

## Тема работы. **Исследование новой схемы импульсного тулиевого волоконного лазера с перестраиваемой длиной волны.**

- Состав коллектива. А.Е. Беднякова
- Научное содержание работы:

Важной частью оптического сенсора является лазерный источник, генерирующий излучение в инфракрасном спектральном диапазоне, поскольку многие газы имеют уникальные полосы поглощения в данном диапазоне. Для возможности детектирования различных газов также необходимо, чтобы существовала возможность перестройки длины волны лазера. Дополнительными важными требованиями к лазеру являются стабильность генерации излучения и простота конструкции резонатора. В 2021 году нами было выполнено исследование новой схемы полностью волоконного тулиевого лазера, генерирующего пикосекундные импульсы с перестраиваемой в диапазоне  $\sim 90$  нм длиной волны. Длина волны выходного импульса изменялась от 1873 до 1962 нм при изменении коэффициента обратной связи в резонаторе. В результате была обоснована определяющая роль уровня возбуждения усиления в управлении длиной волны генерации. Полученная максимальная энергия выходного импульса составила 1 нДж при мощности накачки 915 мВт, что свидетельствует о дифференциальной эффективности 22%.

В 2022 году была продолжена работа по исследованию данной компактной схемы полностью волоконного тулиевого лазера с самосинхронизацией мод излучения. Важной особенностью данного лазера является то, что волоконный световод, легированный тулием, выполняет в резонаторе одновременно три функции: 1) служит для усиления сигнала; 2) является простым и высоко интегрированным насыщающимся поглотителем; 3) позволяет управлять длиной волны излучения посредством контроля уровня возбуждения активной среды. При этом резонатор волоконного лазера не содержит фильтров и насыщающихся поглотителей.

Для понимания механизмов насыщающегося поглощения и самосинхронизации мод излучения было выполнено детальное исследование высоко легированного (0,8 мол%) активного волокна, обогащенного ионными кластерами тулия. Нами показано, что расчетная концентрация пар ионов  $Tm^{3+}$ , равная 20%, обеспечивает усиление волокна с глубиной модуляции 23% и высокой интенсивностью насыщения 95 МВт/см<sup>2</sup>. Данных значений оказалось достаточно для эффективной синхронизации мод излучения. Кроме того, было выполнено экспериментальное и численное исследование возможностей перестройки длины волны выходного импульса в результате изменения коэффициента обратной связи резонатора. Для достижения количественного согласия с экспериментом была усовершенствована численная модель, построенная в первый год работы над проектом. Нами рассмотрена трёхуровневая модель усиливающей среды и учтены эффекты кросс-релаксации и ап-конверсии в активном световоде, ответственные за эффект синхронизации мод излучения. Также в модель включены более реалистичные спектры излучения и поглощения тулиевого световода. В результате было достигнуто количественное согласие результатов моделирования с экспериментом. Диапазон перестройки длины волны в численных расчётах равен 90 нм и соответствует диапазону перестройки, наблюдаемому в эксперименте.

Полученная в результате лазерная система представляет собой компактный и простой подход к генерации ультракоротких импульсов с возможностью перестройки длины волны и режимов работы в широком диапазоне, на который не влияют ограничения по стабильности или мощности лазера, и который может быть применён к другим диапазонам длин волн.

Важно отметить, что усиление и поглощение, ответственные за разные стороны лазерной динамики, локализованы в разных частях активного волокна. Перестройка по длине волны обеспечивается зависящим от длины волны коэффициентом усиления, распределенным вдоль световода, тогда как за формирование импульса в волоконном лазере отвечает эффект насыщающегося поглощения, локализованный в конце активного световода. На первом этапе работы была реализована трёхуровневая модель энергетических уровней иона тулия (рисунок 1), включающая эффект ап-конверсии и кросс-релаксации между энергетическими уровнями тулия. Нами рассмотрены основные уровни  ${}^3H_6$ ,  ${}^3F_4$  и  ${}^3H_4$ .

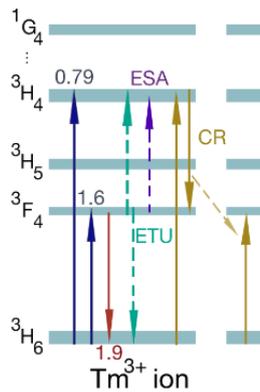


Рисунок 1 – Схема энергетических уровней иона тулия.

Система связанных уравнений на непрерывную накачку и импульсный сигнал, учитывающая эффекты дисперсии и нелинейности, описывает усиление импульса в активном световоде следующим образом:

$$\frac{\partial A_s(z,t)}{\partial z} = -i\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_s(z,t)}{\partial t^2} + i\gamma |A_s(z,t)|^2 A_s(z,t) + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g_s(\omega,z)}{2} \tilde{A}_s(z,\omega) \exp(-i\omega t) d\omega,$$

$$\frac{\partial P_p(z)}{\partial z} = g_p(z) P_p(z),$$

где  $A_s(z,t)$  – медленно-меняющаяся амплитуда электро-магнитного поля,  $P_p(z)$  – средняя мощность накачки,  $\beta_2$  – коэффициент дисперсии групповых скоростей,  $\gamma$  – коэффициент керровской нелинейности,  $g_s$  и  $g_p$  – коэффициенты усиления/потерь сигнала и накачки. Зависимость усиления от длины волны рассмотрена в пространстве Фурье, в котором оптическое поле  $\tilde{A}(z,\omega)$  умножается на профиль усиления  $g_s(\omega,z)$ .

Каждая спектральная компонента усиления  $g_s(\lambda_i,z)$ ,  $i = 1, \dots, N_\omega$ , где  $N_\omega$  – количество дискретных частот в расчётном окне, и коэффициент усиления/потерь накачки  $g_p$  были найдены из трёхуровневой модели тулия в стационарном случае  $\frac{dN_{2,3}}{dt} = 0$ :

$$g_s(\lambda_i,z) = (\sigma_{21}^s(\lambda_i) - \sigma_{23}^s(\lambda_i)) \rho_s(\lambda_i) N_2(z) - \sigma_{12}^s(\lambda_i) \rho_s(\lambda_i) N_1(z) + \sigma_{32}^s(\lambda_i) \rho_s(\lambda_i) N_3(z), \quad i = 1, \dots, N_\omega$$

$$g_p(z) = \sigma_{21}^p \rho_p N_2(z) - \sigma_{12}^p \rho_p N_1(z),$$

$$\frac{dN_2(z)}{dt} = \left( \sigma_{12}^p \rho_p \frac{P_p(z)}{h\nu_p} + \sum_{k=1}^k \left( \sigma_{12}^s(\lambda_k) \rho_s(\lambda_k) \frac{P_s(\lambda_k, z)}{h\nu_k} \right) \right) N_1(z) + \left( \sum_{k=1}^k \left( \sigma_{32}^s(\lambda_k) \rho_s(\lambda_k) \frac{P_s(\lambda_k, z)}{h\nu_k} \right) \right) N_3(z) - \left( \sigma_{21}^p \rho_p \frac{P_p(z)}{h\nu_p} + \sum_{k=1}^k \left( \sigma_{21}^s(\lambda_k) \rho_s(\lambda_k) \frac{P_s(\lambda_k, z)}{h\nu_k} \right) + \sum_{k=1}^k \left( \sigma_{23}^s(\lambda_k) \rho_s(\lambda_k) \frac{P_s(\lambda_k, z)}{h\nu_k} \right) + \frac{1}{T_2} \right) N_2(z) - 2k_{2231}N_2^2 + 2k_{3122}N_1N_3,$$

$$\frac{dN_3(z)}{dt} = \left( \sum_{k=1}^k \left( \sigma_{23}^s(\lambda_k) \rho_s(\lambda_k) \frac{P_s(\lambda_k, z)}{h\nu_k} \right) \right) N_2(z) - \left( \sum_{k=1}^k \left( \sigma_{32}^s(\lambda_k) \rho_s(\lambda_k) \frac{P_s(\lambda_k, z)}{h\nu_k} \right) + \frac{1}{T_3} \right) N_3(z) + k_{2231}N_2^2 - k_{3122}N_1N_3,$$

$$N_1(z) = N - N_2(z) - N_3(z),$$

где  $N_{1,2,3}$  – плотности населённости энергетических уровней  ${}^3H_6$ ,  ${}^3F_4$  и  ${}^3H_4$  соответственно.  $N = 4.05938 \cdot 10^{15} m^{-1}$  – общее число возбужденных ионов тулия, интегрированное по площади моды,  $P_s(\omega_k, z) = |\tilde{A}(z, \omega_k)|^2$  – мощность сигнала на частоте  $\omega_k$ ,  $T_2 = 425 \mu s$  и  $T_3 = 425 \mu s$  – время жизни ионов тулия на втором и третьем энергетических уровнях,  $\sigma_{12}^{(p)} = 1.5630 \cdot 10^{-25} m^2$  и  $\sigma_{21}^{(p)} = 5.1005 \cdot 10^{-27} m^2$  – эффективные сечения поглощения и излучения накачки,  $\sigma_{12}^{(s)}$ ,  $\sigma_{23}^{(s)}$ ,  $\sigma_{21}^{(s)}$  и  $\sigma_{32}^{(s)}$  – соответствующие значения на длинах волн сигнала  $\lambda_i$ ,  $\rho_p(\vec{r})$  и  $\rho_s(\vec{r})$  – нормированные распределения мощности накачки и сигнала по сечению волокна  $\rho_{p,s} = \Gamma_{p,s}/\pi a^2$ , где  $a = 2.65 \mu m$  – радиус сердцевины одномодового световода,  $\Gamma_p$  ( $\Gamma_s$ ) соответствуют фактору перекрытия между модой накачки (сигнала) и распределению ионов.  $\Gamma_p = 1$  при накачке в сердцевину,  $\Gamma_s = 1 - \exp(-2a^2/w^2)$ ,  $w$  – радиус электрического поля эквивалентного гауссова пятна на уровне  $1/e$ . Коэффициенты переноса энергии  $k_{3122} = 2.52 \cdot 10^{-22} m^3/s$  и  $k_{2231} = 3.44 \cdot 10^{-24} m^3/s$  описывают процесс кросс-релаксации  ${}^3H_4$ ,  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ ,  ${}^3F_4$  и ап-конверсии энергии  ${}^3F_4$ ,  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_4$ ,  ${}^3H_6$  соответственно.

В качестве начального поля на каждом на первом обходе резонатора был рассмотрен «белый» гауссовский шум. На рисунке 2 показано, что самостарт лазерной генерации невозможен при интенсивности насыщения  $I_{sat} = 46 MW/cm^2$ , соответствующей самой короткой длине образца активного световода. Интенсивность оптического поля в данном случае стремится к нулю. Оптимальное значение интенсивности насыщения  $I_{sat} = 150 MW/cm^2$  соответствует длине активного световода, равной 5 сантиметрам. В данном случае в лазерном резонаторе наблюдается формирование одиночного импульса. Дальнейшее увеличение интенсивности насыщения приводит к искажению формы импульса, росту интенсивности боковых полос Келли (рисунок 2(c)) и разрушению импульса (рисунок 2 (d)). При моделировании лазера параметры насыщающегося поглотителя были зафиксированы и соответствовали оптимальной найденной длине участка активного световода, равной 5 сантиметрам:  $\alpha_0 = 0.15$ ,  $\alpha_{ns} = 0.85$  и  $P_{sat} = 100 W$ .

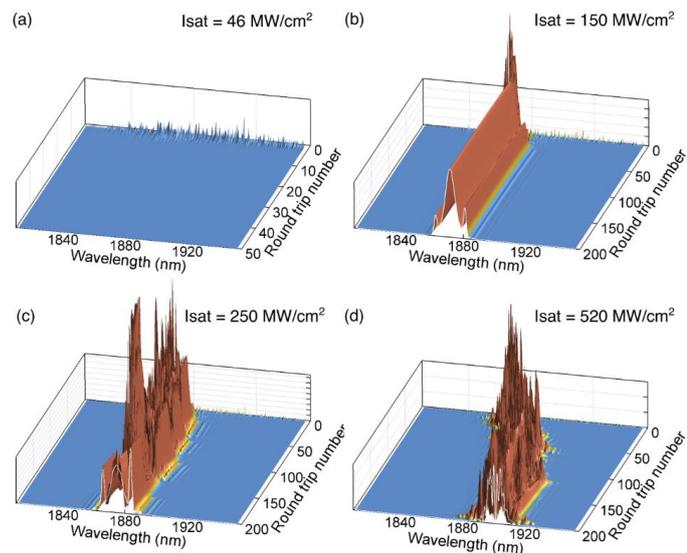


Рисунок 2 – Примеры эволюции спектра при формировании импульса, соответствующие различным параметрам насыщающегося поглотителя. Значение интенсивности насыщения световода, легированного тулием, изменяется от 46 до 520 МВт/см<sup>2</sup>.

#### Основные результаты работы в 2022 году:

- Впервые показано, что самосинхронизация мод излучения в тулиевом волоконном лазере способна приводить к стабильной генерации фемтосекундных импульсов с высокой энергией. Кроме того, продемонстрировано, что в таком режиме генерации возможна перестройка длины волны выходного импульса в широком спектральном диапазоне. С помощью модифицированной численной модели было выполнено детальное исследование эффектов перестройки длины волны и синхронизации мод излучения в активном световоде. Найдена оптимальная длина невозбужденной части активного световода, достаточная для эффективного насыщающегося поглощения излучения в лазерном резонаторе и формирования импульсной генерации. Также продемонстрировано влияние сечений излучения и поглощения тулиевого световода на диапазон спектральной перестройки волоконного лазера. Результаты моделирования количественно согласуются с результатами экспериментальных измерений.

- Рассмотренная схема лазера обладает большим потенциалом для практических применений, поскольку является относительно простой и позволяет добиться перестройки длины волны в диапазоне 90 нм. Хотя текущие исследования были сосредоточены на волокнах, легированных тулием, ключевое явление, лежащее в основе предлагаемого метода перестройки длины волны, является общим и может быть перенесено на другие длины волн, где большинство волоконных лазерных компонентов, включая фильтры, в настоящее время недоступны. В частности, это относится к исследованию среднего ИК-диапазона длин волн, где волокна на основе фторидов, легированные диспрозием и эрбием, также обеспечивают исключительно широкий спектр усиления.

- Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера позволило детально исследовать факторы, ограничивающие диапазон перестройки длины волны выходного излучения, а также факторы, влияющие на самостарт импульсной генерации в волоконном лазере.

- Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).

Kirsch, D.C., Bednyakova, A., Varak, P. *et al.* Gain-controlled broadband tuneability in self-mode-locked Thulium-doped fibre laser. *Commun Phys* **5**, 219 (2022). <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00989-x>

Dennis C. Kirsch, Anastasia Bednyakova, and Maria Chernysheva "Broadband filterless tuneability in self-mode-locked Tm-doped fibre lasers", Proc. SPIE PC12142, Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications III, PC121420S (30 May 2022); <https://doi.org/10.1117/12.2626621>

- Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию.

Впечатления положительные, постоянно использую вычислительный кластер НГУ в своей работе.