

Двухволновая генерация пикосекундных импульсов с частотой следования 9.8 ГГц в волноводном Nd:YAG-лазере с графеном

М.В.Понарина, А.Г.Охримчук, М.Г.Рыбин, М.П.Смаев, Е.Д.Образцова, А.В.Смирнов, И.В.Жлуктова, В.А.Камынин, Т.В.Долматов, В.В.Букин, П.А.Образцов

Продemonстрирован новый твердотельный волноводный лазер, генерирующий пикосекундные импульсы с гигагерцевой частотой следования, действие которого основано на использовании графена в качестве насыщающегося поглотителя. Генерация лазера на основной поперечной моде обеспечивается геометрией цилиндрического волновода, сформированного в объеме активного кристалла методом прямой записи пучком фемтосекундного лазера. Точная настройка внутрирезонаторного интерферометра, образующегося между активной средой и выходным зеркалом, позволяет контролировать спектрально-временные параметры выходного излучения и плавно перестраивать частоту следования импульсов длительностью менее 20 пс. В частности, продемонстрирована возможность двухволновой генерации в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод с использованием одного насыщающегося поглотителя на основе графена. При усилении выходного излучения лазера в иттербиевом волоконном усилителе получена средняя выходная мощность 530 мВт.

Ключевые слова: волноводные лазеры, ультракороткие импульсы, гигагерцевая частота следования импульсов, Nd:YAG, синхронизация мод, графен, прямая лазерная запись.

1. Введение

В связи с высокими темпами развития технологий и информационного общества с каждым годом возрастает потребность в быстрой передаче больших объемов информации. Одним из возможных путей увеличения скорости передачи информации является использование лазерных источников с частотой следования импульсов более 1 ГГц, оптический спектр излучения которых представляет собой набор эквидистантных линий [1].

Существуют различные подходы к созданию высокостабильных излучателей лазерных импульсов, основанные на использовании как объемных твердотельных или полупроводниковых лазеров с коротким (микро) резонатором, так и волоконных лазеров, работающих в режиме фундаментальной или гармонической синхронизации мод [2, 3]. Под гармонической синхронизацией мод понимается режим работы лазера, при котором в резонаторе одновременно существуют несколько импульсов с равными временными интервалами [4]. Однако одной из самых простых и компактных систем является лазер, резонатор которого состоит из двух плоскопараллельных зеркал, частично или полностью заполненный активной средой

(стекло или кристалл, легированные редкоземельными ионами).

Одно из главных условий получения стабильной синхронизации мод – работа лазера в режиме основной поперечной моды (TEM₀₀). Получение одномодового режима часто осложняется появлением термоэффектов в кристаллах, влияние которых усиливается с ростом интенсивности накачки. К примеру, при мощной накачке показатель преломления в кристалле распределяется неоднородно, что приводит к генерации на нескольких поперечных модах [5]. Для устранения подобных эффектов в настоящей работе предложено использовать волноводную структуру, созданную внутри активного кристалла. Использование волноводной геометрии обеспечивает эффективный ввод и равномерное распространение (без расходимости) оптического излучения накачки по всей длине активного элемента. Малые размеры цилиндрических волноводов, соответствующие диаметру моды TEM₀₀, позволяют осуществлять генерацию в одномодовом режиме.

Для работы лазера в режиме пассивной синхронизации мод традиционно используются такие насыщающиеся поглотители, как полупроводниковые структуры SESAM [6, 7], а в последние годы также углеродные нанотрубки [8, 9] и графен [10–12]. По сравнению с другими насыщающимися поглотителями графен имеет ряд преимуществ: малая толщина, сверхбыстрые (менее 5 пс) времена релаксации, постоянный линейный коэффициент пропускания (~2%) в диапазоне от УФ до ИК, возможность нанесения непосредственно на активный элемент или зеркало резонатора [13].

Таким образом, цель настоящей работы – осуществление непрерывного режима пассивной синхронизации мод в компактном волноводном Nd:YAG-лазере с гигагерцевой частотой следования импульсов с помощью насыщающегося поглотителя на основе графена.

М.В.Понарина, М.Г.Рыбин, Е.Д.Образцова, А.В.Смирнов, И.В.Жлуктова, В.А.Камынин, Т.В.Долматов, В.В.Букин, П.А.Образцов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ponarinamariya@gmail.com, p.obraztsov@gmail.com

А.Г.Охримчук. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, Россия, 125047 Москва, Миусская пл., 9

М.П.Смаев. Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, Россия, 125047 Москва, Миусская пл., 9

Поступила в редакцию 27 февраля 2019 г.

2. Экспериментальная часть

Схема твердотельного волноводного Nd:YAG-лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод на основе графена, приведена на рис.1. Для накачки активного элемента использовалось излучение непрерывного Ti:сапфирового лазера с центральной длиной волны 808 нм и средней мощностью 600 мВт. Излучение накачки фокусировалось в волноводную структуру, созданную внутри кристалла Nd (1 ат.%) :YAG методом прямой записи пучком фемтосекундного лазера [14]. Волновод цилиндрического типа с оболочкой, имеющей пониженный показатель преломления, и диаметром сердцевины 30 мкм записан пучком фемтосекундной лазерной системы генератор–регенеративный усилитель, излучающей импульсы длительностью 180 фс на длине волны 1030 нм. Лазерный пучок фокусировался в объеме кристалла Nd:YAG на глубине около 200 мкм объективом с числовой апертурой $NA = 0.65$ и цилиндрической линзой с фокусным расстоянием $f = -400$ мм, помещенной непосредственно перед объективом по ходу пучка. Таким образом, после объектива создавался астигматичный пучок с двумя эллиптическими в поперечном сечении пучка перетяжками и соотношением большой и малой осей эллипса около 10. Образец помещался на прецизионный подвижный трехкоординатный стол (Aerotech) и сканировался относительно перетяжки пучка, в результате чего в образце оставался след (трек) показателя преломления, уменьшенного на

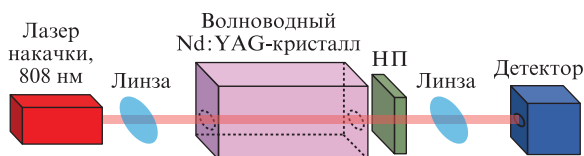


Рис.1. Экспериментальная схема волноводного Nd:YAG-лазера.

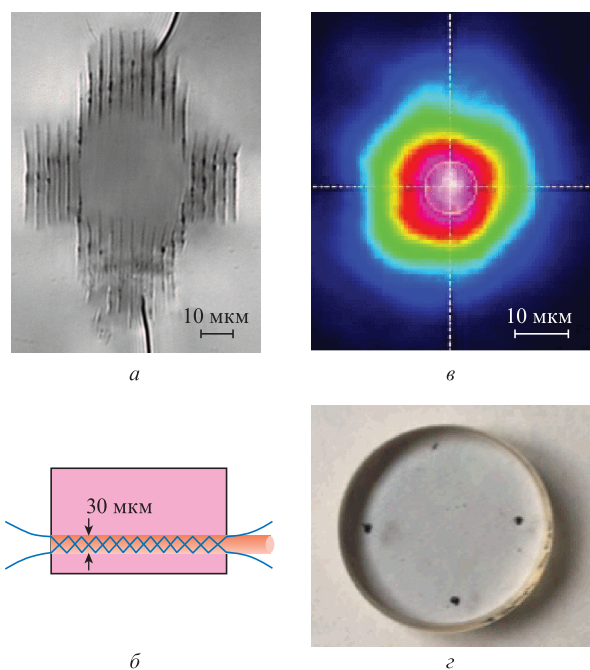


Рис.2. Микрофотография волновода (а), схема распространения излучения накачки внутри него (б), профиль пучка, демонстрирующий модовый состав излучения в волноводе (в), и фотография выходного зеркала резонатора с нанесенным графеном (г).

величину 5×10^{-3} . Для записи использовалась перетяжка, ближайшая к объективу. Большая ось эллиптической перетяжки была ориентирована вдоль сканирования, т.е. параллельно записываемому треку. Для формирования оболочки волновода было записано 32 параллельных трека, расположенных по образующей цилиндра, при этом сердцевина осталась необлученной.

Плоскопараллельный резонатор Nd:YAG-лазера образован двумя зеркалами: дихроичным зеркалом (глухим в диапазоне 1060–1070 нм и прозрачным на длине волны накачки 808 нм), нанесенным на входной торец кристалла, и выходным зеркалом с коэффициентом отражения 98% на длине волны 1064 нм. Пассивная синхронизация мод обеспечивалась насыщающимся поглотителем (НП) на основе графена, нанесенным непосредственно на выходное зеркало резонатора. Для прецизионного контроля длины резонатора выходное зеркало с графеном оснащалось пьезоэлектрическим элементом.

Для изготовления насыщающегося поглотителя одноатомный слой углерода (графен) [15] был синтезирован методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) на медной фольге с последующим травлением и осаждением на выходное зеркало [16]. Внешний вид выходного зеркала с нанесенным насыщающимся поглотителем на основе графена представлен на рис.2,г.

3. Полученные результаты и их обсуждение

Частота следования импульсов при работе лазера в режиме пассивной синхронизации мод определяется временем двойного обхода резонатора. Таким образом, резонатор длиной ~ 8.4 мм обеспечивает частоту следования импульсов ~ 9.8 ГГц, а его точная подстройка в диапазоне 2 мкм с помощью пьезоэлемента обеспечивает перестройку частоты с точностью до единиц МГц.

На рис.3 представлена типичная осциллограмма выходного излучения, измеренная с помощью фотодиода (ДИЛАЗ ДФДМШ 40-16, полоса пропускания 16 ГГц) и осциллографа (Tektronix DPO 71604С, полоса пропускания 16 ГГц), а также радиочастотный и оптический спектры волноводного Nd:YAG-лазера, измеренные с помощью оптического (ANDO AQ6317В, разрешение 0.01 нм) и радиочастотного (Agilent N9020А, разрешение 2 Гц) анализаторов спектра соответственно. Средняя мощность выходного излучения составила 1 мВт, что обусловлено использованием выходного зеркала резонатора с коэффициентом отражения 98%. В экспериментах для измерения длительности отдельных генерируемых импульсов и дополнительной диагностики получаемой гребенки импульсов в режиме реального времени использовалась электронно-оптическая камера PS-1/S1 с временным разрешением 1 пс [17]. Длительность полученных импульсов составила менее 20 пс. Подробное описание методики измерения длительности импульсов и диагностики выходного излучения приведено в работах [13, 18].

Наблюдаемая на рис.3,а модуляция мощности лазерного излучения приводит к появлению дополнительных линий в радиочастотном спектре выходного излучения (рис.3,б). При этом, как видно из рис.3,в, в оптическом спектре имеются две группы линий с максимумами на 1061.58 и 1064.18 нм, состоящие из отчетливо различающихся продольных мод. Необходимо отметить, что аналогичного вида осциллограммы и спектры излучения наблюдались при различных длинах резонатора, причем

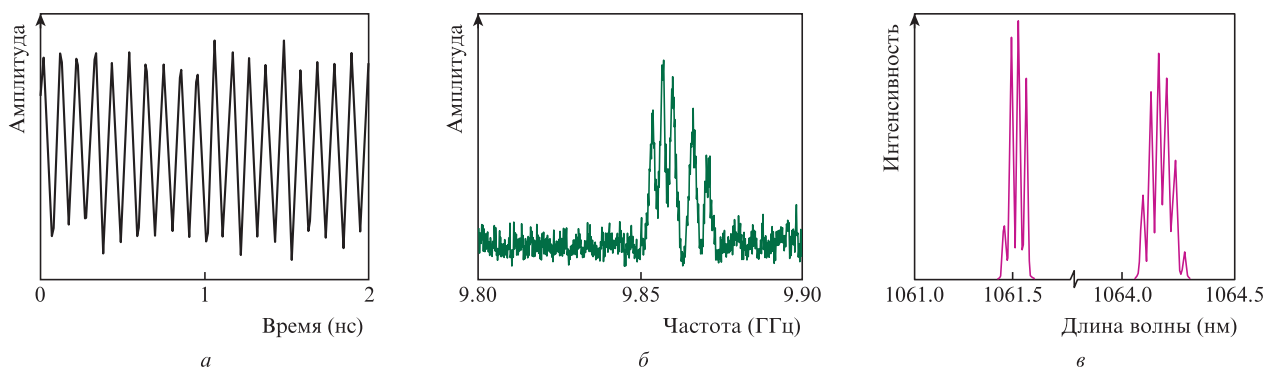


Рис.3. Осциллограмма выходного излучения лазера (а), радиочастотный (б) и оптический (в) спектры.

точная подстройка положения выходного зеркала с помощью пьезоэлемента не позволяла получить одну спектральную составляющую в радиочастотном спектре в окрестности 10 ГГц.

В кристалле Nd:YAG в области 1 мкм существует несколько энергетических переходов, соответствующих длинам волн 1061.58 (9420), 1064.18 (9397) и 1064.55 нм (9394 см⁻¹) [19]. Экспериментально полученный спектр выходного излучения соответствует генерации на переходах с подуровней R₁ и R₂ энергетического уровня ⁴F_{3/2} иона Nd³⁺ на расщепленный уровень ⁴I_{11/2}. Для исследования данных переходов в кристалле Nd:YAG был измерен спектр люминесценции кристалла с помощью спектрометра OceanOptics USB4000 NIR со спектральным разрешением 1 нм (рис.4).

Из рис.4 видно, что интенсивности пиков люминесценции для данных лазерных переходов различны. Сечение перехода R₂ → Y₃ на длине волны 1064.18 нм σ_{1064.18} = 45.8 × 10⁻²⁰ см². Переход на λ = 1061.58 нм (σ_{1061.58} = 22.8 × 10⁻²⁰ см²) имеет общий верхний уровень R₁ с переходом на λ = 1064.55 нм (σ_{1064.55} = 8.1 × 10⁻²⁰ см²) [20]. Для выполнения условия генерации на нескольких лазерных переходах в Nd:YAG-лазере необходимо использовать конструкцию резонатора, обеспечивающую спектральную зависимость внутрирезонаторных потерь. Для синхронизации мод излучения, генерируемого на нескольких переходах, т.е. для обеспечения одинакового периода следования импульсов с различными длинами волн, не-

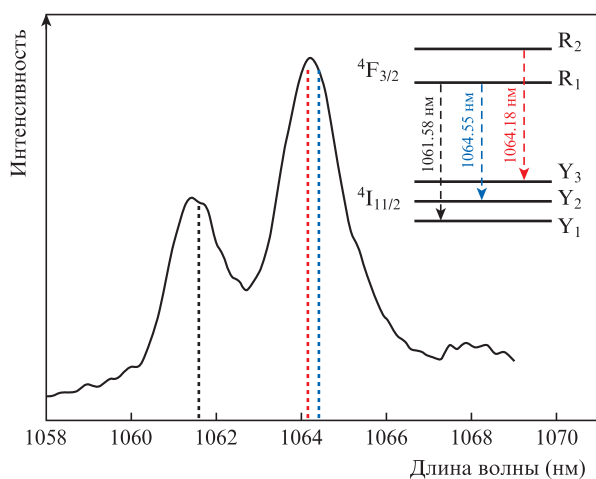


Рис.4. Спектр люминесценции кристалла Nd:YAG и схема энергетических переходов, соответствующих длинам волн 1061.58, 1064.18 и 1064.55 нм.

обходимо, чтобы время полного обхода резонатора было одинаковым.

В использованной нами схеме лазера воздушный зазор, образующийся между непросветленным торцом активного кристалла и выходным зеркалом, представляет собой внутрирезонаторный интерферометр (рис.5). Интерферометр является дисперсионным элементом и вносит временную задержку распространения излучения, зависящую от длины волны. Таким образом, в зависимости от длины интерферометра должно наблюдаться периодическое изменение спектральных и временных характеристик выходного излучения.

Как уже отмечалось, подстройка длины резонатора пьезоэлементом не обеспечивает одинакового периода следования импульсов с различными длинами волн. Поэтому для выделения излучения на одной из линий генерации (1061 или 1064 нм, см. рис.3,в) было предложено установить вне резонатора оптический фильтр, в качестве которого использовался перестраиваемый в диапазоне длин волн 1040–1080 нм фильтр OF-LINK TOF-1064 с шириной полосы пропускания 1 нм и диаметром входного волокна 6 мкм.

На рис.6 приведены осциллограмма, радиочастотный и оптический спектры выходного излучения лазера, отфильтрованного на λ = 1061 нм. Как следует из рисунка, после прохождения оптического фильтра импульсы распространяются с периодом следования ~102 пс, а радиочастотный спектр содержит только одну составляющую. Таким образом, использование внерезонаторного селективного элемента на основе одномодового оптического волокна обусловило получение последовательности ультракоротких импульсов с частотой следования 9.8 ГГц.

Отметим, что данный волноводный Nd:YAG-лазер использовался как задающий генератор для волоконно-

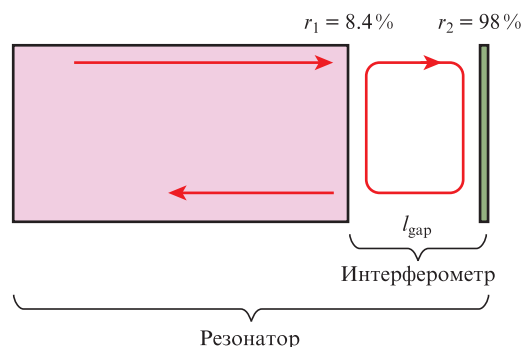


Рис.5. Схема резонатора волноводного Nd:YAG-лазера с воздушным интерферометром.

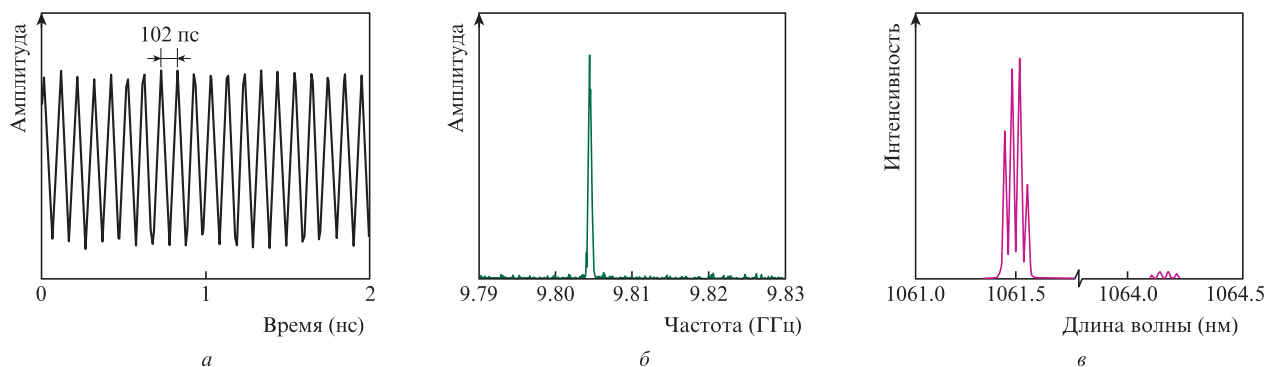


Рис.6. Осциллограмма выходного излучения лазера после прохождения оптического фильтра (а), а также его радиочастотный (б) и оптический (в) спектры.

го Yb-усилителя [21, 22]. Мощность усиленного сигнала составила 530 мВт.

Характеристики излучения, выделенного на длине волны 1064 нм, отличаются от полученных на $\lambda = 1061$ нм. В этом случае радиочастотный спектр интенсивности содержит набор неэквидистантных линий (имеет вид, аналогичный радиочастотному спектру, показанному на рис.3,б), по-видимому, связанных с неполной синхронизацией мод.

Для исследования возможных режимов работы созданного волноводного лазера был проведен расчет параметров внутрирезонаторного интерферометра. Коэффициент отражения интерферометра

$$R = 1 - \frac{(1 - r_1)(1 - r_2)}{(1 - \sqrt{r_1 r_2})^2 + 4\sqrt{r_1 r_2} [\sin(\pi l_{\text{gap}}/\lambda)]^2}, \quad (1)$$

где $r_1 = 8.44\%$ – коэффициент отражения непросветленного торца кристалла Nd:YAG; $r_2 = 98\%$ – коэффициент отражения выходного зеркала; l_{gap} – длина интерферометра.

Зависимость логарифмических потерь $g_{\text{los}} = -\ln R$ от l_{gap} для длин волн 1061 и 1064 нм показана на рис.7,а. Для выполнения условия двухволновой генерации необходимо, чтобы потери, вносимые интерферометром, на длине волны 1064 нм превышали потери на $\lambda = 1061$ нм. Как видно из полученной периодической зависимости $g_{\text{los}}(l_{\text{gap}})$, существуют области, где возможна генерация на двух длинах волн.

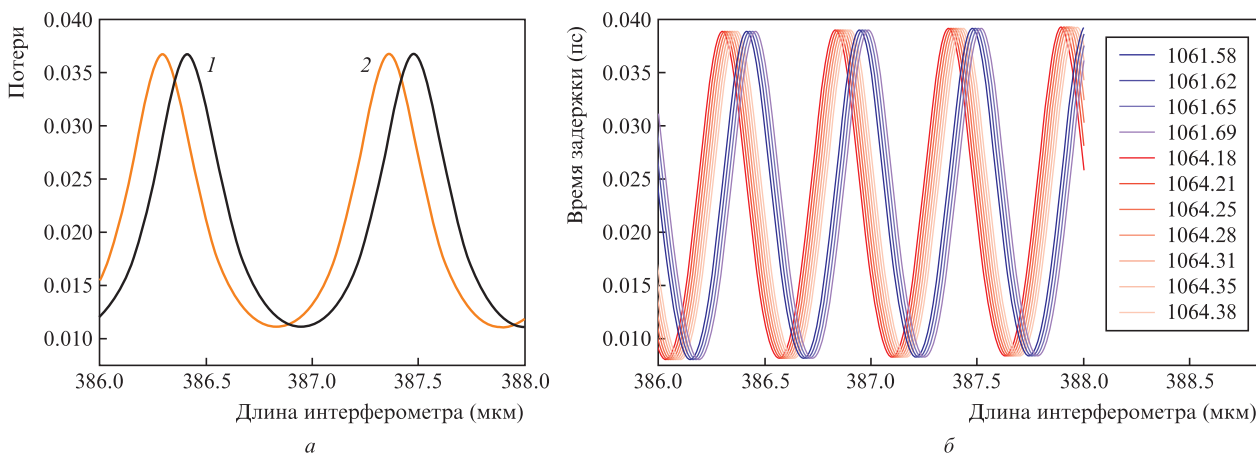


Рис.7. Расчетные зависимости вносимых интерферометром внутрирезонаторных потерь (а) и временной задержки (б) для продольных мод на длинах волн 1061 (1) и 1064 нм (2) от длины интерферометра в диапазоне 386–388 мкм. Цветной вариант рисунка помещен на сайте нашего журнала www.quantum-electron.ru.

Вносимая интерферометром дисперсия групповых скоростей [23]

$$\text{GDD} = 2\pi(2l_{\text{gap}}/c)^2 \frac{(r_1^2 - 1)2r_1 \sin(4\pi l_{\text{gap}}/\lambda)}{[1 - r_1^2 - 2r_1 \cos(4\pi l_{\text{gap}}/\lambda)]^2}. \quad (2)$$

Соответствующая групповая задержка, вносимая интерферометром,

$$\tau = (2l_{\text{gap}}/c) \frac{r_1^2 - 1}{r_1^2 - 1 + 2r_1 \cos(4\pi l_{\text{gap}}/\lambda)}, \quad (3)$$

Периодическая зависимость групповой задержки от длины интерферометра, рассчитанная для различных продольных мод излучения в окрестностях длин волн 1061 и 1064 нм, представлена на рис.7,б.

На основе полученных данных рассчитана зависимость частоты следования импульсов с учетом распределения продольных мод на длинах волн 1061 и 1064 нм (рис.8), а также выбран диапазон длин интерферометра, при котором выполняется условие двухволновой генерации (например, при l_{gap} в области 387 мкм). При $l_{\text{gap}} \approx 387$ мкм рассчитанная временная задержка между модами на длине волны 1064 нм составляет примерно 50 фс, а на длине волны 1061 нм близка к нулю.

На рис.9 представлены радиочастотные спектры, полученные экспериментально при выделении излучения на длинах волн 1061 и 1064 нм, и рассчитанные значения частоты следования импульсов при $l_{\text{gap}} = 386.97$ и 387.0 мкм.

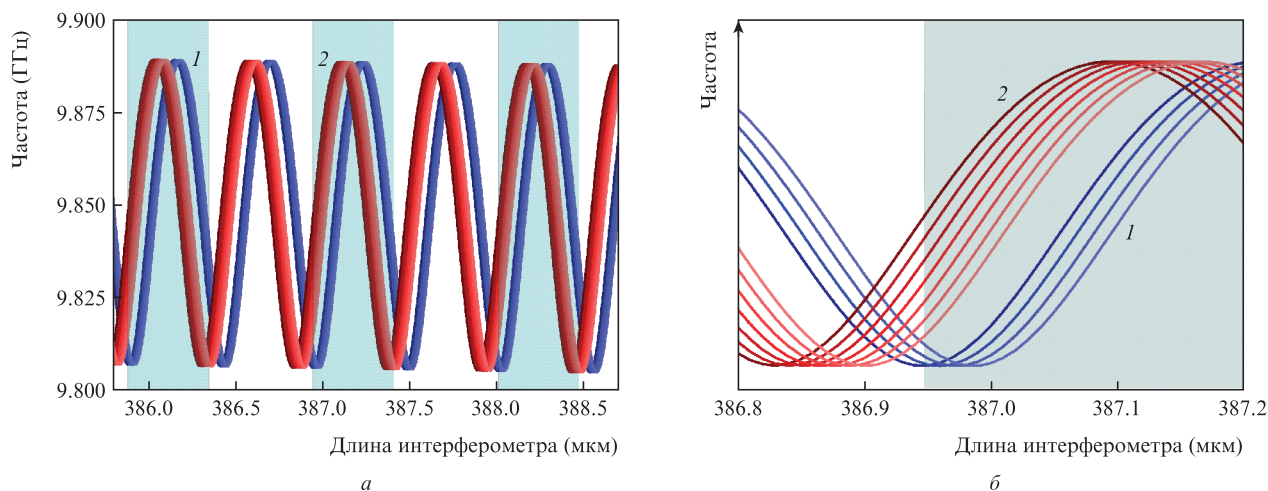


Рис.8. Зависимости частоты следования импульсов с учетом распределения продольных мод на длинах волн 1061 (1) и 1064 нм (2) от длины интерферометра. Выделенные области соответствуют длинам интерферометра, при которых внутрирезонаторные потери на $\lambda = 1064$ нм превышают потери на $\lambda = 1061$ нм.

Частоты следования импульсов, рассчитанные для интерферометра с $l_{\text{gap}} = 386.97$ мкм, хорошо согласуются с радиочастотным спектром, полученным в эксперименте. При этом увеличение длины интерферометра всего на 0.03 мкм приводит к значительному изменению рассчитанных частот. Совпадение рассчитанных частот на длине волны 1061 нм создает условие для синхронизации мод, что и наблюдалось в эксперименте (см. рис.6). При этом продольные моды на длине волны 1064 нм не синхронизированы. Такая зависимость радиочастотного спектра согласуется с экспериментальными данными и качественно объясняет полученные режимы работы лазера и возможность их перестройки.

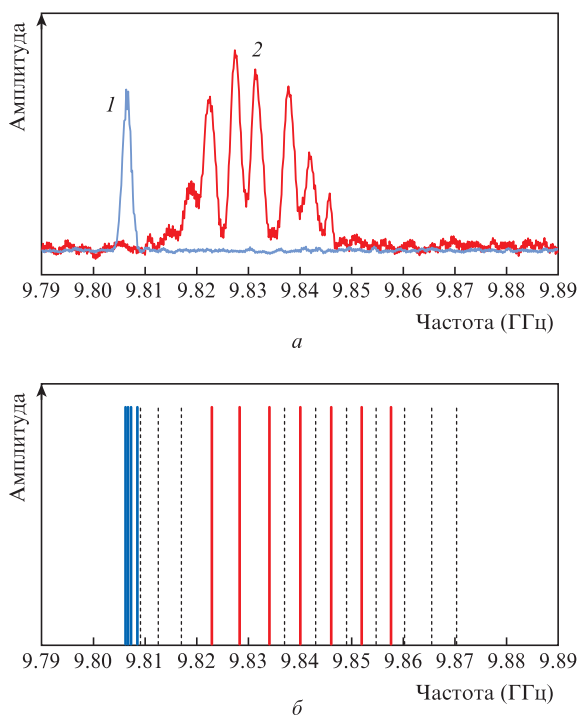


Рис.9. Сравнение положения пиков радиочастотных спектров, полученных в эксперименте (а) и рассчитанных для двух положений выходного зеркала (б), для излучения на $\lambda = 1061$ (1) и 1064 нм (2). Сплошными линиями обозначены частоты, соответствующие $l_{\text{gap}} = 386.97$ мкм, пунктирными – 387.00 мкм.

4. Заключение

На основе волновода в кристалле Nd:YAG и однослойного графена создан твердотельный пикосекундный лазер с частотой следования импульсов 9.8 ГГц, работающий на длинах волн 1061 и 1064 нм.

Управление потерями и дисперсией путем настройки внутрирезонаторного интерферометра позволяет перестраивать длину волны и частоту следования импульсов соответственно. Продемонстрирована возможность одновременной двухволновой генерации в режиме пассивной синхронизации мод с использованием одного насыщающегося поглотителя на основе графена. Такой режим работы лазера может быть интересен для генерации терагерцевого излучения на разностной частоте длин волн 1061.58 и 1064.18 нм ($\Delta\nu = 0.44$ ТГц).

П.А.Образцов выражает благодарность Российскому научному фонду (грант №17-72-10303). Работа М.В.Понариной, Т.В.Долматова и В.В.Букина выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом».

1. Hu H., Da Ros F., Pu M., Ye F., Ingerslev K., Porto E. *Nature Photon.*, **12**, 469 (2018).
2. Martinez A., Yamashita S. *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 2012 (2012).
3. Chen H.-W., Chang G., Xu S., Yang Z., Kärtner F.X. *Opt. Lett.*, **37**, 3522 (2012).
4. Трикшев А.И., Камынин В.А., Цветков В.Б., Итрин П.А. *Квантовая электроника*, **48**, 1109 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 1109 (2018)].
5. Powell R.C., Payne S.A., Chase L.L., Wilke G.D. *Opt. Lett.*, **14**, 1204 (1989).
6. Mayer A.S., Phillips C.R., Keller U. *Nat. Commun.*, **8**, 1673 (2017).
7. Klenner A., Golling M., Keller U. *Opt. Express*, **22**, 11884 (2014).
8. Set S.Y., Yaguchi H., Tanaka Y., Jablonski M., Rozhin A. *Proc. 29th Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC'03)* (Rimini, 2003, paper PD44).
9. Choi S.Y., Calmano T., Rotermund F., Kränkel C. *Opt. Express*, **26**, 5140 (2018).
10. Sun Z., Hasan T., Torrisi F., Popa D., Privitera G., Wang F., Bonaccorso F., Basko D.M., Ferrari A.C. *ACS Nano*, **4**, 803 (2010).
11. Bao B.Q., Zhang H., Wang Y., Ni Z., Yan Y. *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 3077 (2009).

12. C. Grivas, Ismaeel R., Corbari C., Huang C.-C., Hewak D.W., Lagoudakis P., Brambilla G. *Laser Photon. Rev.*, **12**, 1800167 (2018).
13. Obraztsov P.A., Okhchimchuk A.G., Rybin M.G., Obraztsova E.D., Garnov S.V. *Laser Phys.*, **26**, 084008-1 (2016).
14. Okhchimchuk A., Mezentsev V., Shestakov A., Bennion I. *Opt. Express*, **20**, 3832 (2012).
15. Obraztsov P.A., Rybin M.G., Tyurnina A.V., Garnov S.V., Obraztsova E.D., Obraztsov A.N., Svirko Y.P. *Nano Lett.*, **11**, 1540 (2011).
16. Rybin M.G., Islamova V.R., Obraztsova E.A., Obraztsova E.D. *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 2 (2018).
17. Гаранин С.Г., Бельков С.А., Рогожников Г.С., Рукавишников Н.Н., Романов В.В., Воронич И.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **44**, 798 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 798 (2014)].
18. Okhchimchuk A.G., Obraztsov P.A. *Sci. Rep.*, **5**, 11172 (2015).
19. Иевлев И.В., Корюкин И.В., Лебедева Ю.С., Хандохин П.А. *Квантовая электроника*, **41**, 715 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 715 (2011)].
20. Demirbas U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **35**, 2994 (2018).
21. Трикшев А.И., Курков А.С., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **42**, 417 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 417 (2012)].
22. Трикшев А.И., Камынин В.А., Цветков В.Б., Егорова О.Н. *Квантовая электроника*, **46**, 1085 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1085 (2016)].
23. Kafka J.D., Watts M.L., Pieterse J.-W.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2151 (1992).