

# Высокоэффективный универсальный микрочип-лазер айнс-гауссовых мод с самомодуляцией добротности и высокой частотой следования импульсов для оптического захвата\*

Юнь Донг, Ю Хе, Сяо Чжоу, Шенчунь Бай

*Лазеры айнс-гауссовых (IG) мод могут найти применение для оптического манипулирования микрочастицами, формирования оптических вихрей (вортексов), для оптического захвата и в оптических пинцетах. Универсальные микрочип-лазеры на Cr, Nd:YAG IG-моды с самомодуляцией добротности и высокой пиковой мощностью реализованы при наклонной жестко сфокусированной накачке диодным лазером. Получена средняя выходная мощность более 2 Вт при поглощенной мощности накачки 6.4 Вт. Наибольшая эффективность 33.2% по свету была достигнута при поглощенной мощности накачки 3.9 Вт. Получены лазерные импульсы с энергией 7.5 мкДж и пиковой мощностью более 2 кВт при ширине импульса 3.5 нс. При поглощенной мощности накачки 5.8 Вт достигнута частота следования импульсов вплоть до 335 кГц. Созданные высокоэффективные универсальные лазеры IG-моды с высокой частотой следования и высокой пиковой мощностью обеспечивают большую гибкость при манипулировании частицами, а также в оптическом захвате.*

**Ключевые слова:** айнс-гауссовы моды, микрочип-лазеры на Cr, Nd:YAG, диодная накачка, самомодуляция добротности.

## 1. Введение

Лазерные источники, излучение которых описывается айнс-гауссовыми (IG) модами, представляют интерес, поскольку такие лазерные пучки объединяют полезные свойства лаггер-гауссовых и эрмит-гауссовых пучков в более общий класс, в котором эллиптичность используется в качестве дополнительного параметра в эллиптических координатах [1, 2]. Возможности IG-пучков были продемонстрированы в приложениях по оптическому манипулированию микрочастицами [3], формированию разнообразных оптических вортексов, оптическому захвату и в оптических пинцетах [4]. IG-пучки имеют эллиптическое распределение интенсивности в сочетании с множеством фазовых сингулярностей, согласованных относительно общей оси, что может указывать на их перспективность для исследований пространственного поведения фазовых сингулярностей [5, 6].

Для генерации IG-пучков широко используются пространственные модуляторы света (ПМС) [7]. Реализация лазерных мод «по требованию» была осуществлена «цифровым» лазером с фазовым ПМС с электронной адресацией, который использовался в качестве внутри-резонаторного голографического зеркала с цифровой адресацией [8]. Генерировались такие лазерные моды, как лаггер-гауссовы и эрмит-гауссовы моды, а также пучки с плоским распределением интенсивности и пучки

Эйри. Однако выходная мощность лазера составляла только 12.5 мВт при поглощенной мощности накачки 23.5 Вт и оптической эффективности менее 0.1%. Низкий порог разрушения ПМС, изготовленного на основе жидких кристаллов, ограничивает мощность лазерного излучения, в том числе реализацию импульсного режима. Кроме того, низкое пространственное разрешение ПМС не может полностью удовлетворить требованиям, необходимым для получения желаемых лазерных мод.

В то же время, IG-пучки были получены в твердотельных лазерах с диодной накачкой за счет нарушения симметрии резонатора [9, 10]. Однако эти лазеры работали в непрерывном режиме, их выходная мощность и эффективность были низкими из-за рассогласования резонатора. Импульсные лазеры IG-мод с высокой пиковой мощностью и высокой частотой следования подходят для манипулирования микрочастицами, повышения разрешения оптического захвата и производительности квантовых вычислений. При использовании наклонного пучка накачки был продемонстрирован микрочип-лазер на Cr, Nd:YAG IG-мод более высокого порядка с самомодуляцией добротности, наносекундной шириной импульса и пиковой мощностью более 1 кВт [11]. Посредством подстройки диаметра пучка накачки в активной среде в таких микрочип-лазерах получены выходные пучки со сложными поперечными профилями [12]. Формирование IG-мод и эффективность Cr, Nd:YAG-лазера сильно зависят от интенсивности накачки, определяемой мощностью и площадью пучка накачки. Таким образом, исследование влияния интенсивности накачки на эффективность микрочип-лазера на Cr, Nd:YAG с самомодуляцией добротности, генерирующего IG-моду, представляет несомненный интерес.

В настоящей работе сообщается о реализации высокоэффективного микрочип-лазера на Cr, Nd:YAG с само-

\* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

дуляцией добротности, генерирующего IG-моду при жестко сфокусированной накачке лазерным диодом, и приводятся его характеристики.

## 2. Эксперимент

На рис.1 показана принципиальная схема микрочип-лазера IG-мод на Cr,Nd:YAG с самомодуляцией добротности и двухпроходной торцевой диодной накачкой, обеспечивающей заданное распределение мощности в Cr,Nd:YAG-кристалле. В качестве активной среды лазера использовался кристалл Cr,Nd:YAG толщиной 1.8 мм, выращенный вдоль направления [111]. Концентрации ионов Cr и Nd составляли 0.01 и 1 ат. % соответственно. Начальный коэффициент пропускания кристалла равен 94%. На одну поверхность кристалла наносились просветляющее покрытие на  $\lambda = 808$  нм и высокоотражающее покрытие на  $\lambda = 1064$  нм (последнее работало в качестве глухого зеркала резонатора), а на другую поверхность – просветляющее покрытие на  $\lambda = 1064$  нм и высокоотражающее покрытие на  $\lambda = 808$  нм с тем, чтобы ослабить внутрирезонаторные потери и увеличить эффективность поглощения мощности накачки. Выходным элементом связи служило плоское зеркало с коэффициентом отражения 90% на  $\lambda = 1064$  нм. В качестве источника накачки использовался лазерный диод с длиной волны 808 нм и волоконным выходом (диаметр сердцевины 400 мкм, числовая апертура 0.22). Коллимация и фокусировка пучка накачки на кристалл Cr,Nd:YAG осуществлялась двумя линзами с фокусными расстояниями  $f_1 = 8$  мм и  $f_2 = 11$  мм. Диаметр падающего на кристалл пучка накачки составлял 160 мкм. При той же мощности падающего излучения накачки, что и в [11], интенсивность накачки была в 1.6 раза больше.

Пучок накачки отклонялся на  $3^\circ$  от направления генерации лазера (см. рис.1,а). Распределение мощности накачки внутри кристалла Cr,Nd:YAG было эллиптическим (шире вдоль оси  $x$ ). Эллиптическое распределение инверсии населенности внутри кристалла Cr,Nd:YAG нарушало симметрию резонатора микрочип-лазера, а нелинейное поглощение насыщающегося поглотителя  $Cr^{4+}$  усиливало асимметричное распределение насыщенной инверсии населенностей, поэтому в микрочип-лазере при отклоненном пучке накачки вынужденно генерировались IG-моды. Характеристики выходного лазерного импульса регистрировались InGaAs-фотодиодом и высокока-

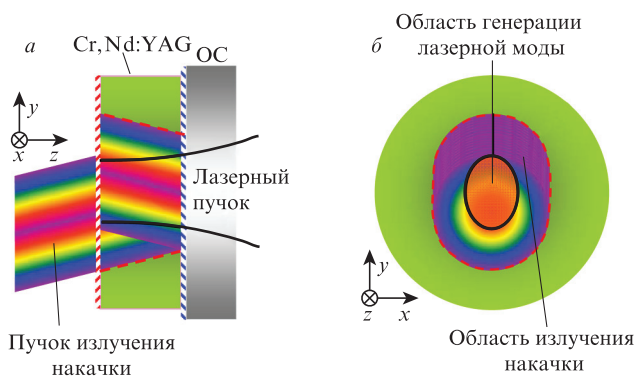


Рис.1. Схема микрочип-лазера на Cr,Nd:YAG IG-мод с самомодуляцией добротности (а), а также поперечное сечение распределения мощности накачки и область возможной генерации лазерной моды (б); ОС – элемент выходной связи.

стотным осциллографом (с полосой 6 ГГц). Спектры излучения лазера контролировались с помощью анализатора оптических спектров MS9740A (Anritus). Поперечное распределение интенсивности лазерного пучка контролировалось и регистрировалось с помощью CCD-измерителя профиля пучка BC106-VIS (Thorlabs).

## 3. Результаты и их обсуждение

Для генерации IG-моды в микрочип-лазере использовался жестко сфокусированный пучок накачки лазерного диода, отклоненный от направления лазерной генерации. Лазерный пучок был хорошо согласован с пучком накачки, поскольку микрочип-лазер на Cr,Nd:YAG с торцевой накачкой имел резонатор Фабри–Перо. Высокая интенсивность излучения накачки достигалась в эксперименте при использовании пучка накачки диаметром 160 мкм (в отличие от работы [11], где диаметр пучка накачки был 200 мкм). В используемом Cr,Nd:YAG-кристалле один ион  $Cr^{4+}$  окружен тремя тысячами ионов  $Nd^{3+}$ , поэтому нелинейное поглощение ионов  $Cr^{4+}$  играет важную роль в генерации IG-моды при высокой интенсивности накачки.

При падении гауссова пучка накачки на кристалл Cr,Nd:YAG с  $3^\circ$ -ным отклонением от направления генерации лазера распределение интенсивности излучения двухпроходной диодной накачки внутри кристалла Cr,Nd:YAG становится эллиптическим (рис.1,б). При этом не вся накачиваемая область имеет достаточное усиление, чтобы превзойти потери резонатора для лазерной генерации. Область возможной генерации лазерной IG-моды сильно зависит от падающей мощности накачки (рис.2). Если мощность накачки мала, лазер генерирует в небольшой эллиптической области лазерной моды в центре области накачки (рис.2,а); поглощенная мощность накачки  $P_{abs} = 1$  Вт. С ростом мощности накачки эллиптическая область лазерной моды асимметрично увеличивается в пределах области накачки, причем интенсивность накачки вдоль оси  $x$  растет быстрее, чем вдоль оси  $y$  (рис.2,б;  $P_{abs} = 3$  Вт). При  $P_{abs} = 6$  Вт область лазерной моды стремится стать круговой (рис.2,в).

При  $P_{abs} = 0.8$  Вт микрочип-лазер на Cr,Nd:YAG начинал генерировать IG-моды. При наклонной диодной накачке генерация IG-мод сильно зависит от распределения инверсии населенности. При подстройке падающей мощности накачки на кристалл Cr,Nd:YAG были получены различные нечетные ( $IG_{p,m}^o$ ) и четные ( $IG_{p,m}^c$ ) моды. Все пучки IG-мод, генерируемые в микрочип-лазере на Cr,Nd:YAG, демонстрируют поперечные распределения с точечной симметрией. На рис.3 приведено типичное по-

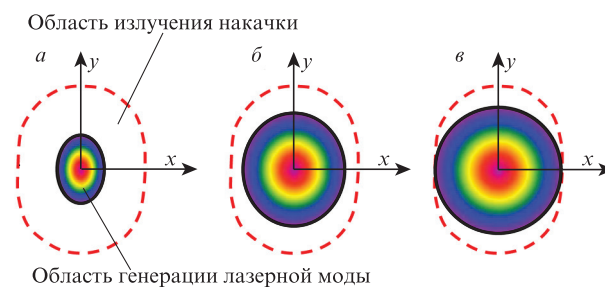


Рис.2. Изменение области возможной генерации лазерной моды в зависимости от поглощенной мощности накачки:  $P_{abs} = 1$  (а), 3 (б) и 6 Вт (в).

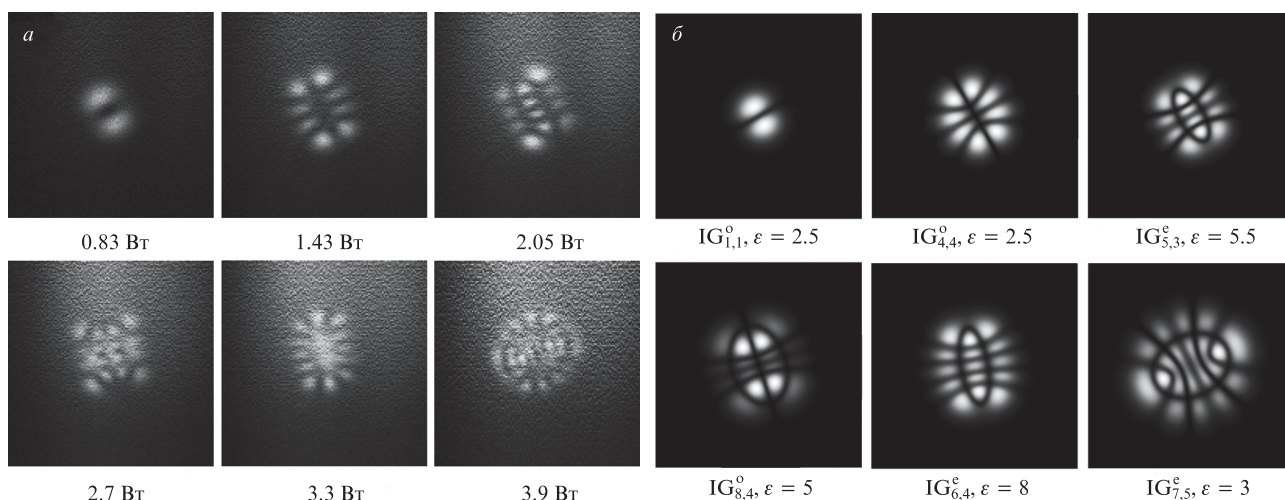


Рис.3. Экспериментально полученные одиночные IG-моды, генерируемые в микрочип-лазере при различных мощностях накачки  $P_{abs}$  (а), и результаты соответствующего теоретического моделирования (б);  $\epsilon$  – параметр эллиптичности.

перечное распределение поля IG-моды, наблюдавшееся экспериментально в микрочип-лазере на Cr,Nd:YAG с самомодуляцией добротности при  $P_{abs} < 4$  Вт, а также представлены результаты численного моделирования. Показано, что при медленном постепенном увеличении падающей на Cr,Nd:YAG-кристалл мощности накачки происходит внезапный и резкий переход от генерации одной IG-моды к генерации другой. В зависимости от использованной мощности накачки наблюдалась генерация нечетной или четной IG-моды. Устойчивая генерация нечетной  $IG_{1,1}^0$ -моды наблюдалась при  $P_{abs} = 0.83$  Вт. При мощности накачки чуть выше порога генерации лазерная мода генерируется в небольшой области пучка накачки, где инверсия населенности превышает потери резонатора Cr,Nd:YAG-лазера, причем область лазерной

моды является эллиптической, что определяется наклонным пучком накачки. Поскольку область лазерной моды при росте поглощенной мощности накачки расширяется быстрее вдоль оси  $x$ , эллиптичность лазерной моды уменьшается. Число гиперболических узловых линий  $m$  и число эллиптических узловых линий  $(p - m)/2$  увеличиваются с ростом  $P_{abs}$ . При  $P_{abs} < 4$  Вт были получены как устойчивые нечетные IG-моды высокого порядка ( $IG_{4,4}^0$  и  $IG_{8,4}^0$ ), так и четные IG-моды ( $IG_{5,3}^\epsilon$ ,  $IG_{6,4}^\epsilon$  и  $IG_{7,5}^\epsilon$ ).

При  $P_{abs} > 4$  Вт возбуждается вторая IG-мода, поскольку усиление на краях области накачки становится достаточным для превышения порога ее генерации. Между тем, две IG-моды конкурируют друг с другом, в связи с этим, а также из-за насыщения усиления при высокой мощности накачки распределение инверсии населен-

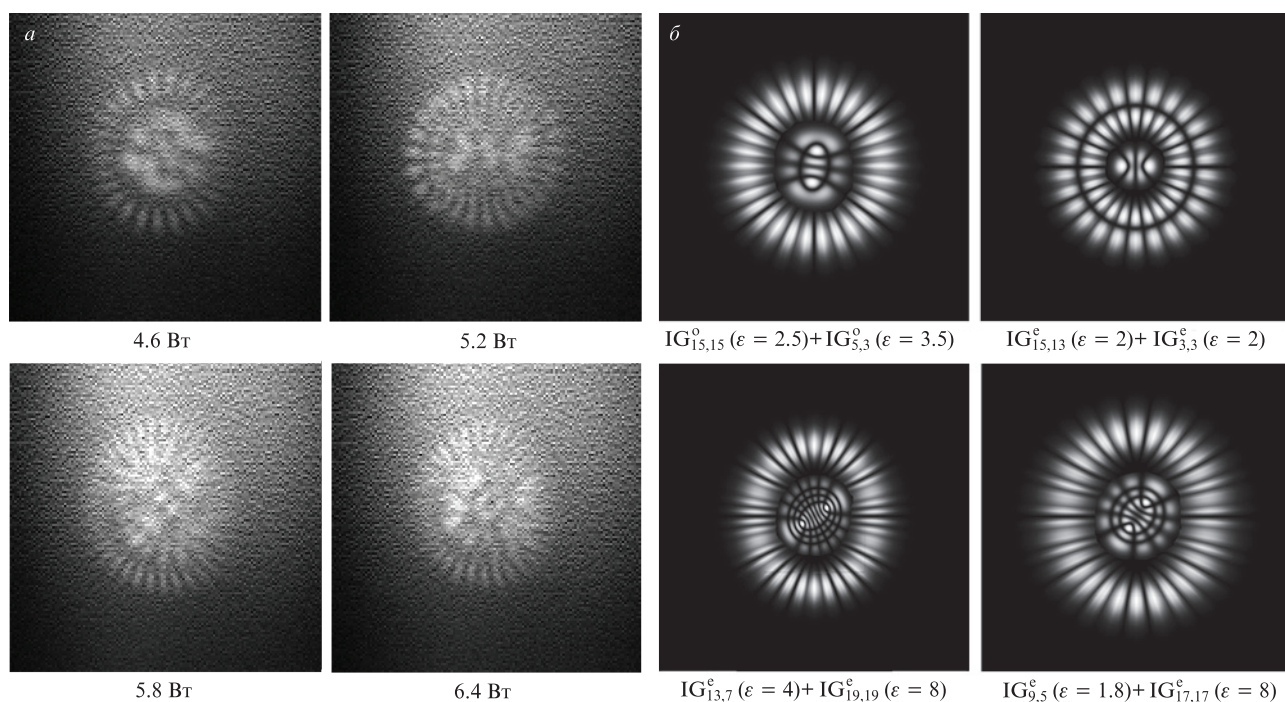


Рис.4. Экспериментально полученные два набора IG-мод, генерируемых в микрочип-лазере при различных мощностях накачки  $P_{abs}$  (а), и результаты соответствующего теоретического моделирования (б).

ности расширяется на периферию области накачки, и лазерная мода становится круговой. При этом интенсивности двух лазерных IG-мод поддерживаются примерно одинаковыми. На рис.4 показаны два типичных набора IG-мод, одновременно генерируемых в микрочип-лазере на Cr, Nd:YAG при  $P_{abs} > 4$  Вт, а также результаты соответствующего численного моделирования. При поглощенной мощности 4.6 Вт одновременно генерируются две нечетные моды  $IG_{15,15}^o$  и  $IG_{3,3}^o$ . Две четные моды  $IG_{15,13}^e$  и  $IG_{3,3}^e$  одновременно генерируются при  $P_{abs} = 5.2$  Вт. С увеличением  $P_{abs}$  до 5.8 Вт их заменяют четные моды  $IG_{13,7}^e$  и  $IG_{19,19}^e$ . Распределения IG-мод искажаются вследствие теплового эффекта, возникающего при высоких уровнях мощности накачки. При  $P_{abs} = 6.4$  Вт две четные IG-моды заменяются на моды  $IG_{5,5}^o$  и  $IG_{17,17}^e$ . Смена четных IG-мод с ростом поглощенной мощности накачки вызвана изменением ее распределения, а также распределения усиления внутри резонатора. Изменение двух четных IG-мод с изменением  $P_{abs}$  четко показывает наличие сильной конкуренции в усилении между этими IG-модами в микрочип-лазере на Cr, Nd:YAG.

Изменение средней выходной мощности и оптической эффективности микрочип-лазера в зависимости от  $P_{abs}$  показано на рис.5. Как видно из рисунка, средняя выходная мощность растет линейно с увеличением поглощенной мощности накачки, причем существуют две области изменения средней выходной мощности. При  $P_{abs} < 4$  Вт дифференциальная эффективность составляет 45%, при больших мощностях она падает до 29%. Максимальная средняя выходная мощность равна 2.01 Вт при  $P_{abs} = 6.4$  Вт и оптической эффективности 31.3%. Средняя выходная мощность не уменьшалась во всей области изменения мощности накачки, что позволяет масштабировать ее на большие значения. Максимальная оптическая эффективность 33.2% достигнута при  $P_{abs} = 3.9$  Вт, что примерно в 1.33 раза выше эффективности, полученной при диаметре пучка накачки 200 мкм [11]. При  $P_{abs} > 4$  Вт оптическая эффективность немного уменьшается, а затем становится постоянной, не зависящей от мощности накачки. Одна из причин снижения эффективности – конкуренция двух лазерных IG-мод по усилению, обеспечиваемому накачкой. Вторым фактором, способным повлиять на оптическую эффективность при мощности накачки больше 4 Вт, является тепловой эффект. Хотя тепловая нагрузка кристалла Cr, Nd:YAG снижает эффективность

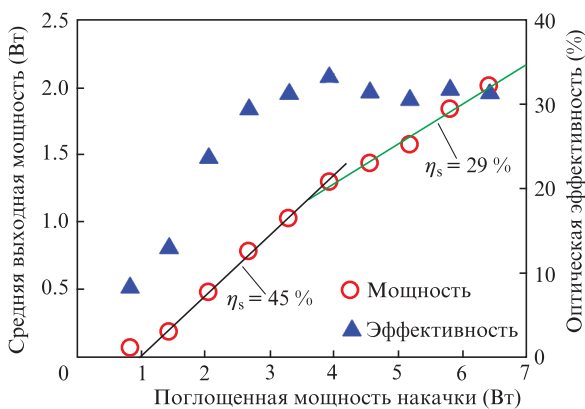


Рис.5. Средняя выходная мощность и эффективность по свету  $\eta_s$  микрочип-лазера IG-мод в зависимости от поглощенной мощности накачки.

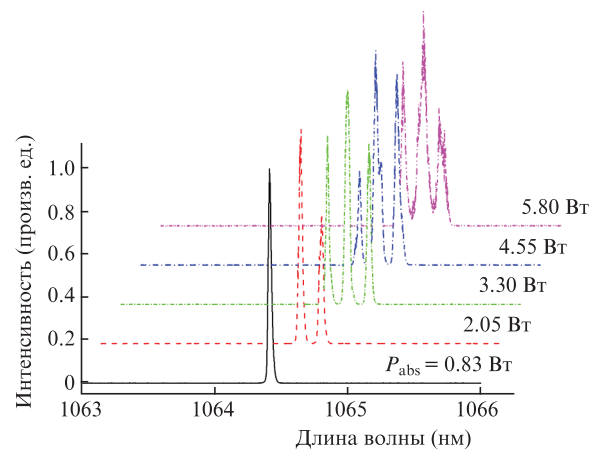


Рис.6. Эволюция спектров излучения микрочип-лазера IG-мод при изменении мощности накачки  $P_{abs}$ .

лазера при высоких (свыше 4 Вт) уровнях накачки, при жестко сфокусированной накачке оптическая эффективность лазера остается более 30% (см. рис.5). Таким образом, эффективная работа микрочип-лазера на Cr, Nd:YAG показывает, что такой лазер при жестко сфокусированной диодной накачкой даже без охлаждения активной среды является стабильным лазерным источником IG-мод, работающим при комнатной температуре.

На рис.6 показано поведение спектров излучения микрочип-лазера при различных уровнях накачки. При  $P_{abs} < 1.8$  Вт лазер генерировал на одной продольной моде. Хотя полоса испускания ионов  $Nd^{3+}$  в кристалле Cr, Nd:YAG составляет около 1 нм [13], при высоких уровнях мощности накачки микрочип-лазер генерировал на многих продольных модах, поскольку толщина кристалла Cr, Nd:YAG была 1.8 мм. При  $P_{abs} > 1.8$  Вт преобладала генерация на многих продольных модах. Так, в диапазоне поглощенной мощности от 2 до 3 Вт лазер генерировал на двух продольных модах, а при  $P_{abs} > 3$  Вт генерация происходила на трех продольных модах. Интервал между продольными модами микрочип-лазера на Cr, Nd:YAG с диодной накачкой равен 0.16 нм, что определяется областью свободной дисперсии между резонансными модами (0.163 нм) резонатора, заполненного активной средой:  $\Delta\lambda_c = \lambda^2/(2L_c)$  [14], где  $L_c$  – оптическая длина резонатора и  $\lambda$  – длина волны. Спектр испускания уширяется и смещается в длинноволновую сторону с ростом температуры кристалла, которая повышается с увеличением мощности накачки. Так же ведет себя и длина волны генерации лазера.

Частота следования импульсов микрочип-лазера на Cr, Nd:YAG с самомодулирующей добротности увеличивается почти линейно с ростом поглощенной мощности накачки. Наибольшая частота повторения составила 335 кГц. Частота повторения импульсов лазеров с пассивной модуляцией добротности пропорциональна инверсии населенностей, которая в свою очередь пропорциональна интенсивности накачки. Поэтому наиболее высокая частота следования импульсов была достигнута при использовании меньшего диаметра пучка накачки. Длительность импульса микрочип-лазера с самомодулирующей добротности составляла около 3.5 нс при всех значениях  $P_{abs}$ . Малая длительность импульса может быть обусловлена высоким усилением, достигаемым при высокой интенсивности накачки, позволяющей приблизиться к пределу дли-

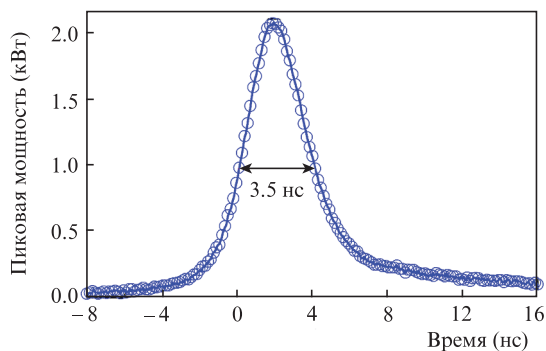


Рис. 7. Типичный профиль импульса длительностью 3.5 нс с пиковой мощностью более 2 кВт при поглощенной мощности накачки 2.7 Вт.

тельности импульса в один круговой обход. Хотя энергия импульса, равная 7.5 мкДж, ограничена малым объемом активной среды и высоким начальным пропусканием кристалла Cr, Nd:YAG, достигнутая пиковая мощность сопоставима с мощностью, полученной в [11], благодаря малой длительности импульса генерации. Полученная пиковая мощность составила 2.08 кВт. На рис. 7 показан типичный профиль импульса микрочип-лазера при  $P_{\text{abs}} = 2.7$  Вт, энергии импульса 7.5 мкДж, длительность импульса (FWHM) 3.5 нс и частоте следования импульсов 108 кГц.

#### 4. Заключение

При использовании жестко сфокусированного пучка накачки в микрочип-лазере на кристалле Cr, Nd:YAG с самомодулирующей добротности и диодной накачкой получена высокоэффективная генерация IG-мод с высокой частотой следования и высокой пиковой мощностью. При поглощенной мощности накачки 3.9 Вт наибольшая оптическая эффективность составила 33.2%. При  $P_{\text{abs}} < 4$  Вт получена генерация одиночной IG-моды; при  $P_{\text{abs}} > 4$  Вт генерировались сложные пучки, состоящие из двух IG-мод. Полученная средняя выходная мощность составила

более 2 Вт при  $P_{\text{abs}} = 6.4$  Вт. Частота следования лазерных импульсов зависела от мощности накачки, наивысшая частота следования составила 335 кГц. Импульсные лазеры IG-мод с высокой частотой повторения и высокой пиковой мощностью являются перспективными лазерными источниками для различных приложений, таких как манипуляция микрочастицами и оптический захват.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (гранты № 61475130 и 61275143) и Фондом фундаментальных исследований университета Xiamen (проект 201312G008).

1. Bandres M.A., Gutierrez-Vega J.C. *Opt. Lett.*, **29** (2), 144 (2004).
2. Bandres M.A., Gutierrez-Vega J.C. *J. Opt. Soc. Am. A*, **21** (5), 873 (2004).
3. Woerdemann M., Alpmann C., Denz C. *Appl. Phys. Lett.*, **98** (11), 111101 (2011).
4. Chu S.C., Yang C.S., Otsuka K. *Opt. Express*, **16** (24), 19934 (2008).
5. Woerdemann M., Alpmann C., Esseling M., Denz C. *Laser Photon. Rev.*, **7** (6), 839 (2013).
6. Plick W.N., Krenn M., Fickler R., Ramelow S., Zeilinger A. *Phys. Rev. A*, **87** (3), 033806 (2013).
7. Bentley J.B., Davis J.A., Bandres M.A., Gutierrez-Vega J.C. *Opt. Lett.*, **31** (5), 649 (2006).
8. Ngcobo S., Litvin I., Burger L., Forbes A. *Nature Commun.*, **4** (8), 2289 (2013).
9. Schwarz U.T., Bandres M.A., Gutierrez-Vega J.C. *Opt. Lett.*, **29** (16), 1870 (2004).
10. Ohtomo T., Kamikariya K., Otsuka K., Chu S.C. *Opt. Express*, **15** (17), 10705 (2007).
11. Dong J., Ma J., Ren Y.Y., Xu G.Z., Kaminskii A.A. *Laser Phys. Lett.*, **10** (8), 085803 (2013).
12. Dong J., Ueda K. *Phys. Rev. A*, **73** (5), 053824 (2006).
13. Dong J., Lu J., Ueda K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21** (12), 2130 (2004).
14. Koechner W. *Solid State Laser Engineering* (Berlin: Springer-Verlag, 1999).
15. Dong J., Rapaport A., Bass M., Szpocs F., Ueda K. *Phys. Status Solidi (a)*, **202** (13), 2565 (2005).
16. Rapaport A., Zhao S.Z., Xiao G.H., Howard A., Bass M. *Appl. Opt.*, **41** (33), 7052 (2002).
17. Agnesi A., Pirzio P., Reali G., Piccinno G. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (10), 101120 (2006).