

Лазер на стержнях из неодимового стекла с выходной энергией 500 Дж

А.А.Шайкин, А.А.Кузьмин, И.А.Шайкин, К.Ф.Бурдонов, Е.А.Хазанов

При инжектировании в существующий многокаскадный усилитель на стержнях из фосфатного неодимового стекла двух ортогонально поляризованных импульсов выходная энергия была увеличена с 300 до 500 Дж (в обоих импульсах) без увеличения числа усилителей и их коэффициентов усиления. Полученный второй импульс с энергией 200 Дж будет использован для накачки дополнительного параметрического усилителя петаваттного лазера.

Ключевые слова: лазерный усилитель, фосфатное неодимовое стекло, петаваттный лазер.

1. Введение

Неодимовое лазерное стекло в качестве активной среды практически не имеет альтернативы, если речь идет о нано- и пикосекундных лазерах с энергией импульса более 100 Дж. Такие лазеры широко используются для возбуждения и изучения ударных волн в твердых телах [1], для тестирования оптической стойкости широкоапертурных элементов [2, 3], для моделирования эффектов в физике высоких энергий и лазерном УТС [4, 5] и в других случаях [6, 7]. Одни из главных приложений – получение импульсов петаваттного уровня [8, 9], а также накачка петаваттных и мультипетаваттных параметрических усилителей [10–14] и усилителей на титан-сапфире [15–18].

В мощных неодимовых лазерах существуют две геометрии активных элементов: стержни и слэбы. Преимущество первых – однопроходное усиление, лучшее качество выходного излучения, компактность, простота юстировки, большая частота следования импульсов. В то же время слэбы позволяют достичь большей энергии импульса благодаря большей апертуре (вплоть до 40×40 см), т.к. факторами, ограничивающими энергию импульсов, являются оптический пробой и мелкомасштабная самофокусировка. Максимальный диаметр стержневого усилителя равен 15 см [19], но изготовление таких стержней требует уникальной технологии. На сегодняшний день максимальный используемый на практике диаметр составляет 9–10 см [13, 14, 20, 21]. Особенно негативно ограничение апертуры сказывается на усилителях чирпированных импульсов и на лазерах накачки параметрических усилителей из-за малой (1 нс) длительности импульса. При такой длительности максимальная энергия импульса ограничена на уровне 300 Дж, хотя запасенная энергия существенно больше.

В работе [22] было предложено усиливать два последовательных импульса вместо одного, что, во-первых, существенно упрощает формирование на выходе усилителя

импульса прямоугольной формы, а во-вторых, позволяет значительно повысить суммарную выходную энергию, т.к. указанные выше ограничения относятся к одному импульсу. В настоящей работе мы использовали второй подход, инжектируя в существующий многокаскадный усилитель два ортогонально поляризованных импульса. Без увеличения количества усилителей и их коэффициентов усиления мы получили на выходе как импульс с энергией 300 Дж, так и дополнительный импульс с энергией 200 Дж, который будет использоваться для накачки дополнительного параметрического усилителя.

2. Схема лазера

На рис.1 представлена схема установки, состоящей из двух частей: из устройства, генерирующего две реплики входного импульса, и из многокаскадного лазерного усилителя. На вход подавался импульс из задающего генератора и предварительного усилителя (на рис.1 не показаны) со следующими параметрами: энергия до 4.5 мДж, длительность 1.5 нс, диаметр пучка 10 мм.

Два импульса, инжектируемые в многокаскадный усилитель, должны иметь одинаковое направление волнового вектора с точностью, много меньшей дифракционной расходимости. Энергия в первом импульсе должна быть существенно ниже, чем во втором, поскольку из-за насыщения усилителей второй импульс усиливается гораздо слабее. Плавное изменение отношения входных энергий импульсов позволяет плавно изменять отношение их энергий на выходе усилителей.

Существуют два принципиально разных способа генерации двух реплик входного импульса: амплитудный (делением пучка, а затем сведением пучков полупрозрачными зеркалами) и поляризационный (поляризаторами). В первом случае импульсы имеют одинаковую поляризацию, и это накладывает меньшие ограничения на оптические элементы усилительного тракта – например, допускает использование поляризаторов, что невозможно в случае поляризационного делителя. Кроме того, амплитудный способ, в отличие от поляризационного, может быть применен для получения трех и более импульсов. Однако его использование сопровождается потерями энергии, тогда как при поляризационном способе сум-

А.А.Шайкин, А.А.Кузьмин, И.А.Шайкин, К.Ф.Бурдонов, Е.А.Хазанов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: khazanov@appl.sci-nnov.ru

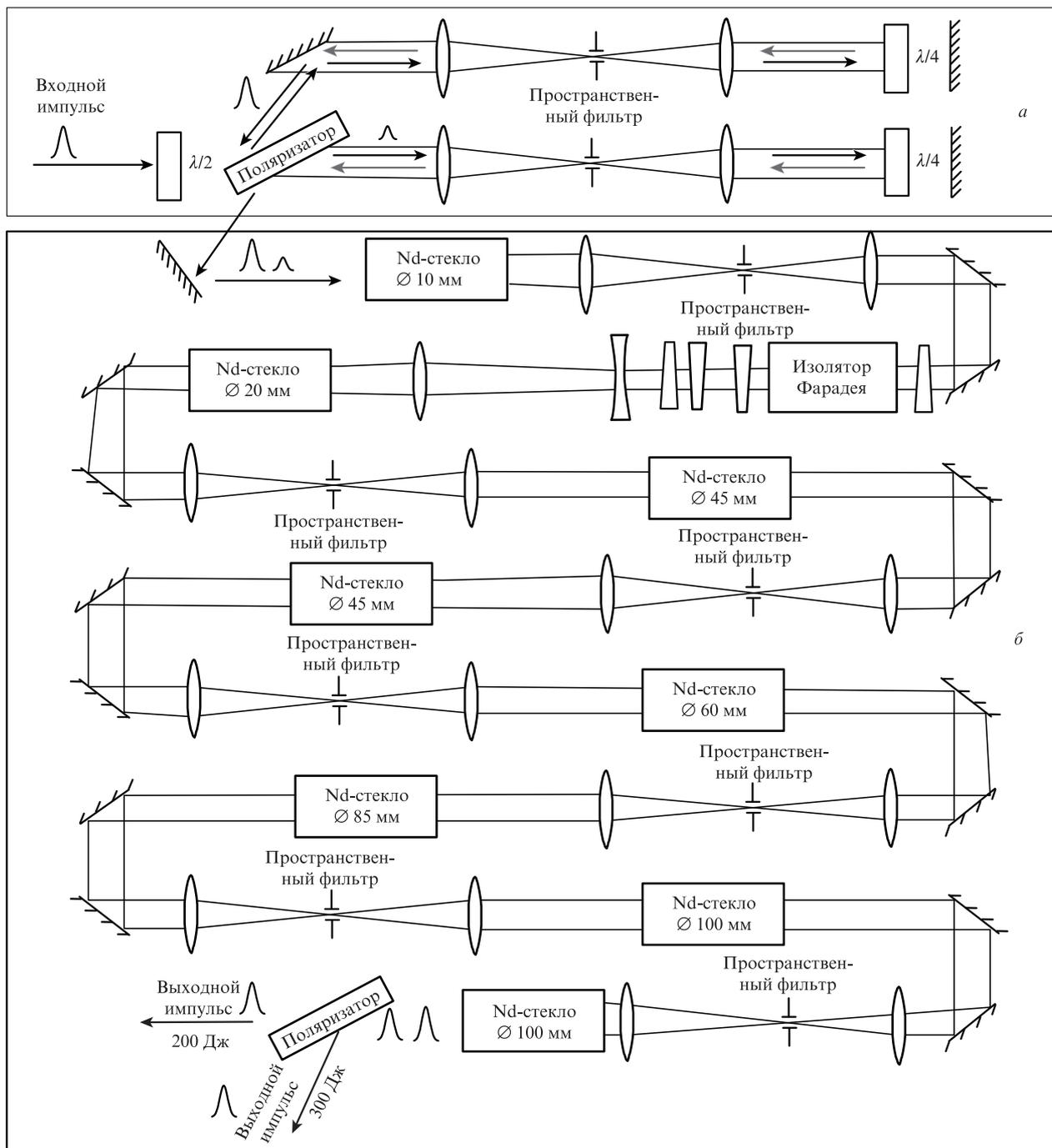


Рис.1. Схема установки: устройство, генерирующее две реплики входного импульса (а), и многокаскадный лазерный усилитель (б).

марная энергия двух инжектируемых в усилители импульсов практически равна энергии входного импульса. Главное же различие в подходах заключается в том, что при поляризационном способе два импульса на выходе усилителя имеют ортогональные поляризации. Это может быть и преимуществом, и недостатком (в зависимости от приложений). В нашем случае мы выбрали поляризационный способ, поскольку для накачки двух параметрических усилителей удобно на выходе усилителя пространственно разделить импульсы, что невозможно, если импульсы одинаково поляризованы.

Отношение энергий двух входных импульсов (E_{in2} и E_{in1}) изменялось поворотом полуволновой пластинки (рис.1). Задержка между импульсами была равна 7 нс. С

одной стороны, это время много больше длительности импульса и позволяет рассчитывать, что ограничение предельной энергии, составляющее 300 Дж, будет относиться к каждому импульсу по отдельности. С другой стороны, оно меньше времени образования плазмы в диафрагмах пространственных фильтров (см. ниже), что позволяет второму импульсу свободно проходить через фильтры.

После делительного поляризатора каждый из импульсов дважды проходит через телескоп. Такая двухпроходная геометрия обеспечивает максимально компактный перенос изображения выходной плоскости предварительного усилителя (на рис.1 не показан) на вход усилителя с диаметром стержня 10 мм.

После совмещения двух пучков на поляризаторе они направлялись в многокаскадный усилитель на фосфатном неодимовом стекле. Подробному описанию всех элементов усилителя будет посвящена отдельная публикация, а здесь мы ограничимся кратким описанием основных элементов. Восемь усилителей представляли собой стержни с диаметрами 10, 20, 45, 45, 60, 85, 100 и 100 мм. Между ними располагались вакуумные пространственные фильтры, переносящие изображение с одного усилителя на другой. Напряжение на блоках питания усилителей диаметром 10, 20 и 45 мм не менялось и составляло 4.5, 4.5 и 5.5 кВ соответственно. Напряжение на всех остальных усилителях в каждом выстреле было одинаковым, и в процессе измерений устанавливалось равным 11, 11.5 и 12.5 кВ. В качестве поляризаторов в изоляторе Фарадея мы использовали шпатовые клинья. Дополнительная пара шпатовых клиньев, находящаяся за изолятором, позволяла пропускать через усилитель два импульса, несмотря на их ортогональные поляризации. Изолятор обеспечивал подавление самовозбуждения при максимальной накачке всех усилителей, при которой суммарный коэффициент усиления по слабому сигналу составлял 3×10^7 . Заметим, что из-за френелевских потерь и поглощения в стекле пропускание со входа установки до ее выхода составляло 0.14. На выходе последнего усилителя импульсы разделялись поляризатором и направлялись на диагностику. Размер оптического стола, на котором находились усилители, был равен 10×1.7 м.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На выходе усилителя измерялась как энергия каждого импульса E_{out1} , E_{out2} , так и их суммарная энергия $E_{out} = E_{out1} + E_{out2}$. На рис.2 показаны зависимости этих энергий от входной энергии $E_{in} = E_{in1} + E_{in2}$ при напряжениях блоков питания $U = 11, 11.5$ и 12.5 кВ. Видно, что при $E_{in} \approx 1.5$ мДж суммарная выходная энергия E_{out} имеет уровень насыщения примерно 400, 450 и 500 Дж при $U = 11, 11.5$ и 12.5 кВ соответственно, что согласуется с результатами теоретических расчетов. Заметим, что даже при максимальной энергии второй импульс свободно проходит через все пространственные фильтры, т. е. время образования плазмы в их диафрагмах больше 7 нс (см. рис.3,б).

На рис.2 показаны зависимости $E_{out1}(E_{in})$ и $E_{out2}(E_{in})$ для отношений $E_{in2}/E_{in1} = 5$ (при $U = 11$ кВ) и $E_{in2}/E_{in1} = 10$ (при $U = 12.5$ кВ). Для других значений E_{in2}/E_{in1} и U эти зависимости не показаны, чтобы не перегружать рисунок. При $U = 11$ кВ первый импульс усиливается линейно

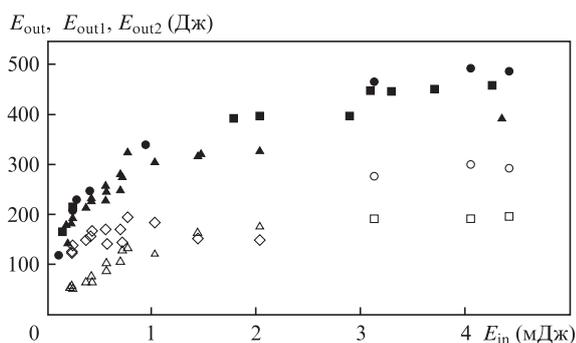


Рис.2. Зависимости $E_{out}(E_{in})$ при $U = 11$ кВ (\blacktriangle), 11.5 кВ (\blacksquare) и 12.5 кВ (\bullet), а также $E_{out1}(E_{in})$ (\triangle , \circ) и $E_{out2}(E_{in})$ (\diamond , \square) при $E_{in2}/E_{in1} = 5$, $U = 11$ кВ (\triangle , \diamond) и $E_{in2}/E_{in1} = 10$, $U = 12.5$ кВ (\circ , \square).

при $E_{in} < 0.6$ мДж (т. е. $E_{in1} < 0.1$ мДж), а при больших E_{in} насыщение уже существенно. Второй импульс даже при $E_{in} = 0.2$ мДж испытывает насыщение, т. к. его входная энергия значительно больше. При увеличении E_{in} энергия E_{out2} не только насыщается, но и достигает максимума и начинает уменьшаться, поскольку первый импульс существенно истощает инверсию.

При больших значениях E_{in} и $U = 12.5$ кВ отношение $E_{in2}/E_{in1} = 10$ было выбрано таким, чтобы энергия первого импульса E_{out1} была близка к 300 Дж – максимально безопасной с точки зрения пробоя энергии. При этом энергия второго импульса E_{out2} составила около 200 Дж. Как показали расчеты, дальнейшее увеличение E_{in} не приводит к существенному увеличению ни E_{out1} , ни E_{out2} . Более того, в последнем усилителе остающаяся после первого импульса инверсия настолько мала, что усиление второго импульса практически компенсируется френелевскими потерями и поглощением в стекле. В связи с этим мы планируем поместить поляризатор перед последним усилителем и, направив отраженный от поляризатора импульс в дополнительный усилитель, получить максимально безопасную энергию 300 Дж в каждом из двух импульсов.

На рис.3 показаны распределение интенсивности выходных пучков в ближней зоне и осциллограмма выходных импульсов с энергией 300 и 195 Дж. Улучшить качество пучка можно за счет более точной юстировки и профилирования формы входного пучка. Осциллограммы импульсов измерялись фотодиодом с разрешением 300 пс и осциллографом с шириной полосы 1 ГГц.

После удвоения частоты длительности импульсов уменьшатся до 1.2 нс, и они будут использованы для накачки двух параметрических усилителей петаваттного лазера: первый импульс, как и ранее [11], – для накачки первого усилителя, а второй – для накачки дополнительного усилителя, что позволит значительно увеличить мощность выходного фемтосекундного импульса.

В заключение отметим, что данная схема усилителя по сравнению со схемой усилителя в трехсотджоульном лазере накачки, используемом ранее [13], кроме дополни-

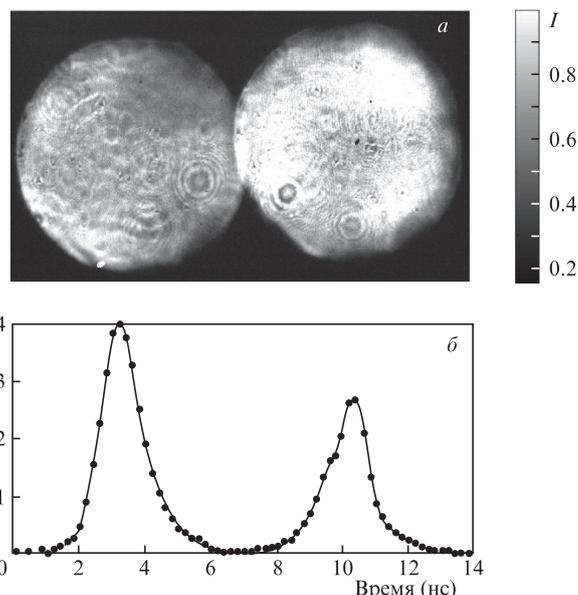


Рис.3. Распределение интенсивности в ближней зоне (а) и во времени (б) на выходе лазера. Энергии импульсов 300 и 200 Дж, диаметр пучка 100 мм.

тельного импульса с энергией 200 Дж имеет еще одно важное преимущество – существенно меньшие искажения формы импульса. Это значительно упрощает задачу формирования выходного импульса прямоугольной формы. Проведенные расчеты показали, что коэффициент искажения (отношение усиления на переднем фронте импульса к усилению на заднем) для импульса с энергией 300 Дж в данном лазере составляет 22, тогда как в лазере из работы [13] он был равен 80. В настоящей работе это преимущество не играло роли, т. к. импульс был колоколообразным (рис.3,б), однако в будущем мы планируем, используя это преимущество, получать прямоугольные выходные импульсы, что повысит эффективность как удвоения частоты, так и параметрического усиления.

Итак, поскольку оптическая стойкость лазерного стекла диаметром 100 мм ограничивает энергию лазерных импульсов длительностью 1 нс на уровне 300 Дж, в настоящей работе использовалась инжекция в многокаскадный усилитель двух последовательных импульсов, что позволило получить выходную энергию 500 Дж (300 Дж в первом импульсе и 200 Дж во втором). Дальнейшее увеличение энергии связано с разделением выходного усилителя на два, в которых импульсы будут усиливаться параллельно, а также с увеличением апертуры выходных усилителей до 150 мм.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения» и Минобрнауки РФ (проект №14.Z50.31.0007). Экспериментальная установка создана при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-08099 и 16-32-60125).

1. Красюк И.К. *УФН*, **169**, 1155 (1999).
2. Nostrand M.C., Weiland T.L., Luthi R.L., Vickers J.L., Sell W.D., Stanley J.A., Honig J., Auerbach J.M., Hackel R.P., Wegner P.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5273**, 325 (2003).
3. Lamaignere L., Dupuy G., Bourgeade A., Benoist A., Roques A., Courchinoux R. *Appl. Phys. B*, **114**, 517 (2014).
4. Norman M.J., Andrew J.E., Bett T.H., Clifford R.K., England J.E., Hopps N.W., Parker K.W., Porter K., Stevenson M. *Appl. Opt.*, **41**, 3497 (2002).
5. Rambo P.K., Smith I.C., Porter J.L., Hurst M.J., Speas C.S., Adams R.G., Garcia A.J., Dawson E., Thurston B.D., Wakefield C., Kellogg J.W., Slattery M.J., Ives III H.C., Broyles R.S., Caird J.A., Erlandson A.C., Murray J.E., Behrendt W.C., Neilsen N.D., Narduzzi J.M. *Appl. Opt.*, **44**, 2421 (2005).
6. Remo J.L., Adams R.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7005**, 70052M (2008).
7. Brown M., Ekberg J.O., Feldman U., Seely J.F., Richardson M.C., Marshall F.J., Behring W.E. *J. Opt. Soc. Am. B*, **4**, 533 (1987).
8. Gaul E., Martinez M., Blakeney J., Jochmann A., Ringuette M., Hammond D., Borger T., Escamilla R., Douglas S., Henderson W., Dyer G., Erlandson A., Cross R., Caird J., Ebberts C.A., Ditmire T. *Appl. Opt.*, **49**, 1676 (2010).
9. Perry M.D., Pennington D., Stuart B.C., Tietbohl G., Britten J.A., Brown C., Herman S., Golick B., Kartz M., Miller J., Powell H.T., Vergino M., Yvanovsky V. *Opt. Lett.*, **24**, 160 (1999).
10. Chekhlov O.V., Collier J.L., Ross I.N., Bates P.K., Notley M., Hernandez-Gomez C., Shaikh W., Danson C.N., Neely D., Matousek P., Hancock S. *Opt. Lett.*, **31**, 3665 (2006).
11. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 421 (2007).
12. Xu L., Yu L., Liang X., Chu Y., Hu Z., Ma L., Xu Y., Wang C., Lu X., Lu H., Yue Y., Zhao Y., Fan F., Tu H., Leng Y., Li R., Xu Z. *Opt. Lett.*, **38**, 4837 (2013).
13. Poteomkin A.K., Khazanov E.A., Martyanov M.A., Kirsanov A.V., Shaykin A.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **45**, 854 (2009).
14. Потемкин А.К., Катин Е.В., Кирсанов А.В., Лучинин Г.А., Мальшаков А.Н., Мартьянов М.А., Матвеев А.З., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. *Квантовая электроника*, **35**, 302 (2005).
15. Kiriya H., Michiaki M., Nakai Y., Shimomura T., Sasao H., Tanaka M., Ochi Y., Tanoue M., Okada H., Kondo S., Kanazawa S., Sagisaka A., Daito I., Wakai D., Sasao F., Suzuki M., Kotakai H., Kondo K., Sugiyama A., Bulanov S., Bolton P.R., Daido H., Kawanishi S., Collier J.L., Hernandez-Gomez C., Hooker C.J., Ertel K., Kimura T., Tajima T. *Appl. Opt.*, **49**, 2105 (2010).
16. Yanovsky V., Alinchenko G., Rousseau P., Chvykov V., Mourou G., Krushelnick K. *Appl. Opt.*, **47**, 1968 (2008).
17. Kuzmin A.A., Khazanov E.A., Kulagin O.V., Shaykin A.A. *Opt. Express*, **22**, 20842 (2014).
18. Кузьмин А.А., Кулагин О.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. *Квантовая электроника*, **43**, 597 (2013).
19. Шайкин А.А., Фокин А.П., Соловьев А.А., Кузьмин А.А., Шайкин И.А., Бурдонов К.Ф., Чарухчев А.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **44**, 426 (2014).
20. Баянов В.И., Бородачев Е.Г., Волынкин В.М., Крыжановский В.И., Мак А.А., Моторин И.В., Никонова М.В., Серебряков В.А., Стариков А.Д., Чарухчев А.В., Щавелев О.С., Яшин В.Е. *Квантовая электроника*, **13**, 1891 (1986).
21. Kong H.J., Lee S.S., Kim H.S., Han K.G., Kim N.S., Um K.Y., Park J.R., Lee J.Y. *Laser Part. Beams*, **15**, 317 (1997).
22. Шайкин А.А. *Квантовая электроника*, **44**, 440 (2014).