавления нарастал при изменении астатизма от первого порядка до третьего с уменьшением частоты. На частоте третьей гармоники от частоты пробной модуляции ( $\sim 1.5$  кГц) коэффициент подавления составлял  $\sim 10^5$ .

Мощность сигнала паразитной амплитудной модуляции, как это видно из рис.3, составляет менее 10% от всей мощности лазерного излучения. Сам сигнал имеет сложную форму, которая периодически повторяется с частотой модуляции. При разложении в ряд Фурье можно получить паразитные сигналы на частотах, кратных частоте модулирующего сигнала. Оценки показывают, что мощность паразитного сигнала на частоте третьей гармоники не превышает  $10^{-2}$  от всей мощности излучения при требуемой девиации частоты. Кроме того, подбором

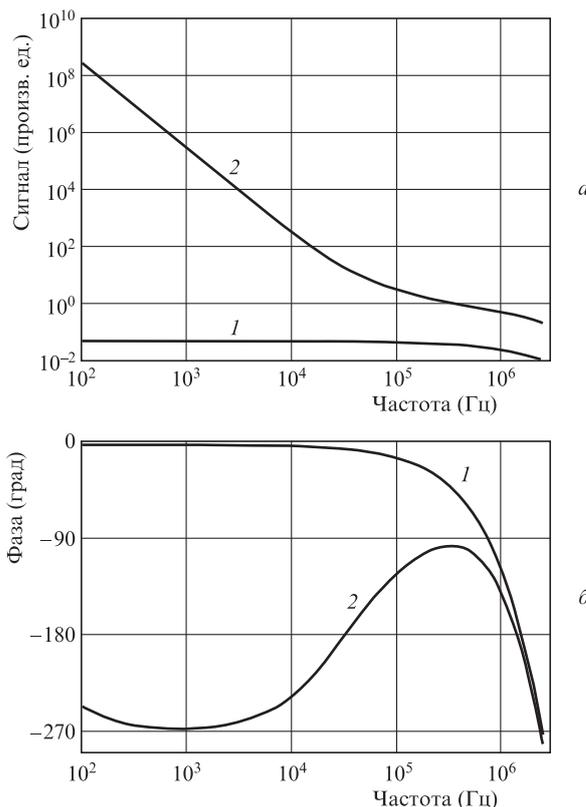


Рис.4. Амплитудно-частотная (а) и фазовая (б) характеристики АОМа (1) и системы стабилизации мощности лазерного излучения блока управления АОМа (2).

рабочей частоты АОМа и амплитуды девиации пробного сигнала, а также путем изменения траектории лазерного пучка при вводе его в волокно можно понизить уровень паразитного сигнала вплоть до нуля. Однако со временем из-за изменения температуры и других процессов происходит разбюстировка оптической схемы. Для стабилизации траектории лазерного пучка и параметров АОМа используется термостабилизация узлов АОМа и ввода излучения в волокно.

Принятые меры по термостабилизации узлов и подавление паразитной амплитудной модуляции лазерного излучения активной системой стабилизации мощности позволяют достичь уровня паразитной амплитудной модуляции  $\Delta P/P \approx 10^{-8}$  от всей мощности излучения. Крутизна частотного дискриминатора (при стабилизации по нулю сигнала третьей гармоники с оптимальной шириной пробной модуляции  $\sim 1.64\Gamma$ ) в единицах относительного изменения сигнала с фотоприемника при отстройке частоты относительно частоты оптического резонанса на 1 Гц  $K_d = 0.34k/\Gamma = 2.55 \times 10^{-8} \text{ Гц}^{-1}$ . Ошибка системы стабилизации частоты лазера по нелинейному резонансу, обусловленная наличием паразитной амплитудной модуляции лазерного излучения,  $\Delta\nu = \Delta P/(PK_d) \approx 0.4 \text{ Гц}$ . Поскольку частота второй гармоники лазерного излучения  $\nu \approx 5.64 \times 10^{14} \text{ Гц}$ , то относительная нестабильность частоты  $\Delta\nu/\nu \approx 7 \times 10^{-16}$ .

Для измерения на оптической частоте основной гармоники Nd:YAG-лазера с относительной ошибкой лучше, чем  $10^{-16}$ , необходимо иметь абсолютную ошибку измерений для разностной частоты двух оптических стандартов менее  $37 \times 10^{-2} \text{ Гц}$ . Ошибка измерений зависит от ошибки рабочей частоты каждого из АОМа, используе-

мого в оптических стандартах частоты. Так как рабочая частота АОМа составляет ~40 МГц, то относительная ошибка должна быть меньше, чем  $7.5 \times 10^{-10}$ .

В цифровой схеме синтеза частотно-модулированного сигнала используется опорный кварцевый генератор на 10 МГц ОСХО РТОС32227 с относительной ошибкой частоты за сутки  $5 \times 10^{-10}$ . Сигнал на разностной частоте ~500 кГц наблюдается в биениях между первыми гармониками излучения Nd:YAG-лазеров при стабилизации обоих стандартов по резонансу  $a1$  линии R(56)32-0 в молекулярном иоде, для этого в одном из оптических стандартов рабочая частота АОМа выбрана равной 40 МГц, а в другом – 41 МГц. Разностная частота измеряется электронно-счетным частотомером АКПП-5102/1, на который опорная частота подается с того же кварцевого генератора.

Общепринятой характеристикой нестабильности частоты является дисперсия (или вариация) Аллана. Эта характеристика имеет высокую практическую ценность и может быть достаточно просто оценена экспериментально. Для случайной последовательности  $x_k$  ( $k = 1, \dots, N$ ) вариация Аллана  $\sigma_A^2(\tau)$  на интервале осреднения  $\tau$  определяется как среднее дисперсий соседних пар данных  $x_k$ :

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (x_{k+1} - x_k)^2.$$

В измерительном устройстве при определении нестабильности частоты на вход частотного компаратора подаются два сигнала: измеряемый и опорный. В результате измеренная величина содержит суммарную нестабильность частот обоих сигналов, следовательно, является смещенной оценкой для анализируемого сигнала. При этом для получения достоверных результатов необходимо, чтобы опорный сигнал был заведомо стабильнее исследуемого. Для измерения нестабильности частоты стандартов оптического диапазона общепринятым методом является использование двух независимых, но идентичных оптических стандартов, анализу подвергается их разностная частота, которая смещается от нулевых значений с помощью гетеродинного вспомогательного лазера либо АОМа. При этом ожидаемая нестабильность сигнала на разностной частоте от двух идентичных, но независимых оптических стандартов должна быть в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем у каждого из стандартов.

Измерения разностной частоты проводились и сохранялись в памяти компьютера один раз в секунду. После измерений примерно в течение трех суток и обработки результатов с помощью программы Alavar 5.2 мы получили данные для дисперсии Аллана с минимальным и максимальным временами измерения 1 и  $6 \times 10^4$  с (рис.5).

### 3. Заключение

Разработана система прецизионной частотной модуляции лазерного излучения акустооптическим модулято-

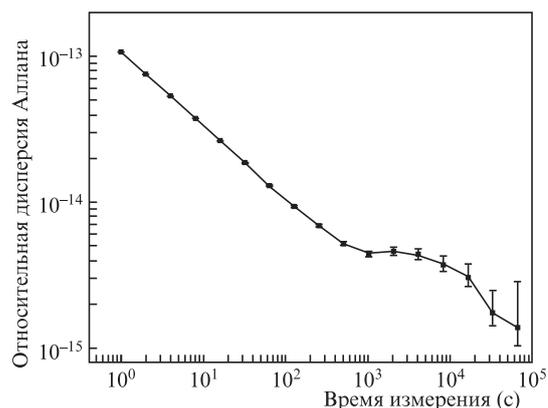


Рис.5. Относительная дисперсия Аллана  $\sigma_A/v$  для оптического стандарта частоты на Nd:YAG/I<sub>2</sub>.

ром с активной стабилизацией мощности лазерного излучения. Приняты меры по термостабилизации АОМа и узлов системы, а также стабилизации мощности лазерного излучения. Подавление паразитной амплитудной модуляции лазерного излучения активной системой стабилизации мощности лазерного излучения и принятые меры по термостабилизации позволили достичь уровня паразитной амплитудной модуляции  $\Delta P/P \approx 10^{-8}$  от всей мощности излучения. Для регистрации люминесценции использовались кремниевые фотодиоды, обладающие более высоким квантовым выходом по сравнению с мультищелочным фотокатодом ФЭУ.

Проведенная модернизация позволила получить высокую стабильность оптического стандарта частоты Nd:YAG/I<sub>2</sub>: дисперсия Аллана составила  $\sim 10^{-15}$  за времена  $6 \times 10^4$  с. Высокая стабильность и компактность созданного стандарта частоты делает возможным реализацию на его основе мобильных оптических часов [8, 9].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-02-00250а и 16-32-00159 мол\_а), гранта Президента РФ (НИШ-6689.2016.2) и Федерального агентства научных организаций (проект № 01201374304).

1. Basov N.G., Letokhov V.S. *Electron Technol.*, **2** (2), 15 (1969).
2. Chebotayev V.P., Goldort V.G., Goncharov A.N., Ohm A.E., Skvortsov M.N. *Metrologia*, **27**, 61 (1990).
3. Скворцов М.Н., Охапкин М.В., Невский А.Ю., Багаев С.Н. *Квантовая электроника*, **34** (12), 1107 (2004).
4. Zang E. J. et al. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **56** (2), 673 (2007).
5. Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Belkin A.M., Kvashnin N.L., Bagaev S.N. *Opt. Commun.*, **203**, 359 (2002).
6. Охапкин М.В., Скворцов М.Н., Багаев С.Н. *Автометрия*, **43** (5), 81 (2007).
7. Donley E.A., Heavner T.P., Levi F., Tataw M.O., Jefferts S.R. *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 063112 (2005).
8. Korel I.I., Nyushkov B.N., Denisov V.I., Pivtsov V.S., Koliada N.A., Sysolyatin A.A., Ignatovich S.M., Kvashnin N.L., Skvortsov M.N., Bagaev S.N. *Laser Phys.*, **24**, 074012 (2014).
9. Пивцов В.С., Нюшков Б.Н., Корель И.И., Коляда Н.А., Фарносов С.А., Денисов В.И. *Квантовая электроника*, **44** (6), 507 (2014).