

# Влияние параметров насыщающихся поглотителей на режимы генерации гантелевидного тулиевого волоконного лазера

А.Д.Зверев, В.А.Камынин, А.И.Трикшев, Е.Ю.Ковтун, Н.Р.Арутюнян, А.А.Мастин, П.А.Рябочкина, Е.Д.Образцова, В.Б.Цветков

*Исследовано влияние параметров насыщающегося поглотителя на режимы генерации гантелевидного тулиевого волоконного лазера. В качестве насыщающихся поглотителей использовались полимерные пленки с нанотрубками, характеризующиеся различными коэффициентами пропускания в насыщенном и ненасыщенном состояниях. Продемонстрирована работа лазеров с поглотителями различных конфигураций для получения стабильных режимов модуляции добротности и синхронизации мод в спектральном диапазоне 1930–1960 нм. В моноимпульсном режиме синхронизации мод генерации средняя мощность выходного излучения составила 3.5 мВт при частоте следования импульсов 8.4 МГц и длительности импульса 1.08 пс.*

**Ключевые слова:** тулий, волоконный лазер, пассивная синхронизация мод, одностенные углеродные нанотрубки.

## 1. Введение

Волоконные лазеры, генерирующие ультракороткие импульсы в двухмикронном диапазоне длин волн, имеют множество применений. Они широко представлены в медицине, промышленности [1] и науке [2, 3]. Ультракороткие импульсы в волоконных лазерах можно получить, реализовав режим пассивной синхронизации мод при использовании различных нелинейных эффектов: нелинейного вращения плоскости поляризации [4], нелинейного кольцевого зеркала [5] или внесения в резонатор лазера насыщающихся поглотителей. В качестве последних могут выступать полупроводниковые зеркала SESAM [6], пленки на основе углеродных нанотрубок [7] или графена [8], а также топологические изоляторы [9, 10].

В волоконных лазерах, работающих в диапазоне длин волн 1.85–2.15 мкм, используют оптические волокна, легированные ионами тулия, гольмия или комплексом тулий – гольмий. Широкий спектр люминесценции тулиевых световодов позволяет получать импульсы пико- и фемтосекундной длительности. Так, в тулиевом волоконном лазере с нелинейным усиливающим кольцевым зеркалом при использовании полупроводникового зеркала с насыщающимся поглотителем и одностенных углеродных нанотрубок были получены импульсы длительно-

стью 230 и 450 фс соответственно [11]. Тулиевый лазер с кольцевым резонатором в [12] благодаря эффекту нелинейного вращения плоскости поляризации генерировал импульсы длительностью 235 фс. В тулиевом лазере с гантелевидным резонатором для получения режима пассивной синхронизации мод с импульсами длительностью 750 фс в качестве насыщающегося поглотителя использовались углеродные нанотрубки [13].

Глубина модуляции и вносимые в резонатор оптические потери насыщающихся поглотителей, используемых для получения пассивной синхронизации мод в волоконных лазерах, влияют на режим работы лазера и параметры генерируемых импульсов. Так, в работе [14] при различном количестве используемых слоев графена была получена генерация с длительностью импульсов в диапазоне 523–603 фс. В работе [15] авторы, используя образцы поглотителей различной толщины на основе углеродных нанотрубок, получили импульсы длительностью от 501 до 530 фс.

Для получения пассивной синхронизации мод в настоящей работе мы использовали три образца пленок с одностенными углеродными нанотрубками (ОУНТ). Было исследовано влияние количества слоев и коэффициента пропускания пленок с углеродными нанотрубками на характеристики генерации гантелевидного тулиевого волоконного лазера.

## 2. Приготовление и исследование образцов пленок с нанотрубками

Одностенные углеродные нанотрубки со средним диаметром 2 нм (TuballTM) и концентрацией 0.1 мг/мл смешивались с 1%-ным водным раствором карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Далее суспензия подвергалась воздействию ультразвука мощностью 200 Вт в течение 1.5 ч для дезинтеграции пучков ОУНТ, после чего центрифугировалась в течение 1 ч со скоростью 50000 об/мин в ультрацентрифуге Beckman Coulter Optima MAX-E. Для последующей работы отделялся супернатант (3 из 4 мл в

А.Д.Зверев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: izverevad@gmail.com

В.А.Камынин, А.И.Трикшев, Н.Р.Арутюнян, Е.Д.Образцова, В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

Е.Ю.Ковтун. Сколковский институт науки и технологий, Россия, 121205 Москва, Большой б-р, 30, стр. 1

А.А.Мастин, П.А.Рябочкина. Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева, институт физики и химии, Россия, 430005 Саранск, Большевикская ул., 68А, корп. 2

Поступила в редакцию 19 марта 2021 г.

центрифужной пробирке), который разбавлялся 1%-ным водным раствором КМЦ в 10, 5 и 3 раза для образцов № 1, 2 и 3 соответственно. После этого суспензии гомогенизировались с помощью магнитной мешалки, наливались в чашки Петри и высушивались в течение трех дней до полного испарения воды. В итоге были получены образцы полимерных пленок толщиной 15 мкм, содержащие ОУНТ. Исходя из диаметра нанотрубки, время релаксации насыщающегося поглощения оценивалось как 1.8–2 пс [16].

Схема установки для определения оптического пропускания образцов поглотителей приведена на рис.1. Для определения коэффициента пропускания в насыщенном режиме через образцы ОУНТ пропускалось излучение тулиевого лазера ( $\lambda_0 = 1960$  нм) с частотой следования и длительностью импульсов 5.3 МГц и 2 пс соответственно. Средняя мощность излучения, подаваемая на нанотрубки, регулировалась переменным аттенуатором (ПА) в диапазоне от 0 до 2 мВт (соответственно энергия импуль-

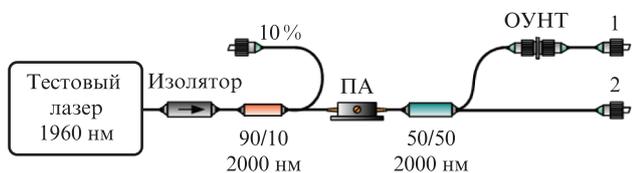


Рис.1. Схема установки для определения параметров пропускания ОУНТ: ПА – переменный оптический аттенуатор; ОУНТ – исследуемые пленки с одностенными углеродными нанотрубками.

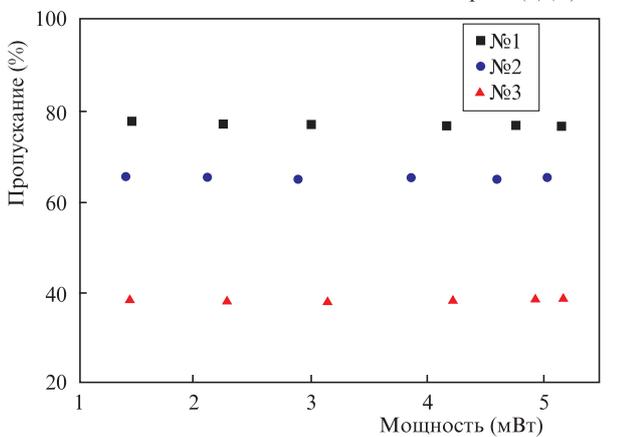
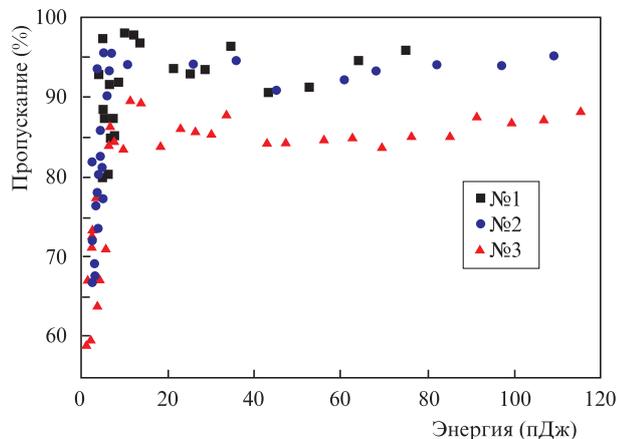


Рис.2. Зависимости пропускания для трех образцов пленок с ОУНТ от энергии проходящих через них импульсов (а) и от мощности непрерывного излучения (б).

сов изменялась от 0 до 120 пДж). Параметры пропускания изготовленных пленок определялись путем сравнения значений мощности импульсов на выходах 1 и 2.

Зависимость пропускания различных образцов поглотителей от энергии импульсов представлена на рис.2,а. Величина пропускания пленок в ненасыщенном режиме для точного определения начального (ненасыщенного) пропускания образцов измерялась на установке (рис.1), где в качестве тестового лазера использовался непрерывный тулиевый лазер с той же длиной волны генерации (1960 нм). Средняя мощность выходного излучения, подаваемого на образцы, изменялась в диапазоне 1–5 мВт. Поскольку результаты измерения насыщения поглощения в импульсном режиме показали, что заметное насыщение наблюдается начиная примерно с 1 Вт пиковой мощности, то использование непрерывных лазеров с такими значениями средней мощности не должно было оказывать влияние на величину пропускания образцов. Сравнением значений мощности излучения на выходах 1 и 2 определялись коэффициенты пропускания исследуемых пленок в зависимости от подаваемой на них мощности непрерывного излучения. Результаты измерения представлены на рис.2,б.

Для трех исследуемых образцов однослойных пленок с ОУНТ получены следующие значения коэффициентов пропускания в насыщенном ( $T_S$ ) и ненасыщенном ( $T_{NS}$ ) режимах: № 1 –  $T_S = 97\%$ ,  $T_{NS} = 76\%$ ; № 2 –  $T_S = 96\%$ ,  $T_{NS} = 65\%$ ; № 3 –  $T_S = 87\%$ ,  $T_{NS} = 38\%$ .

### 3. Исследование характеристик лазерной генерации тулиевого волоконного лазера

Изготовленные и охарактеризованные образцы поглотителей использовались для исследования влияния количества слоев и коэффициентов пропускания пленок с нанотрубками на режимы генерации тулиевого волоконного лазера с гантелевидным резонатором. Схема лазера приведена на рис.3.

Накачка волокна, легированного ионами тулия (Eye Safe 9/125 Thulium-Doped Single-Mode Single Clad Fiber, Nufern), осуществлялась через мультиплексор М непрерывным лазером с длиной волны 1550 нм и мощностью до 5 Вт. В качестве зеркал резонатора использовались два оптических делителя, замкнутые с одной стороны: оптический делитель 50/50 в качестве зеркала с высоким коэффициентом отражения (свободный порт делителя заканчивался угловым разъемом с минимальным значением обратного отражения) и оптический делитель 90/10 как частично прозрачное зеркало. Пассивную синхрониза-

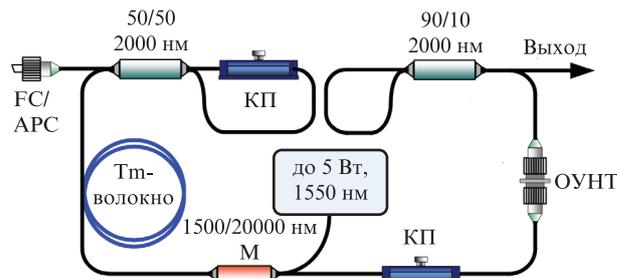


Рис.3. Схема тулиевого лазера с гантелевидным резонатором: КП – контроллер поляризации; ОУНТ – пленки с ОУНТ в оптическом разьеме; Tm-волокно – активный световод; FC/APC – угловой оптический разъем; М – мультиплексор.

цию мод обеспечивали помещенные между двумя оптическими разбемами FC/APC полимерные пленки с ОУНТ. Подстройка режимов генерации осуществлялась с помощью поворотных контроллеров поляризации КП. Характеристики лазера контролировались с порта «Выход».

#### 4. Результаты эксперимента

При использовании одного слоя пленки с ОУНТ (образец № 1,  $T_S = 97\%$ ,  $T_{NS} = 76\%$ ) не удалось получить стабильные импульсные режимы генерации. Добавление второго слоя пленки (суммарное пропускание  $T_S = 94\%$ ,  $T_{NS} = 58\%$ ) позволило реализовать регулярную последовательность импульсов (вставка на рис.4,а) с периодом 120 нс, соответствующим времени обхода резонатора. Однако в спектре выходного излучения (рис.4,а) просматривалась значительная доля непрерывного излучения, что не позволяет использовать данный режим генерации для дальнейшего усиления импульсов и практического применения. Аналогичная ситуация имела место для однослойной пленки № 2 ( $T_S = 96\%$ ,  $T_{NS} = 65\%$ ). Полученные при ее использовании спектральные и временные характеристики выходного излучения приведены на рис.4,б.

Применение поглотителя из двух слоев пленки № 2 (суммарное значение  $T_S = 92\%$ ,  $T_{NS} = 42\%$ ) позволило получить несколько стабильных режимов генерации тулиевого лазера. При мощности накачки  $P_p = 325$  мВт

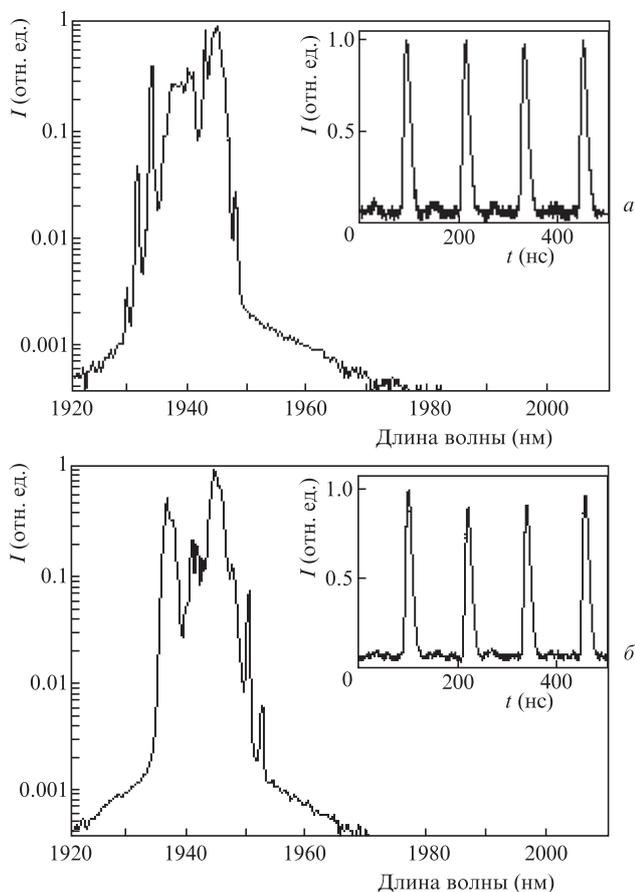


Рис.4. Спектры излучения и последовательности импульсов (на вставках) при использовании двух слоев пленки № 1 (а) и одного слоя пленки № 2 (б).

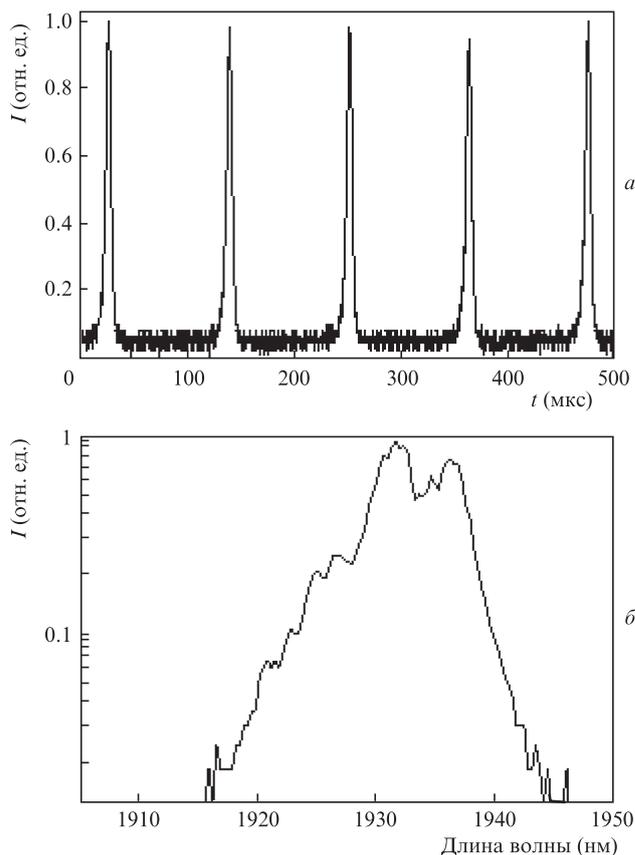


Рис.5. Осциллограмма (а) и спектр (б) излучения лазера в режиме МД при использовании двух слоев пленки № 2;  $P_p = 325$  мВт.

была получена генерация в режиме модуляции добротности (МД). Средняя мощность выходного излучения составила 1.36 мВт, период следования импульсов – 110 мкс, а длительность импульса – 6 мкс. Осциллограмма и спектр выходного излучения в этом режиме показаны на рис.5. Отметим, что мощности накачки не хватило для возбуждения режима синхронизации мод (СМ) из-за общих потерь в резонаторе, связанных в том числе и с наличием в нем насыщающегося поглотителя, которые не препятствовали генерации импульсного режима МД.

Поляризационная зависимость отражения кольцевых зеркал тулиевого лазера позволила уменьшить общие потери в резонаторе с помощью контроллера поляризации, благодаря чему при той же мощности накачки (325 мВт) был получен переходный режим генерации МД–СМ, т. е. модуляция добротности с одновременной синхронизацией мод. Частота следования импульсов внутри огибающей МД была равна 8.4 МГц, а средняя мощность излучения – 1.44 мВт. Временные и спектральные характеристики выходного излучения в режиме МД–СМ приведены на рис.6.

Путем дополнительной подстройки контроллера поляризации при той же мощности накачки (325 мВт) был получен чистый режим синхронизации мод с частотой следования импульсов 8.4 МГц (вставка на рис.7,а). Длительность импульсов генерации  $\tau_0$ , оцененная по автокорреляционной функции (рис.7,а), составила 1.08 пс, средняя мощность выходного излучения – 3.5 мВт, ширина спектра лазерной генерации на полувысоте – 3.7 нм (рис.7,б). Произведение ширины спектра на длительность импульсов ТВР (time-bandwidth product) равно 0.32, что характерно для нечирпированных солитонов [17].

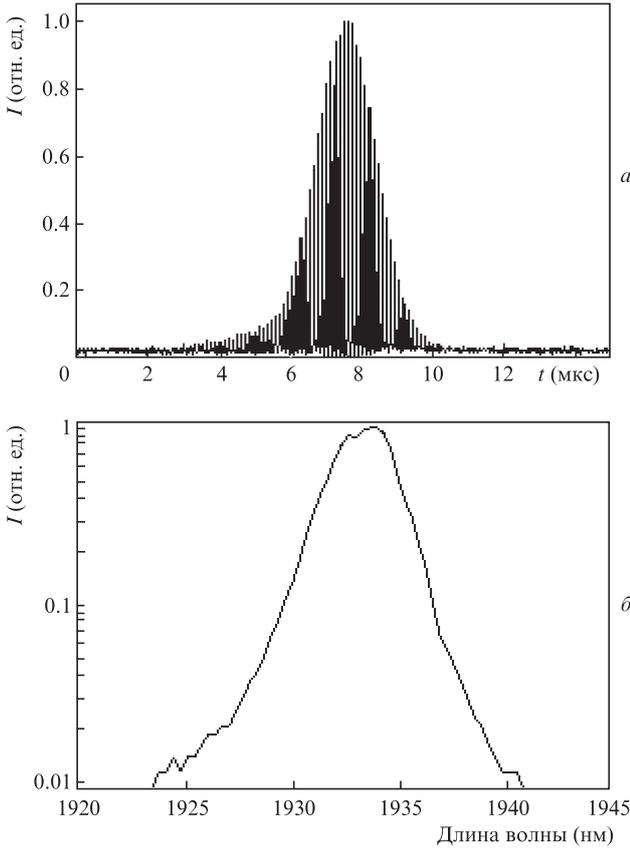


Рис.6. Временные (а) и спектральные (б) характеристики выходного излучения тулиевого лазера в режиме МД–СМ при использовании двух слоев пленки № 2;  $P_p = 325$  мВт.

На спектре лазерной генерации (рис.7,б) хорошо видны пики Келли [18]. Они возникают в результате интерференции солитона с дисперсионной волной, образующейся из-за периодического изменения усиления, потерь или дисперсии при распространении импульса в резонаторе [19]. Определив положение этих пиков, можно оценить параметр дисперсии групповых скоростей (ПДГС) резонатора по формуле [20]

$$\Delta_N = \frac{\ln(1 + \sqrt{2})}{\pi} \sqrt{\frac{4N}{|\beta_{2sum}|L} - \frac{1}{\tau_0^2}}, \quad (1)$$

где  $\Delta_N$  – разность частот  $N$ -го пика Келли и центральной частоты;  $\tau_0$  – длительность солитона;  $\beta_{2sum}$  – ПДГС резонатора;  $L = 23.8$  м – длина резонатора. В результате имеем, что на центральной длине волны  $\lambda_0 = 1951$  нм ПДГС резонатора  $\beta_{2sum} = -0.071$  пс<sup>2</sup>/м. Изменяя значение данного параметра добавлением отрезков волокон с различными значениями ДГС, можно реализовать генерацию консервативных и диссипативных солитонов, а также растянутых импульсов [21].

ПДГС компонентов резонатора связаны следующим соотношением:

$$\beta_{2SMF}L_{SMF} + \beta_{2Tm}L_{Tm} = \beta_{2sum}L, \quad (2)$$

где  $\beta_{2SMF}$  – ПДГС одномодового волокна;  $L_{SMF}$  – сумма удвоенной длины SMF-волокна линейной части резонатора и длины волокна, использованного в качестве зеркал;  $\beta_{2Tm}$  – ПДГС тулиевого волокна;  $L_{Tm}$  – удвоенная длина тулиевого волокна. Следовательно, с учетом того,

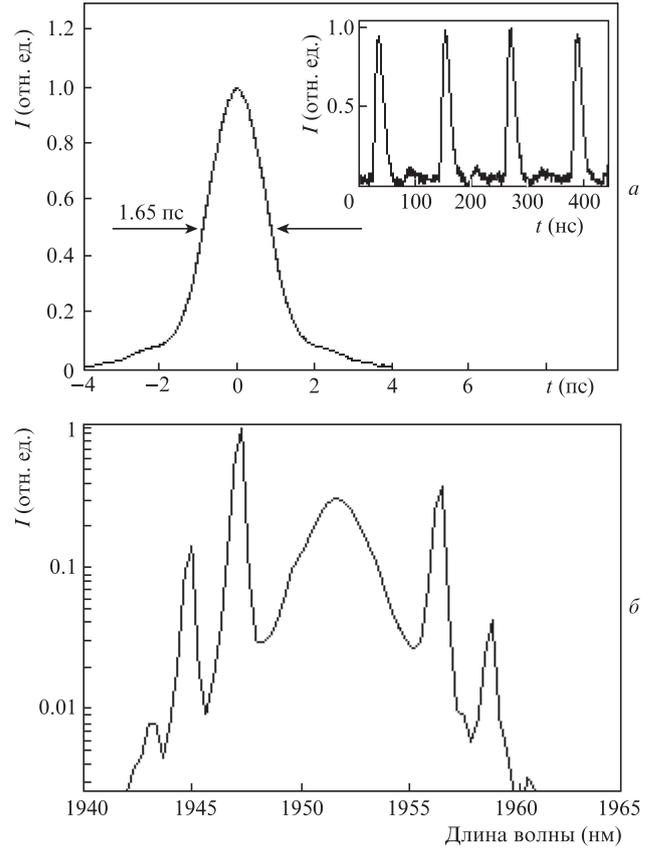


Рис.7. Осциллограмма (на вставке) и автокорреляционная функция импульсов (а), а также спектр лазерной генерации (б) в режиме СМ, полученные при использовании двух слоев пленки № 2;  $P_p = 325$  мВт.

что  $L_{Tm} = 7$  м,  $L_{SMF} = 17.2$  м и  $\beta_{2SMF} = -0.068$  пс<sup>2</sup>/м, ПДГС тулиевого волокна  $\beta_{2Tm} = -0.074$  пс<sup>2</sup>/м.

Увеличение мощности накачки до 396 мВт привело к генерации сдвоенных импульсов с интервалом 30 нс (рис.8,а). Это обусловлено тем, что энергия солитонного импульса, распространяющегося в резонаторе с заданными значениями дисперсии и нелинейности, может иметь только определенное значение [9]. При увеличении мощности накачки и, соответственно, усиления, приводящем к повышению энергии, импульсы распадаются. Период следования пар импульсов совпадает со временем обхода резонатора. Спектральные характеристики выходного излучения в этом режиме представлены на рис.8,б.

При использовании одного слоя пленки с ОУНТ № 3 ( $T_S = 87\%$ ,  $T_{NS} = 38\%$ ) также были реализованы стабильные режимы генерации, но при более высокой мощности накачки. При  $P_p = 396$  мВт получен режим модуляции добротности с импульсами длительностью 4 мкс. Как видно из рис.9,а, период следования импульсов равен 100 мкс, а средняя мощность выходного излучения – 1.9 мВт. Спектр выходного излучения показан на рис.9,б. Сравнивая данный режим генерации с режимом МД при использовании двух слоев пленок № 2, можно сделать вывод о возможности перестройки частоты следования импульсов за счет изменения общих потерь в резонаторе и мощности накачки.

С помощью однослойной пленки № 3 при изменении положения контроллера поляризации и неизменной мощности накачки был получен режим МД – СМ со средней мощностью выходного излучения 2.1 мВт. Частота следования импульсов внутри огибающей МД соответствовала

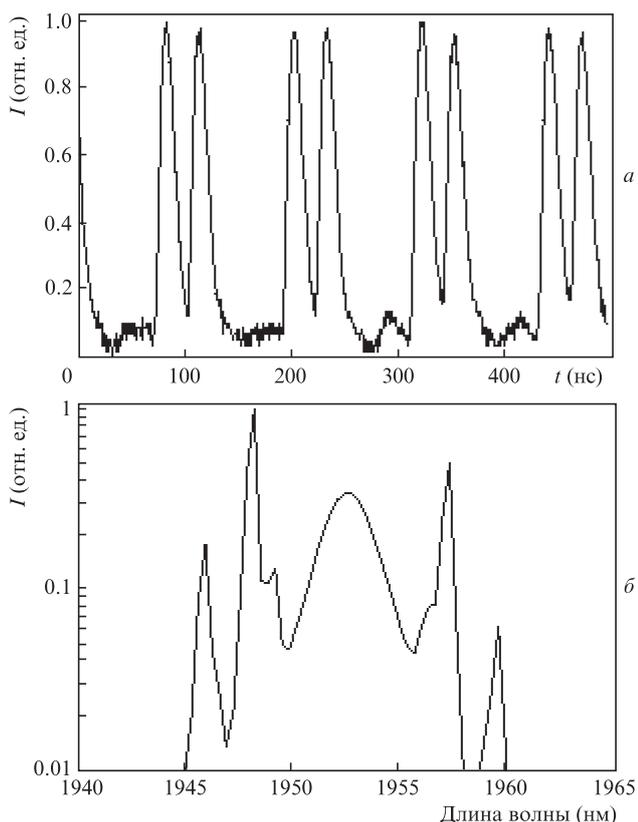


Рис.8. Осциллограмма (а) и спектральные характеристики (б) выходного излучения при использовании двух слоев пленки № 2;  $P_p = 396$  мВт.

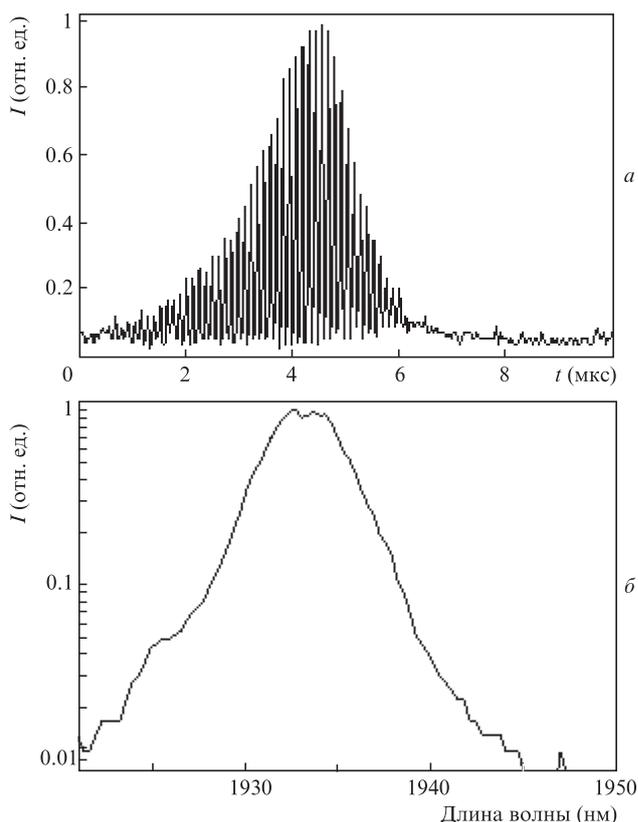


Рис.10. Осциллограмма (а) и спектр (б) выходного излучения в режиме МД – СМ, полученного при использовании одного слоя пленки № 3;  $P_p = 396$  мВт.

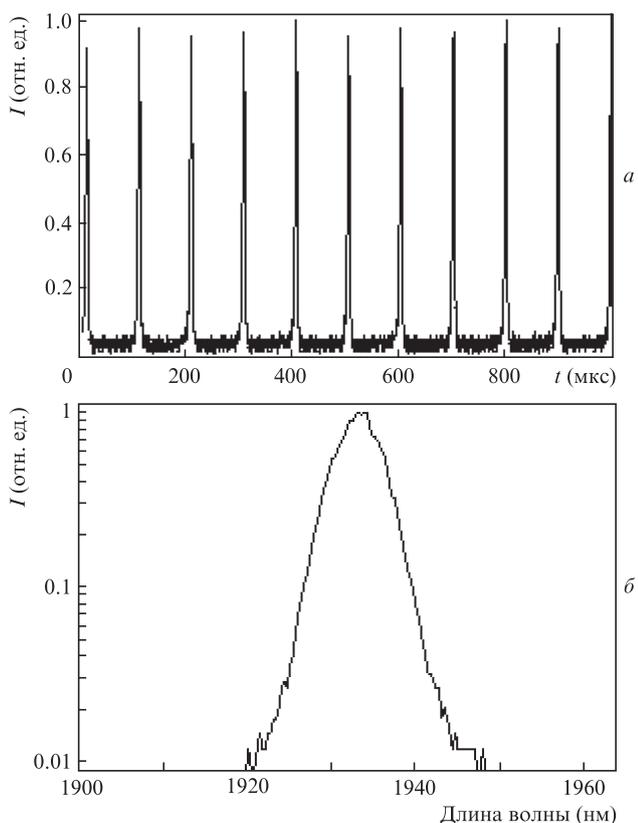


Рис.9. Временные (а) и спектральные (б) характеристики выходного излучения в режиме МД при использовании одного слоя пленки № 3;  $P_p = 396$  мВт.

ла времени обхода резонатора. Осциллограмма и спектр выходного излучения приведены на рис.10.

При мощности накачки 396 мВт подстройкой контроллера поляризации был получен режим синхронизации мод. Средняя мощность выходного излучения составила 3.2 мВт (против 3.5 мВт, полученных в режиме СМ при использовании двух слоев пленки № 2), что говорит о снижении КПД лазера в данном случае. На рис.11,а изображена автокорреляционная функция выходного излучения в режиме СМ. Длительность импульсов составила 1.05 пс, ширина спектра по уровню  $-3$  дБ (рис.11,б) равна 3.8 нм, период – 120 нс (см. вставку на рис.11,а). Соответствующее значение ТВР составило  $\sim 0.32$ , что наряду с наличием в спектре лазерной генерации пиков Келли указывало на солитонный режим генерации. По формулам (1), (2) также были вычислены ПДГС резонатора и тулиевого волокна на центральной длине волны  $\lambda_0 = 1934$  нм, которые составили:  $\beta_{2sum} = -0.069$  пс<sup>2</sup>/м и  $\beta_{2Tm} = -0.067$  пс<sup>2</sup>/м, что близко к значениям, приведенным выше.

Увеличение мощности накачки до 461 мВт так же, как и в случае использования пленок № 2, приводило к распаду солитона и обеспечивало режим СМ со сдвоенными импульсами. Межимпульсный интервал при этом был равен 40 нс (рис.12,а). Спектр излучения в этом режиме генерации показан на рис.12,б.

Результаты экспериментов представлены в сводной табл.1, где черным цветом обозначены нестабильные режимы, серым – переходная область, без цвета – стабильные режимы (СМ–СИ – режим синхронизации мод со сдвоенными импульсами). Для стабильных режимов также указана мощность накачки в мВт, при которой проис-

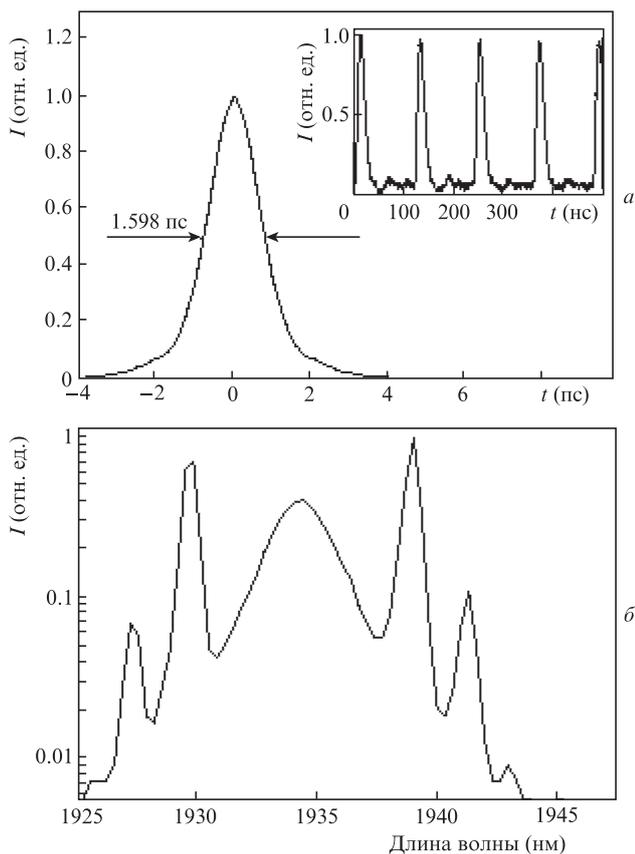


Рис.11. Осциллограмма (на вставке) и автокорреляционная функция импульсов (а), а также спектр выходного излучения (б) в режиме СМ при использовании однослойной пленки № 3;  $P_p = 396$  мВт.

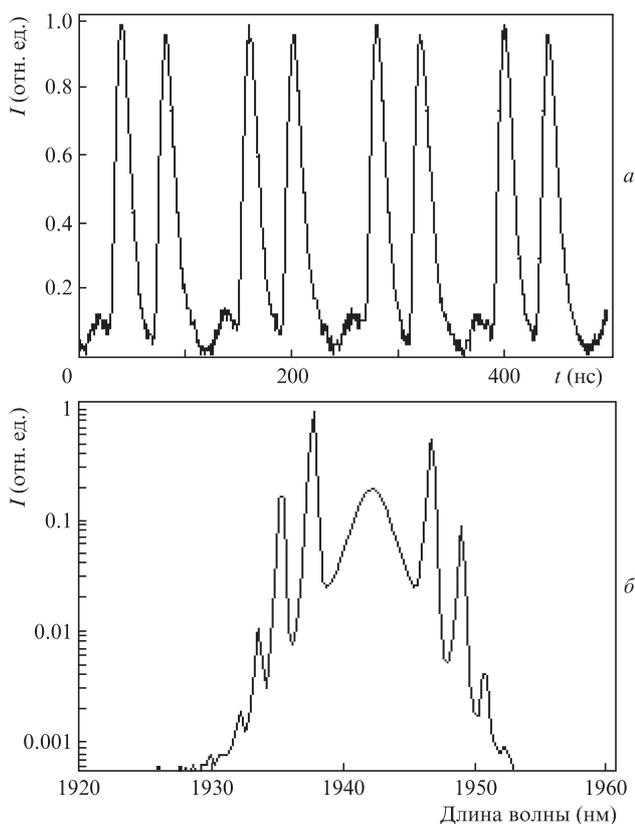


Рис.12. Последовательность импульсов (а) и спектральные характеристики (б) выходного излучения при использовании одного слоя пленки № 3;  $P_p = 461$  мВт.

Табл.1. Результаты экспериментов.

Образцы пленок	Параметры пропускания		Мощность накачки (мВт)			
	$T_S$ (%)	$T_{NS}$ (%)	МД	МД-СМ	СМ	СМ-СИ
№ 1, 1 слой	97	76	100–500	100–500	100–500	100–500
№ 1, 2 слоя	94	58	100–500	100–500	100–500	100–500
№ 2, 1 слой	96	65	100–500	100–500	100–500	100–500
№ 2, 2 слоя	92	42	325	325	325	396
№ 3, 1 слой	87	38	396	396	396	461

ходила генерация. Мощность накачки в экспериментах варьировалась в диапазоне 100–500 мВт, т.к. при более высоких значениях мощности происходило разрушение образцов насыщающихся поглотителей.

Из таблицы следует, что при использовании полимерных пленок с ОУНТ с ненасыщенным пропусканием  $T_{NS} \geq 58\%$  (для одного слоя пленок № 1, 2 и двух слоев пленки № 1) не удалось получить стабильные импульсные режимы генерации. Это связано с переходом лазера в квазинепрерывный режим работы из-за высокого коэффициента усиления в активном волокне и достаточно высокой добротности резонатора при указанном уровне  $T_{NS}$ .

Использование двух слоев пленки с нанотрубками № 2 с общим пропусканием в ненасыщенном режиме 42% и в режиме насыщения 92% позволило получить несколько стабильных режимов генерации: МД с периодом следования импульсов 110 мкс и длительностью 6 мкс; МД-СМ с частотой следования импульсов синхронизации мод, обратной времени обхода резонатора; СМ с частотой следования импульсов 8.4 МГц и средней мощностью выходного излучения 3.5 мВт при длительности импульсов 1.08 пс; СМ со сдвоенными импульсами, расстояние между которыми равно 30 нс.

При использовании одного слоя пленки № 3 с  $T_{NS} = 38\%$  и  $T_S = 87\%$  были получены режимы генерации, подобные тем, которые наблюдались при использовании двух слоев пленок с ОУНТ № 2, но при более высокой мощности накачки. В режиме МД лазер генерировал импульсы с периодом 100 мкс и длительностью 4 мкс, а в режиме МД-СМ период следования ультракоротких импульсов составил 120 нс. В режиме СМ со сдвоенными импульсами межимпульсный интервал был равен 40 нс. В одноимпульсном режиме СМ средняя мощность выходного излучения составила 3.2 мВт при частоте следования импульсов 8.4 МГц и их длительности около 1.05 пс. Таким образом, дальнейшее уменьшение коэффициентов пропускания  $T_S$  и  $T_{NS}$  пленок с ОУНТ приводило к снижению эффективности лазера.

Итак, продемонстрировано влияние параметров насыщающегося поглотителя на режимы генерации гантелевидного тулиевого волоконного лазера. Проведена оптимизация режимов работы лазера по свойствам насыщающегося поглотителя. Показано, что в данном случае наиболее выгодным решением является использование двух слоев пленки с нанотрубками № 2 с общим коэффициентом пропускания 92% в насыщенном режиме и 42% в ненасыщенном режиме.

Работа выполнена на базе Научного центра мирового уровня «Фотоника» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-912).

1. Kerse C., Kalaycıoğlu H., Elahi P., Çetin B., Kesim D., Akçaalan Ö., Yavaş S., Aşık M.D., Öktem B., Hoogland H., Holzwarth R., Ilday F.Ö. *Nature*, **537** (7618), 84 (2016).
2. Potma E.O., Jones D.J., Cheng J.X., Xie X.S., Ye J. *Opt. Lett.*, **27** (13), 1168 (2002).
3. Sobon G., Klimczak M., Sotor J., Krzempek K., Pysz D., Stepień R., Martynkien T., Abramski K.M., Buczynski R. *Opt. Mater. Express*, **4** (1), 7 (2014).
4. Matsas V.J., Newson T.P., Richardson D.J., Payne D.N. *Electron. Lett.*, **28** (15), 1391 (1992).
5. Duling I.N. *Opt. Lett.*, **16** (8), 539 (1991).
6. Kivistö S., Okhotnikov O.G. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23** (8), 477 (2011).
7. Филатова С.А., Камынин В.А., Жлуктова И.В., Тришнев А.И., Арутюнян Н.Р., Рыбин М.Г., Образцова Е.Д., Батов Д.Т., Воропаев В.С., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **49** (12), 1108 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (12), 1108 (2019)].
8. Sotor J., Sobon G., Tarka J., Pasternak I., Krajewska A., Strupinski W., Abramski K.M. *Opt. Express*, **22** (5), 5536 (2014).
9. Yin K., Zhang B., Li L., Jiang T., Zhou X., Hou J. *Photon. Res.*, **3** (3), 72 (2015).
10. Liu H., Zheng X., Liu M., Zhao N., Luo A., Luo Z., Xu W., Zhang H., Zhao C., Wen S. *Opt. Express*, **22** (6), 6868 (2014).
11. Chernysheva M.A., Krylov A.A., Arutyunyan N.R., Pozharov A.S., Obraztsova E.D., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20** (5), 448 (2014).
12. Wang Q., Chen T., Chen K. *Proc. CLEO 2010* (OSA, 2010, p. CFK7).
13. Kieu K., Wise F.W. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21** (3), 128 (2009).
14. Liu C.N., Huang P.L., Cheng W.H., Yeh C.Y. *Proc. 2018 7th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE) 2018* (Taiwan, pp 1–2).
15. Sobon G., Duzynska A., Świniarski M., Judek J., Sotor J., Zdrojek M. *Sci. Rep.*, **7** (1), 1 (2017).
16. Ichida M., Hamanaka Y., Kataura H., Achiba Y., Nakamura A. *Phys. B: Condens. Matter*, **323** (1–4), 237 (2002).
17. Lazaridis P., Debarge G., Gallion P. *Opt. Lett.*, **20** (10), 1160 (1995).
18. Kelly S.M.J. *Electron. Lett.*, **28** (8), 806 (1992).
19. Ge Y., Guo Q., Shi J., Chen X., Bai Y., Luo J., Jin X., Ge Y., Li L., Tang D., Shen D., Zhao L. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, **58** (1), 242 (2016).