

СПЕКТРАЛЬНАЯ И ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКИ ПЕРВОЙ СТОКСОВОЙ КОМПОНЕНТЫ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ИТТЕРБИЕВОМ ВОЛОКОННОМ ЛАЗЕРЕ

И. В. Жлуктова, В. А. Камынин, С. А. Филатова, А. И. Трикиев, В. Б. Цветков

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

В настоящий момент волоконные лазерные источники субнаносекундных импульсов находят применения во многих областях науки и технологии, благодаря компактности, эффективности и технологичности. А использование эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) обеспечивает генерацию вне спектров редкоземельных элементов, позволяя покрыть область спектра от 1 до 2,3 мкм. Так в ряде работ были продемонстрированы источники с генерацией ВКР, как в твердотельных [1–4], так и в волоконных лазерах [5, 6]. Подобные лазеры имеют различные области применения: медицина, спектроскопия, лабораторные исследования и т. д. Отдельно стоит отметить, что при помощи удвоения частоты лазера со стоксовой компонентой возможно получение желтого излучения [7, 8], в отличие от использования стандартных иттербиевых лазеров, так как после удвоения их частоты, полученное излучение уходит в зеленую область оптического спектра.

В данной работе представлен полностью волоконный источник субнаносекундных импульсов на длине волны 1125 нм, выделенной из первой стоксовой компоненты задающего лазера при помощи спектрального фильтра. Длительность импульсов спектрально выделенного излучения была не более 140 пс с частотой повторения 1 МГц. За счет использования нелинейного вращения плоскости поляризации излучения в волоконном задающем лазере, была получена пассивная синхронизация мод, а подстройкой контроллеров поляризации достигнуты различные режимы работы волоконного иттербиевого лазера.

На рис. 1 представлена оптическая схема экспериментальной установки. В качестве задающего источника был собран полностью волоконный иттербиевый лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод [9]. В качестве накачки лазера использовался лазерный диод с излучением на длине волны 975 нм. Резонатор задающего источника был сформирован из активного волокна с многокомпонентной оболочкой (GTWave), легированного ионами иттербия, и 200 м одномодового волокна SMF. Так как лазер работает на эффекте нелинейного вращения плоскости поляризации, в резонатор были добавлены пара коммерчески доступных контроллеров поляризации. Вывод излучения из резонатора осуществлялся при помощи поляризационного делителя.

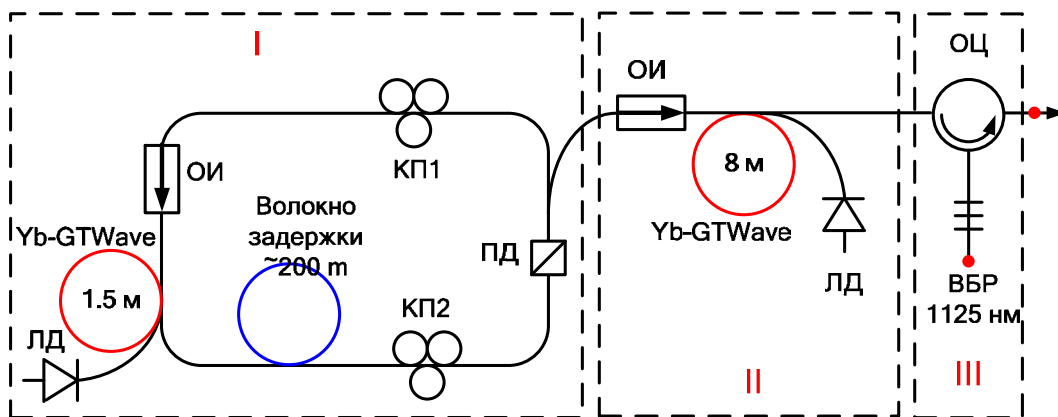


Рис. 1. Схема эксперимента: ЛД – лазерный диод накачки, КП 1,2 – контроллеры поляризации, ОИ – оптический изолятор, ПД – поляризационный делитель, ОЦ – оптический циркулятор, ВБР – волоконная брэгговская решетка

На рис. 2, а представлен оптический спектр иттербиевого лазера. Из спектра видно, что основной пик приходится на длину волны 1075 нм. Данный пик характерен диссипативным солитонам, но так же здесь присутствует ВКР генерация, стоксовая компонента которой присутствует на длине волны 1128 нм [10]. Режим лазера был подобран так, чтобы разница между основной длиной волны и пиком стоксовой компоненты составляла примерно 8 дБ. Средняя выходная мощность задающего источника была 6 мВт с длительностью импульса 118 пс, энергией 6 нДж и частотой 1 МГц.

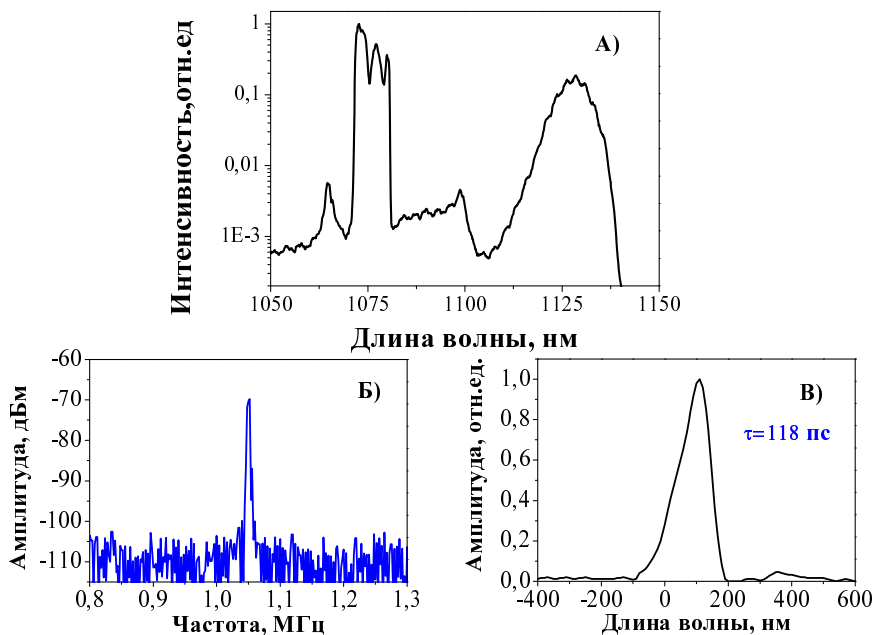


Рис. 2. Выходные параметры задающего источника: оптический и частотный спектры (а, б) и длительность импульса (в)

В дальнейшем излучение от задающего источника усиливалось для обеспечения хорошего уровня сигнала при селекции излучения при помощи спектрального фильтра, в качестве которого выступали волоконная брэгговская решетка, с высоким коэффициентом отражения, на длине волны 1125 нм и оптический циркулятор. Волоконный усилитель был реализован на иттербиевом активном GTWave волокне длиной 8 м с накачкой полупроводниковым лазерным диодом с длиной волны 975 нм. Для предотвращения попадания обратной мощности в задающий источник перед усилителем был внедрен волоконный оптический изолятор.

На рис. 3 продемонстрированы оптические спектры усиленного излучения от задающего источника. При минимальном усилении присутствует провал в стоксовой компоненте на длине волны 1125 нм, который был получен при использовании спектрального фильтра на той же длине волны.

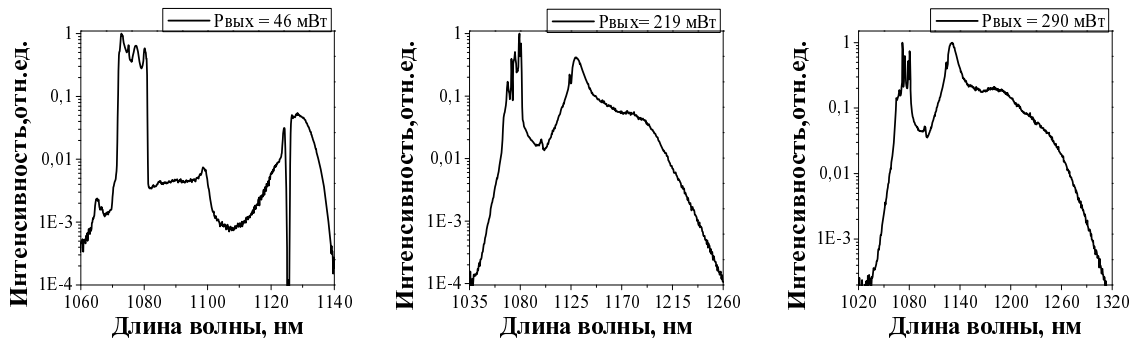


Рис. 3. Оптический спектр усиленного излучения задающего лазера при разных мощностях накачки усилителя

Стоит отметить, что при увеличении мощности накачки усилителя происходит деформация оптического спектра, ширина которого изменилась с 80 нм до 300 нм. Такой процесс может происходить из-за фазовой самомодуляции и распада солитонов, что в дальнейшем возможно использовать для генерации суперконтинуума. Максимально усиленная средняя мощность составила 290 мВт, с максимальным коэффициентом усиления 16,8 дБ.

Ниже представлены осциллограммы импульса в зависимости от мощности накачки усилителя (рис. 4). Первоначально длительность импульса от задающего источника составляла 118 пс, то при усилении длительность увеличилась до 133 пс, а затем при увеличении мощности накачки усилителя, длительность снизилась до 120 пс и в дальнейшем не менялась.

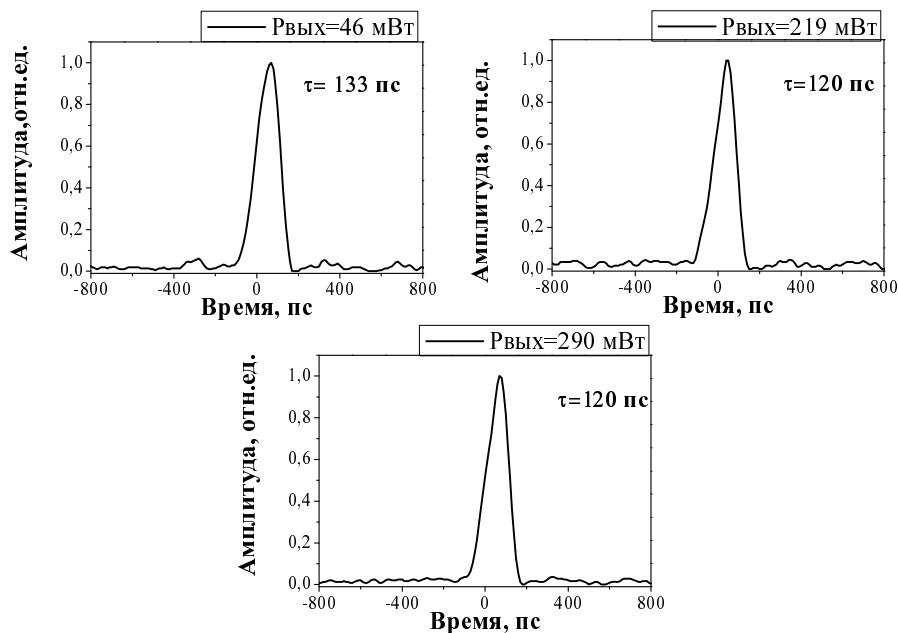


Рис. 4. Динамика изменения импульса усиленного излучения задающего источника в зависимости от мощности накачки усилителя

После использования спектрального фильтра было получено импульсное излучение на длине волны 1125 нм (рис. 5). Максимальная средняя выходная мощность составляла 11 мВт. На оптическом

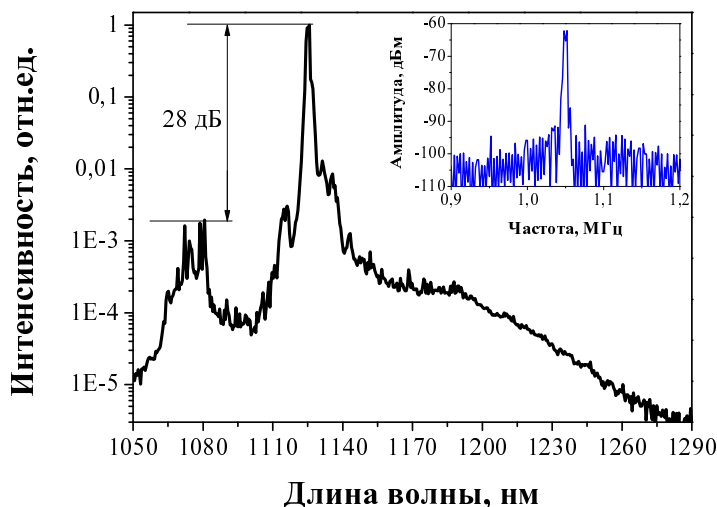


Рис. 5. Оптический и частотный спектры излучения на длине волны 1125 нм при выходной мощности 11 мВт

спектре селективного излучения присутствует отраженная рабочая длина волны, но разница между ней и вырезанным сигналом была 28 дБ. Так же видно из частотного спектра, который изображен на рис. 5, частота следования импульсов после проведения селекции не изменилась и составляла 1 МГц.

После селекции длительность импульса менялась в зависимости от мощности накачки усилителя. Так при выходной мощности 5 мВт длительность составляла 82 пс с энергией 5 нДж и пиковой мощностью 61 Вт. В дальнейшем длительность увеличилась до 123 пс, а энергия до 11 нДж с пиковой мощностью 89 Вт. Динамика изменения импульса вырезанного сигнала продемонстрирована на рис. 6.

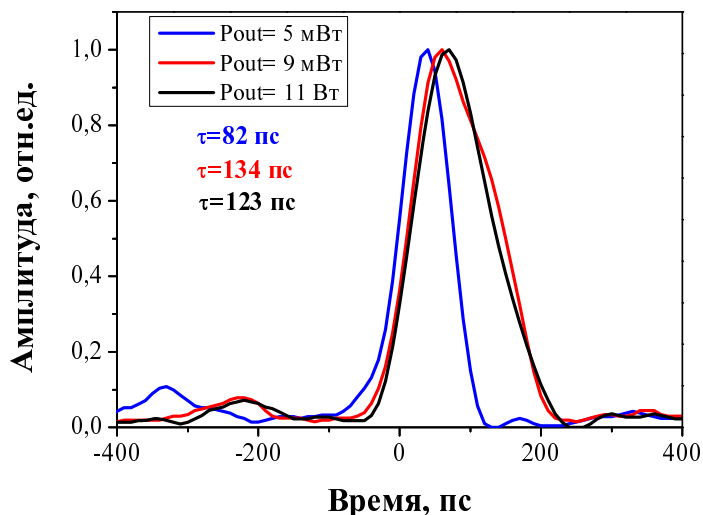


Рис. 6. Динамика изменения импульса вырезанного сигнала в зависимости от мощности усилителя

В данной работе было проведено исследование по селекции излучения из первой стоксовой компоненты при помощи спектрального фильтра, в качестве которого выступали ВБР с высоким коэффициентом отражения и оптический циркулятор. После вырезания сигнала был получен стабильный импульсный режим с частотой повторения 1 МГц и длительностью 123 пс, что соответствует энергии 11 нДж. Так же, исходя из оптического спектра вырезанного сигнала, разница между отраженной рабочей длиной волны и вырезанной стоксовой компоненты составила 28 дБ.

Список литературы

1. Granados E., Pask H. M., Esposito E., McConnell G., Spence D. J. /Multi-wavelength, all-solid-state, continuous wave mode locked picosecond Raman laser // Opt. Express, 2010. Vol. 18(5). P. 5289–5294.
2. Granados E., Pask H. M., Spence D. J. /Synchronously pumped continuous-wave mode-locked yellow Raman laser at 559 nm // Opt. Express, 2009. Vol. 17(2). P. 569–574.
3. Warriar A. M., Lin J., Pask H. M., Mildren R. P., Coutts D. W., Spence D. J. / Highly efficient picosecond diamond Raman laser at 1240 and 1485 nm // Opt. Express, 2014. Vol. 22(3). P. 3325–3333.
4. Frank M., Smetanin S., Jelínek M., Vyhlídal D., Ivleva L., Zverev P., Václav Kubeček / Highly efficient picosecond all-solid-state Raman laser at 1179 and 1227 nm on single and combined Raman lines in a BaWO₄ crystal// Optics Letters, 2018. Vol. 43(11). P. 26715–26721.
5. Liu W., Ma P., Lv H., Xu J., Zhou P., Jiang Z. / General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy// Opt. Express, 2016. Vol. 24(23). P. 26715–26721.
6. Agugaray C., Runge A., Erkintalo M., Broderick N. G. R. / Raman-driven destabilization of mode-locked long cavity fiber lasers: fundamental limitations to energy scalability // Optics Letters, 2013. Vol. 38(15). P. 2644–2646.

7. Донцова Е. И., Каблуков С. И., Лобач И. А., Достовалов А. В., Бабин С. А., Гладышев А. В., Дианов Е. М., Корбари К., Ибсен М., Казанский П. Г. / Генерация второй гармоники в волоконном световоде во внерезонаторной и внутрирезонаторной схемах // Квантовая электроника, 2016. Т. 46(11). Р. 989–994.
8. Petrasiusas M. J., Hussain M. I., Canning J., Stevenson M., Kielpinski D. / Picosecond 554 nm yellow-green fiber laser source with average power over 1 W // Opt. Express, 2014. Vol. 22, P. 17716–17722.
9. Трикшев А. И., Камынин В. А., Цветков В. Б., Егорова О. Н. / Мощный импульсный иттербиевый волоконный лазер с энергией импульса 10 мкДж // Квантовая электроника, 2016. Т. 46 (12). Р. 1085–1088.
10. Kharenko D. S., Podivilov E. V., Babin S. A., Apolonski A. A. / New effects at cavity lengthening of an all-fiber dissipative-soliton oscillator // Opt. Lett., 2012. Vol. 37. P. 4104.