

УДК 535:535.92

ГГц ЧАСТОТА ПОВТОРЕНИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛНОВОДНОМ Nd:YAG ЛАЗЕРЕ

М. В. Понарина¹, А. Г. Охримчук², М. Г. Рыбин¹, П. А. Образцов¹

В работе представлен волноводный Nd:YAG лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод с гигагерцовой частотой повторения импульсов. В качестве насыщающегося поглотителя используется одноатомный слой графена. Трубчатый волновод в активной среде был создан для обеспечения генерации только основной поперечной моды. Благодаря такому подходу была получена стабильная генерация импульсов с длительностью < 20 пс и частотой повторения 9.8 ГГц.

Ключевые слова: волноводные лазеры, ультракороткие импульсы, гигагерцовая частота повторения импульсов, Nd:YAG, синхронизация мод, графен.

Введение. В современных телекоммуникационных системах широко используются лазерные источники с частотой повторения более 1 ГГц. Существуют различные подходы к созданию высокостабильных генераторов, основанных как на использовании твердотельных или волоконных лазеров, работающих в режиме синхронизации мод, так и на использовании полупроводниковых волноводных или поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL) [1]. Однако одной из самых простых и компактных систем является лазер, резонатор которого состоит из двух плоскопараллельных зеркал, частично или полностью заполненный активной средой.

Одним из главных условий получения стабильной синхронизации мод является работа лазера в режиме основной поперечной моды (TEM:00). Использование волноводной геометрии внутри кристалла обеспечивает эффективное заведение и равномерное распространение оптического излучения накачки по всей длине активного элемента. Малые размеры волноводов, соответствующие диаметру моды TEM:00, позволяют осуществлять стабильную генерацию в одномодовом режиме.

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ponarinamariya@gmail.com.

² НЦВО РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

Для работы лазера в режиме пассивной синхронизации мод используются такие насыщающиеся поглотители, как полупроводниковые структуры SESAM [2], углеродные нанотрубки [3] и графен [4]. Графен имеет ряд преимуществ по сравнению с другими насыщающимися поглотителями: малая толщина, сверхбыстрые времена релаксации (< 10 пс), одинаковое пропускание в диапазоне от УФ до ИК, возможность нанесения непосредственно на активный элемент или зеркало резонатора.

Таким образом, целью работы является осуществление стабильного режима пассивной синхронизации мод с гигагерцовой частотой повторения импульсов в компактном волноводном Nd:YAG лазере с помощью насыщающегося поглотителя на основе графена.

Экспериментальная часть. В работе представлен твердотельный волноводный Nd:YAG лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод на основе графена (рис. 1).

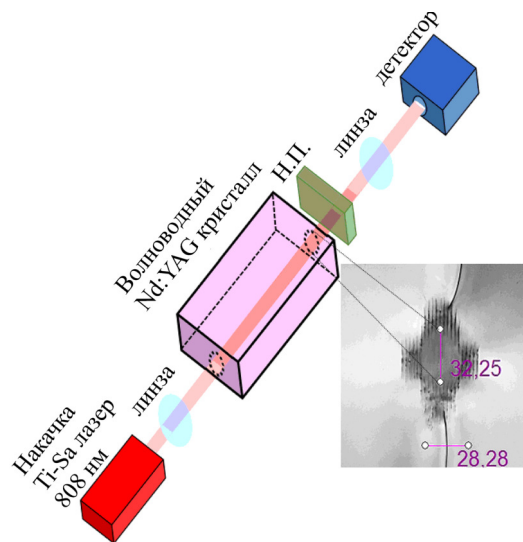


Рис. 1: Экспериментальная схема волноводного Nd:YAG лазера.

В данной схеме для накачки активного элемента используется излучение непрерывного Ti:Sa лазера с центральной длиной волны 808 нм и средней мощностью 600 мВт. Излучение накачки фокусируется в цилиндрическую волноводную структуру с диаметром сердцевины 30 мкм, созданную внутри кристалла Nd:YAG за счет изменения показателя преломления под действием фемтосекундных импульсов [5]. Резонатор (8.4 мм) образуют два плоскопараллельных зеркала: дихроичное зеркало, глухое в диапазоне длин волн ~ 1064 нм и пропускающее излучение накачки, оно нанесено на входной торце

кристалла, и выходное зеркало с коэффициентом отражения 98%. Элементом, обеспечивающим пассивную синхронизацию мод, является насыщающийся поглотитель (Н.П.) на основе графена, нанесенный непосредственно на выходное зеркало резонатора. Для изготовления насыщающегося поглотителя, одноатомный слой углерода – графен [6] был синтезирован методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на медную фольгу с последующим травлением и осаждением на зеркало [7].

За счет данной конструкции резонатора между торцом кристалла и выходным зеркалом образуется воздушный интерферометр, который вносит модуляцию пропускания излучения в зависимости от его базы. Для прецизионного контроля воздушного зазора с шагом 0.04 мкм выходное зеркало оснащено пьезоэлектрическим элементом. Используя формулу (1), где r_1 – коэффициент отражения грани кристалла, r_2 – коэффициент отражения выходного зеркала, Δ – расстояние между зеркалами интерферометра, было рассчитано пропускание интерферометра (T) в зависимости от длины волны излучения (λ) (рис. 2).

$$T(\lambda) = \frac{(1 - r_1)(1 - r_2)}{[1 - (r_1 r_2)^{1/2}]^2 + 4(r_1 r_2)^{1/2} \left(\sin \left(\frac{\pi \Delta}{\lambda} \right) \right)^2}. \quad (1)$$

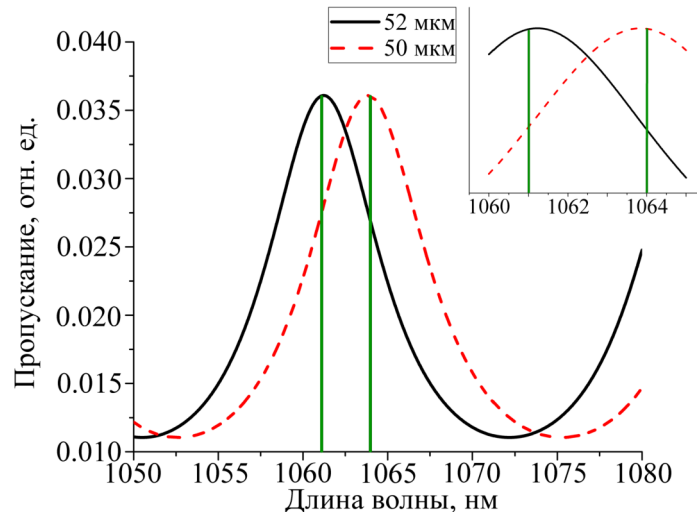


Рис. 2: Пропускание интерферометра с расстоянием между зеркалами 50 и 52 мкм.

Данные зависимости являются периодическими и показывают, что максимум пропускания интерферометра на длине волны 1061 нм наблюдается при ширине зазора 52 мкм, а на длине волны 1064 нм – при 50 мкм. В зависимости от пропускания изменяется добротность резонатора для генерации на различных длинах волн. Вследствие

этого при изменении расстояния между зеркалами интерферометра возможно получение генерации лазера на одной или на двух длинах волн.

Помимо этого, интерферометр является дисперсионным элементом. Для получения режима синхронизации мод на одной длине волны отрицательная дисперсия групповой скорости β , вносимая интерферометром, должна немного преобладать над материальной дисперсией кристалла Nd:YAG, как продемонстрировано в статье [8].

Результаты. На рис. 3 представлены выходные характеристики волноводного Nd:YAG лазера. Одновременная генерация на двух длинах волн приводит к возникновению дополнительных линий в радиочастотном спектре выходного излучения, что проявляется в возникновении амплитудной модуляции временной развертки выходных импульсов. Данная модуляция не позволяет говорить о стабильной работе лазера в режиме синхронизации мод.

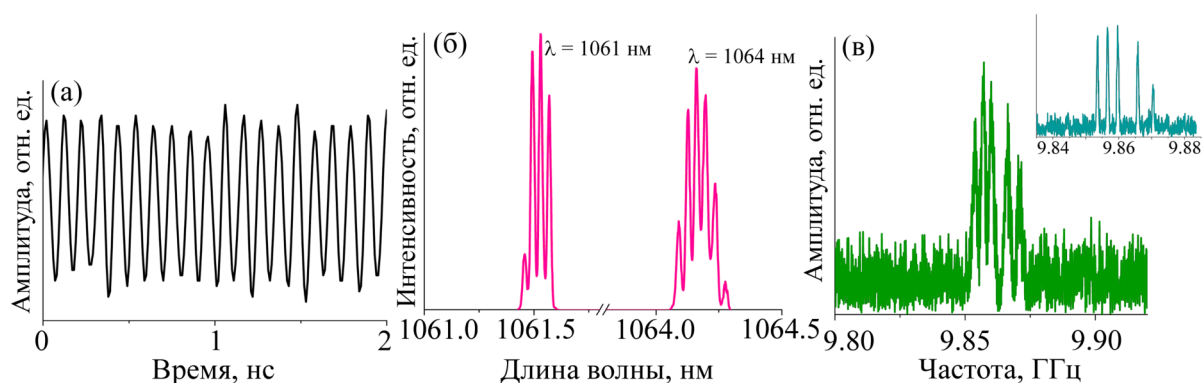


Рис. 3: Временная развертка импульсов лазера (а), оптический (б), радиочастотный спектры (в).

Для получения стабильной частоты повторения импульсов необходимо обеспечить работу лазера в пределах одной полосы усиления. Используемая конструкция резонатора не позволяет получить генерацию в пределах одной полосы исключительно за счет подстройки параметров интерферометра. При подстройке ширины воздушного зазора интерферометра, селектирующего работу лазера в пределах одной полосы, дисперсия, вносимая интерферометром, не преобладает над материальной дисперсией на данной длине волны. Поэтому для выделения излучения на одной длине волны было предложено использовать перестраиваемый оптический волоконный фильтр TOF-1064 с шириной полосы пропускания 1 нм вне резонатора и проводить подстройку резонатора для получения синхронизации мод на одной длине волны. Выходное излучение волновод-

ного лазера заводилось через коллиматор в оптоволокно диаметром 6 мкм, после чего проходило через оптический фильтр. В кристалле Nd:YAG вблизи 1064 нм существует два энергетических перехода между штатковскими подуровнями, соответствующие генерации на длинах волн 1064.18 и 1064.55 нм. Одновременная генерация на длинах волн 1064.18 и 1064.55 нм приводит к неполной синхронизации мод и, как следствие, к возникновению дополнительных линий в радиочастотном спектре. Для отфильтровывания излучения генерации на одной из этих длин волн необходимо использование фильтра с более узкой полосой пропускания (менее 1 нм).

В области длин волн 1061 нм генерация возможна только на одном энергетическом переходе. Благодаря этому при выделении генерации на длине волны 1061 нм была получена стабильная гребенка пикосекундных импульсов с частотой повторения 9.8 ГГц (рис. 4).

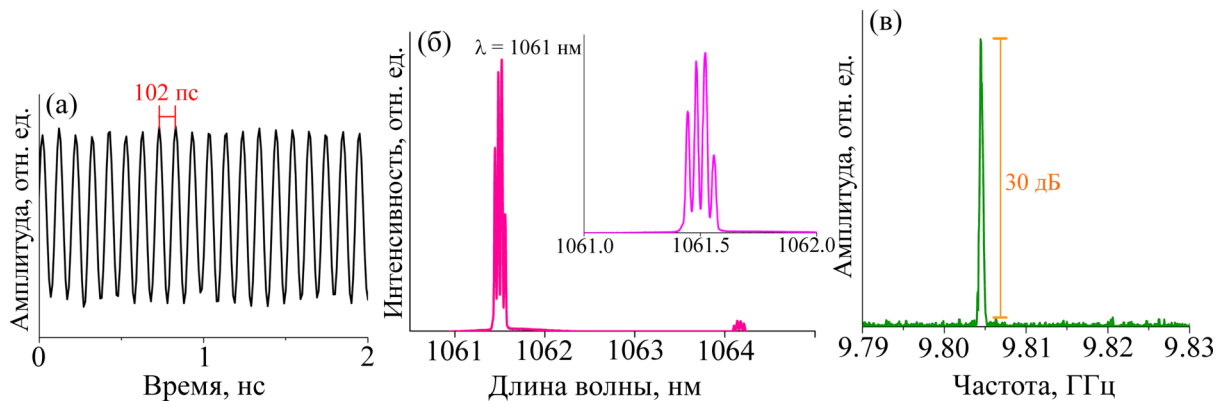


Рис. 4: Временная развертка импульсов с эквидистантным периодом следования 102 пс после прохождения оптического фильтра (а), оптический (б) и радиочастотный спектры (в).

Заключение. На основе волновода, записанного пучком фемтосекундного лазера в кристалле Nd:YAG, и однослойного графена, реализован твердотельный лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод, с гигагерцовой частотой повторения. При изменении длины резонатора помимо генерации на основной длине волны 1064 нм наблюдается генерация на дополнительной длине волны 1061 нм. Одновременная генерация на двух длинах волн препятствует достижению стабильной работы лазера в режиме пассивной синхронизации мод. Для стабилизации режима работы лазера было предложено использование при подстройке резонатора узкополосного спектрального фильтра, обеспечивающего выделение излучения на одной из длин волн. На длине вол-

ны 1061 нм была получена стабильная гребенка пикосекундных импульсов с частотой повторения импульсов 9.8 ГГц. Таким образом, продемонстрирована применимость разработанного лазера в качестве сверхвысокочастотного задающего генератора для волоконно-оптических систем.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 17-72-10303.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Martinez and S. Yamashita, *Appl. Phys. Lett.* **101**(4), 2012 (2012).
- [2] A. S. Mayer et al., *Nat. Commun.* **8**(1), 1673 (2017).
- [3] S. Y. Choi et al., *Opt. Express* **26**(5), 5140 (2018).
- [4] P. A. Obraztsov et al., *Laser Phys.* **26**(8), 084008-1 (2016).
- [5] A. Okhrimchuk et al., *Opt. Express* **20**(4), 3832 (2012).
- [6] P. A. Obraztsov et al., *Nano Lett.* **11**(4), 1540 (2011).
- [7] M. G. Rybin et al., *Appl. Phys. Lett.* **112**(3), 2 (2018).
- [8] A. G. Okhrimchuk and P. A. Obraztsov, *Sci. Rep.* **5**, 11172 (2015).

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г.

После доработки 14 марта 2019 г.

Принята к публикации 15 марта 2019 г.

Публикуется по результатам XVI Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции по оптике и лазерной физике (Самара).