

Дисковые квантроны на основе Yb:YAG для лазеров мульткиловаттной средней мощности

М.Р.Волков, И.И.Кузнецов, И.Б.Мухин, О.В.Палашов

Исследованы основные факторы, влияющие на эффективность охлаждения дисковых активных элементов из Yb:YAG и разработаны ключевые технологии дисковых лазеров для достижения высоких средней мощности и эффективности. С помощью численного расчета выполнена оптимизация основных параметров дискового активного элемента для работы в непрерывном режиме. На основе расчетов и разработанных технологий изготовлены дисковые лазерные квантроны и продемонстрирована лазерная генерация с оптической эффективностью до 50%. В резонаторе с двумя квантронами получен киловаттный уровень средней мощности; показана возможность его дальнейшего увеличения.

Ключевые слова: дисковый лазер, алюмоиттриевый гранат с иттербием, высокая средняя мощность.

1. Введение

Сочетание высокой средней мощности, высокой эффективности и хорошего качества пучка излучения делает дисковые лазеры одними из наиболее перспективных для создания высокоомощных лазерных систем. На сегодняшний день достигнута чрезвычайно высокая средняя мощность генерации излучения дисковых лазеров [1], в том числе излучения дифракционного качества. Однако основными ограничивающими факторами дальнейшего улучшения лазерных характеристик по-прежнему являются тепловые эффекты [2], усиленное спонтанное излучение (УСИ) [3], оптическое качество используемых материалов [4], доступные технологии охлаждения активных элементов (АЭ). Несмотря на выдающиеся результаты, достигнутые компаниями Trumpf и Dausinger&Giesen в изготовлении дисковых лазеров, многие из этих факторов остаются малоисследованными, что осложняет новые разработки в этой области.

В настоящей работе исследовано влияние нагрева АЭ из алюмоиттриевого граната с иттербием (Yb:YAG), вызванного дефектом кванта, решеточным поглощением среды, а также наличием нелинейных источников [5], определен оптимальный уровень легирования и рассчитана толщина диска для достижения баланса таких параметров, как усиление, температура, число проходов излучения накачки через АЭ. Исследовано также влияние способов монтажа дисковых АЭ на высокотеплопроводный теплоотвод. В результате на основе отечественной элементной базы разработан высокоомощный дисковый лазерный квантрон и продемонстрирована высокая эффективность его работы при киловаттном уровне средней мощности.

М.Р.Волков, И.И.Кузнецов, И.Б.Мухин, О.В.Палашов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: bearuck@mail.ru

Поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.

2. Оптимизация охлаждения дисковых АЭ

Стандартная схема дискового АЭ с теплоотводом представлена на рис.1. Излучение накачки ($\lambda = 940$ нм) и лазерное излучение ($\lambda = 1030$ нм) распространяются с одной стороны диска и отражаются от его зеркальной поверхности, а охлаждение осуществляется с другой стороны диска через зеркальную поверхность. Основными преимуществами дисковой геометрии АЭ являются отвод тепла вдоль направления распространения излучения и теплообмен через зеркальную поверхность АЭ. Такой подход позволяет масштабировать мощность лазера путем увеличения апертуры диска при постоянной его толщине, которая, в свою очередь, является важным параметром и может варьироваться для обеспечения эффективного отвода тепла из всего объема АЭ, достаточного усиления лазерного излучения и полного поглощения излучения накачки [6]. При заданном уровне легирования для выполнения двух последних требований необходимо увеличение толщины диска, а для повышения эффективности охлаждения – ее уменьшение. При этом увеличение уровня легирования материала позволяет уменьшать толщину АЭ, обеспечивая выполнение всех перечисленных выше требований.

Известно, что при увеличении уровня легирования в кристалле Yb:YAG уменьшается его теплопроводность [7, 8], что может быть ограничивающим фактором при

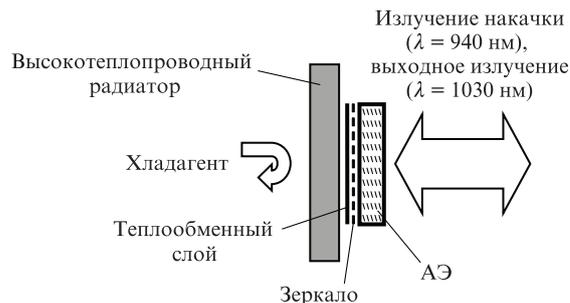


Рис.1. Схема дискового АЭ из Yb:YAG с теплоотводом.

выборе оптимальной толщины. Однако, как показано в [5, 9], существует более важный фактор, ограничивающий увеличение уровня легирования, – дополнительное нелинейное тепловыделение, которое проявляется в высоколегированных материалах. Механизм такого тепловыделения достоверно не выяснен. Однако существуют работы [10, 11], в которых предполагается, что оно вызвано возникновением фотопроводимости в среде и появлением связанной с ней широкой полосы поглощения света, что, как следствие, приводит к нагреву. Данный эффект значительно увеличивает мощность тепловыделения (по сравнению с тепловыделением из-за дефекта кванта лазерного излучения) при наличии в среде инверсии. В работе [4] показано, что величина дополнительного тепловыделения зависит от уровня легирования и коррелирует с коэффициентом тепловыделения, возникающего при просвечивании среды излучением на $\lambda = 1030$ нм. Указанный коэффициент определяется следующим образом. Образец просвечивается излучением с известными длиной волны и мощностью, и часть поглощенного излучения переходит в тепло. Мощность этого излучения (тепловая мощность), деленная на длину образца и мощность падающего на него излучения, и есть коэффициент тепловыделения. Измерение тепловой мощности проводится на основе температурного поля в образце, регистрируемого с помощью тепловой камеры, а также известных теплоемкости и теплопроводности среды. Процедура измерений подробно описана в [4]. С использованием данного метода выполнено измерение коэффициента тепловыделения на $\lambda = 1030$ нм в кристаллах Yb:YAG с различным уровнем легирования. Необходимо отметить, что средняя длина волны люминесценции в Yb:YAG составляет ~ 1010 нм, поэтому поглощение излучения с $\lambda = 1030$ нм за счет дефекта кванта приводит к охлаждению среды в отсутствие других источников нагрева. Как следует из результатов измерений (рис.2), коэффициент тепловыделения может принимать отрицательные значения при уровне легирования вплоть до 7% и всегда положителен при больших уровнях легирования. Это означает, что дополнительное нелинейное тепловыделение незначительно (меньше тепловыделения из-за дефекта кванта с $\lambda = 940$ нм) при уровне легирования, не превышающем 7%. Таким образом, эффект дополнительного тепловыделения формирует основное ограничение на уровень легирования в дисковом АЭ из Yb:YAG: он не должен превышать 7%.

Будем считать поглощение эффективным, если в АЭ поглощается не менее 95% излучения накачки. Тогда с учетом уровня легирования 7%, сечения поглощения в

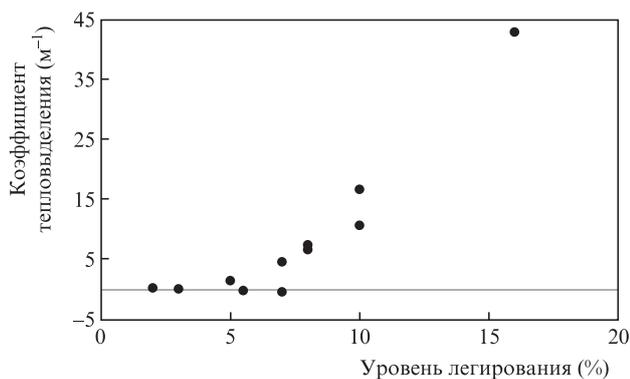


Рис.2. Зависимость коэффициента тепловыделения на $\lambda = 1030$ нм от уровня легирования в кристалле Yb:YAG.

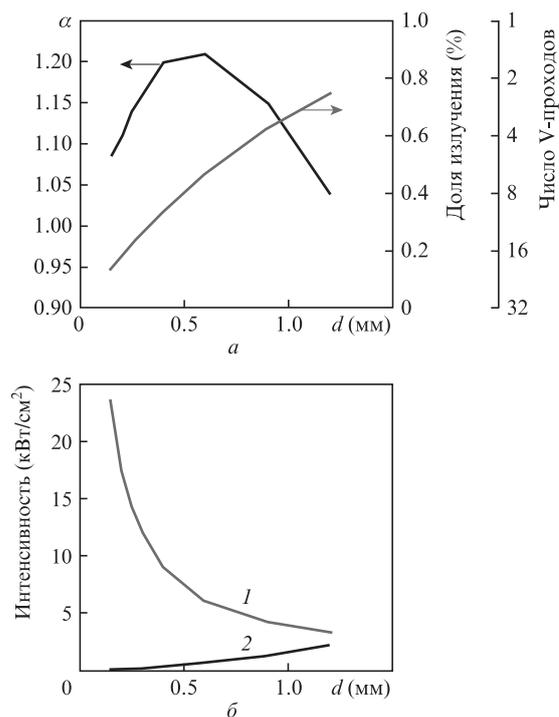


Рис.3. Зависимости от толщины дискового АЭ d усиления слабого сигнала α и доли излучения накачки, поглощенной при одном отражении от зеркальной поверхности АЭ (дополнительная шкала, указывает необходимое число V -проходов излучения накачки для эффективного (более 95%) его поглощения) (а), а также максимальной допустимой средней интенсивности поглощенного излучения накачки (1) и пороговой средней интенсивности поглощенного излучения (2), необходимой для возникновения усиления (б).

кристалле Yb:YAG на $\lambda = 940$ нм и коэффициента отражения излучения накачки от задней (зеркальной) поверхности диска необходимо, чтобы расстояние, которое излучение накачки проходит в активной среде, составляло 2.5 мм. Однако такая толщина дискового элемента слишком велика [6] для организации эффективного отвода тепла. Поэтому нужно обеспечить несколько проходов излучения накачки через АЭ, что и реализуется в большинстве дисковых лазеров. Расчет оптимальной толщины дискового АЭ проводился численно [12, 13]. Он позволял одновременно учитывать нагрев АЭ, усиление излучения в нем, эффект УСИ и поглощение накачки.

На рис.3 представлены результаты численного расчета максимально допустимой средней интенсивности поглощенного излучения накачки (и эффективности его поглощения) и усиления излучения на $\lambda = 1030$ нм в зависимости от толщины диска d . При расчете предполагалось, что максимальная температура поверхности дискового АЭ не должна превышать 200 °С, а коэффициент теплообмена между АЭ и термостабилизированным радиатором составляет $10 \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Видно, что при увеличении толщины диска растет эффективность поглощения излучения накачки, требуется меньшее число его отражений (V -проходов) от зеркальной поверхности АЭ. Однако при чрезмерном увеличении толщины диска снижается усиление из-за уменьшения плотности инверсии в среде и уменьшается динамический диапазон допустимой средней интенсивности поглощенного излучения накачки, что, в том числе, резко снижает оптическую эффективность лазера (отношение мощностей излучения лазера и накачки). При уменьшении толщины d существенно возрастает

допустимая для использования интенсивность излучения накачки, однако при этом значительно увеличивается необходимое число V -проходов через АЭ, что не всегда можно обеспечить технически. Кроме того, при малой толщине АЭ усиление уменьшается из-за эффекта УСИ [3]. Также необходимо помнить, что с ростом толщины диска будут увеличиваться термонаведенные фазовые искажения излучения. Тогда можно утверждать, что оптимальная толщина дискового АЭ при усилении сигналов будет близка к 0.4 мм. При использовании АЭ в непрерывном лазере величина усиления не так важна, как при работе в режиме усиления, поскольку при достижении порога генерации плотность инверсии в АЭ не меняется. При этом толщина d может быть уменьшена до 0.2–0.3 мм для увеличения диапазона допустимых интенсивностей поглощенного излучения накачки и уменьшения термонаведенных искажений.

Другим важным условием работы дискового лазера является его монтаж на охлаждаемый водой высокотеплопроводный радиатор с минимальным тепловым сопротивлением. Нами исследован тепловой контакт между дисковым АЭ и теплопроводом из поликристаллического алмаза, осуществленный методом пайки кристалла [14], а также новым методом, идея которого основана на ультратонкой склейке дискового АЭ с полированной поверхностью поликристаллического алмаза фотополимерным клеем VERFIX B665-0. Главным недостатком создания контакта методом пайки является температурное воздействие, приводящее к деформациям тонкого дискового элемента после остывания и, следовательно, к появлению дополнительных фазовых искажений излучения. Также при пайке возможен брак, проявляющийся в виде неоднородного теплового сопротивления и приводящий к возникновению перегретых областей АЭ при работе дискового квантрона. Второй метод создания теплового контакта основан на использовании в качестве теплообменного слоя полимерного клея. Его теплопроводность мала по сравнению с теплопроводностью индиевого припоя. Однако благодаря высококачественной полировке тепловода из поликристаллического алмаза и хорошей текучести клея можно обеспечить толщину слоя клея в доли микрометров. В связи с этим удастся снизить его тепловое сопротивление до пренебрежимо малого и обеспечить хорошую однородность контакта с контролируемым фазовым профилем зеркальной поверхности дискового АЭ. На рис.4 представлена зависимость максимальной температуры поверхности дискового АЭ при монтаже контак-

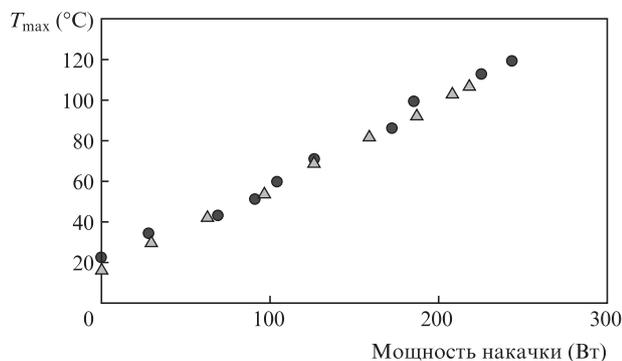


Рис.4. Зависимости максимальной температуры поверхности дисковых АЭ от мощности поглощенного излучения накачки при создании теплового контакта с использованием индиевого припоя (Δ) и полимерного клея (●).

та с помощью индиевого припоя и ультратонкого слоя полимерного клея. Измерения выполнены с использованием ИК камеры в одинаковых дисковых АЭ толщиной 220 мкм. Видно, что во всем диапазоне измерений максимальная температура поверхности дискового АЭ совпадает в обоих вариантах монтажа.

3. Лазерная генерация

На основе исследований и разработок, описанных в предыдущем разделе, были изготовлены лазерные квантроны с дисковыми АЭ из $Yb:YAG$ с уровнем легирования 7%, толщиной 220 мкм и диаметрами 10–15 мм. Потери лазерного излучения на просветленной поверхности составляли 0.2%, а на зеркальной — менее 0.1%. Для проверки эффективности генерации исследованы АЭ из материалов различных производителей. В дисковых квантронах обеспечивалось до 16 проходов излучения накачки, что, согласно рис.2, достаточно для его эффективного поглощения как при лазерной генерации, так и в ее отсутствие. Генерация осуществлялась в устойчивом резонаторе [15] (рис.5,а) с выходным зеркалом, имеющим коэффициент пропускания $\tau = 10\%$ для $\lambda = 1030$ нм (оптимальное значение τ было предварительно подобрано экспериментально). Радиус кривизны сферического зеркала составлял 120 см при длине резонатора 40 см, что обеспечивало диаметр основной поперечной моды на АЭ, равный 0.9 мм, при диаметре пучка накачки 5 мм. В результате наблюдалась многомодовая генерация. Данные экспериментов приведены на рис.6. Видно, что порог генерации и дифференциальная эффективность генерации при использовании различных дисковых элементов близки, однако при большой мощности излучения накачки имеются различия, связанные с разными оптическими и лазерными качествами применяемого материала. Для лучших образцов получена мощность излучения 600 Вт при дифференциальной эффективности 60% и оптической эффективности 50%, что близко к лучшим мировым результатам. Интенсивность излучения накачки составила при этом ~ 6 кВт/см². Дальнейшее увеличение в эксперименте как выходной лазерной мощности, так и интенсивности излучения накачки было ограничено доступной мощностью накачки, равной 1250 Вт.

Для увеличения мощности лазерной генерации был разработан лазерный резонатор с двумя дисковыми кван-

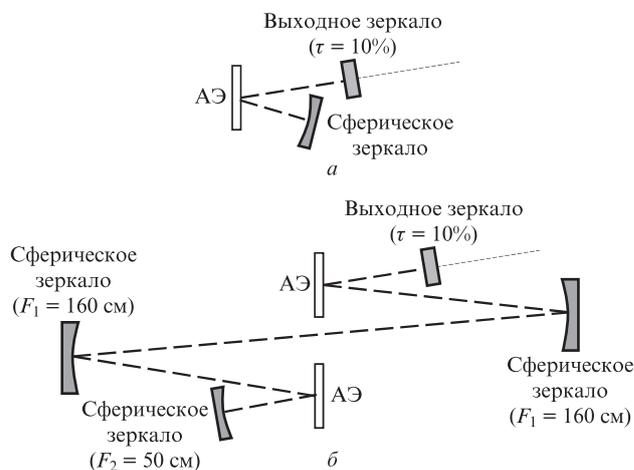


Рис.5. Схемы V-образного резонатора с одним (а) и двумя (б) дисковыми АЭ.

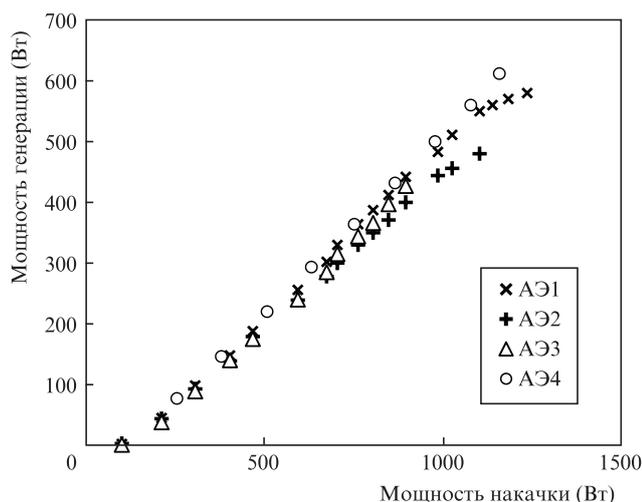


Рис.6. Зависимости мощности лазерной генерации от мощности излучения накачки в дисковых элементах из Yb:YAG различных производителей.

тронами, накачиваемыми излучением мощностью 1200 Вт каждый. В эксперименте использовались образцы АЭ1 и АЭ2 (рис.6). Схема резонатора приведена на рис.5,б. Оптимальный коэффициент пропускания выходного зеркала составил 10%. Сферические зеркала имели радиусы кривизны $F_1 = 160$ см и $F_2 = 50$ см. При длине резонатора 358 см диаметр основной моды на АЭ был равен 0.7 мм при диаметре пучка излучения накачки 5 мм. Дополнительно была измерена температура поверхности АЭ с помощью ИК камеры. Результаты измерений приведены на рис.7. Достигнута мощность излучения 1 кВт, дифференциальная эффективность при этом чуть снизилась (до 50%), что объясняется более сложной оптической схемой резонатора. Следует также отметить, что температура поверхности АЭ находилась в пределах 150–190 °С и не ограничивала эффективность генерации. В разработанных квантронах возможно дальнейшее увеличение мощности лазерного излучения путем повышения мощности накачки как при используемом нами диаметре пучка 5 мм, так и при его масштабировании вплоть до 10 мм. Такой подход позволит достичь мощности лазерной генерации в несколько киловатт без уменьшения ее эффективности.

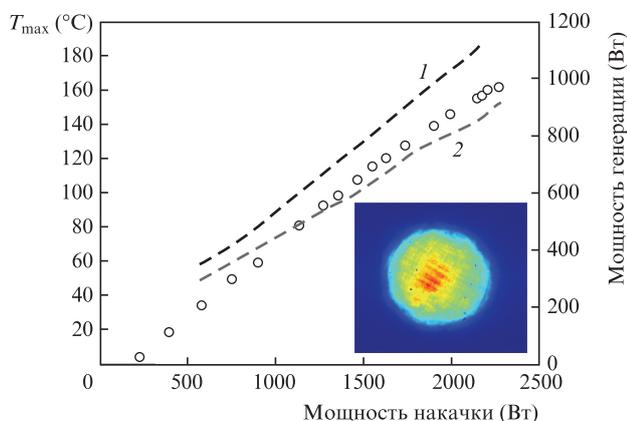


Рис.7. Зависимости от суммарной мощности излучения накачки мощности генерации в лазерном резонаторе с двумя дисковыми квантронами (о), а также максимальной температуры поверхностей АЭ1 (1) и АЭ2 (2). На вставке – фотография сечения выходного пучка при мощности генерации 800 Вт.

4. Заключение

Разработан и оптимизирован дисковый квантрон для генерации лазерного излучения мощностью несколько киловатт и экспериментально достигнута мощность лазерного излучения ~1 кВт при оптической эффективности 50%. Дифференциальная эффективность лазерной генерации при использовании одного дискового квантрона составила 60% при мощности выходного лазерного излучения 600 Вт. При создании квантрона выполнено исследование эффекта дополнительного нелинейного тепловыделения в высоколегированных образцах и разработан метод монтажа дискового АЭ с помощью ультратонкого слоя фотополимерного клея. Оптимизация толщины АЭ и числа проходов излучения накачки в нем выполнялась путем совместного численного решения уравнения теплопроводности и балансных уравнений с учетом эффекта УСИ. Показано, что оптимальный уровень легирования в кристалле Yb:YAG равен ~7%, и в этом случае толщина АЭ должна составлять не более 0.4 мм для обеспечения эффективного охлаждения объема АЭ и не менее 0.2 мм для уменьшения влияния эффекта УСИ и во избежание чрезмерного усложнения оптической схемы накачки.

Исследование дополнительного тепловыделения и разработка дисковых лазерных квантронов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-72-10134). Разработка лазерных резонаторов и исследование эффективности их генерации выполнено при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» (проект № 0035-2018-0023).

1. Kuhn V., Gottwald T., Stolzenburg C., Schad S.-S., Killi A., Ryba T. *Proc. Conf. on Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices*, (San Francisco: SPIE, 2015, vol. 9342).
2. Wolters U., Beil K., Kränkel C., Petermann K., Huber G., Moulton P. *Proc. Advanced Solid-State Lasers Congress* (Paris: Optical Society of America, 2013, p. AW1A.3).
3. Kouznetsov D., Bisson J.-F., Dong J., Ueda K.-I. *J. Opt. Soc. Am. B*, **23**, 1074 (2006).
4. Volkov M.R., Kuznetsov I.I., Mukhin I.B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **54**, 1 (2018).
5. Larionov M., Schuhmann K., Speiser J., Stolzenburg C., Giesen A. *Proc. Conf. on Advanced Solid-State Photonics* (Vienna, Austria, 2005, p. TuB49).
6. Contag K., Erhard S., Giesen A. *Proc. Conf. on Advanced Solid State Lasers* (Davos: Optical Society of America, 2000, p. ME2).
7. Bourdet G.L., Yu H. *Appl. Opt.*, **46**, 6033 (2007).
8. Patel F.D., Honea E.C., Speth J., Payne S.A., Hatcheson R., Equall R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37**, 135 (2001).
9. Wolters U., Beil K., Kränkel C., Petermann K., Huber G. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics – Int. Quantum Electronics Conf.* (Munich: Optical Society of America, 2013, paper CA_8_5).
10. Wolters U., Fredrich-Thornton S.T., Tellkamp F., Petermann K., Huber G. *CLEO/Europe and EQEC 2009 Conf. Digest* (Munich: Optical Society of America, 2009, paper CA9_2).
11. Fredrich-Thornton S.T., Bisson J.-F., Kouznetsov D., Ueda K.-I., Petermann K., Huber G. *Proc. CLEO* (Baltimore, Maryland, 2007, p. CFJ16).
12. Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Silin D.E., Vyatkin A.G., Vadimova O.L., Palashov O.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **50**, 133 (2014).
13. Вадимова О.Л., Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Палашов О.В., Перевезенцев Е.А., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **43**, 201 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 201 (2013)].
14. Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Палашов О.В. Патент РФ №2646431. Приоритет от 09.12.2016.
15. Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Palashov O.V. *Laser Phys.*, **26** (4), 045004 (2016).