

ВОЛОКОННЫЕ И ГИБРИДНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИНАМИЧЕСКИ – ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ ТОПОЛОГИЕЙ РЕЗОНАТОРА

Нюшков Б.Н.^{1,2*}, Смирнов С.В.¹, Иваненко А.В.¹, Художиткова Д.А.¹,
Беднякова А.Е.¹

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

*E-mail: b.nyushkov@nsu.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-192-193

Топология резонатора – один из ключевых конфигурационных параметров, которые определяют возможности управления режимами импульсной генерации в волоконных и гибридных (волоконно-полупроводниковых) лазерах. В данной работе впервые предложена и исследована конфигурация волоконного резонатора с электрооптическим «механизмом» динамической трансформации его топологии. Такой резонатор позволяет реализовывать различные режимы импульсной генерации, включая режимы двунаправленной импульсной генерации с активной либо гибридной синхронизацией мод, при неизменной конструкции лазера, с помощью только электронного управления.

В основе предложенного динамически-трансформируемого волоконного лазерного резонатора лежит электрооптический переключатель (ЭОП) с конфигурацией 2x2, изготовленный из LiNbO₃ по схеме волноводного интерферометра Маха-Цандера с входным и выходным разветвителями [2]. Данный переключатель связывает пассивную двунаправленную волоконную петлю и содержащую оптический усилитель (ОУ) активную однонаправленную волоконную петлю, как показано на Рис. 1. С помощью напряжения, подаваемого на ЭОП, можно управлять перекрестной оптической связью между двумя петлями резонатора. Используемый ЭОП характеризуется комплементарными передаточными функциями вида:

$$\frac{Out_i}{In_i} = \sin^2\left(\pi \frac{U_{con}}{U_0}\right), \quad (1)$$

$$\frac{Out_j}{In_i} = \cos^2\left(\pi \frac{U_{con}}{U_0}\right), \quad (2)$$

где Out и In – мощности на выходных и входных портах, $i, j = 1, 2$ ($i \neq j$) — индексы этих портов, U_{con} – величина управляющего напряжения, $U_0 = 13$ В — напряжение полного переключения ЭОП. Таким образом, изменяя управляющее напряжение от 0 до 13 Вольт, можно получить три различных топологии резонатора, как показано на Рис. 1.

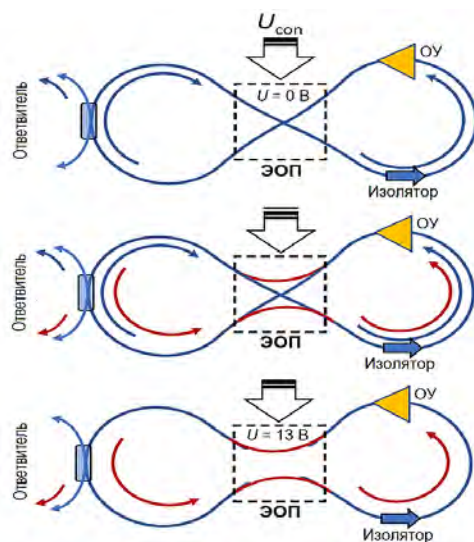


Рис. 1. Электронно-управляемая топологическая трансформация резонатора и переключение направления циркуляции излучения

Наиболее очевидным следствием переключения между двумя крайними топологическими состояниями резонатора (реализуемыми при $U_{con} = 0$ В и $U_{con} = 13$ В) является переключение направления циркуляции лазерного излучения в пассивной петле резонатора. Показано, что это позволяет получать в пассивной петле одновременно две встречно-направленные комплементарные регулярные последовательности лазерных импульсов в режиме активной синхронизации мод. Такой режим достигается при быстром переключении ЭОП с частотой повторения f_{rep} , равной или кратной обратной величине времени обхода резонатора T_{RT} . На Рис. 2 показаны измеренные характеристики такой импульсной генерации, полученной в экспериментальной конфигурации лазера, использующей полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) в качестве активной среды. Длительность импульсов составила около 9 нс при частоте следования ~ 45.6 МГц (третья гармоника фундаментальной частоты повторения, $f_{rep} = 3 / T_{RT}$). Максимальная частота повторения и минимальная длительность в такой конфигурации определяются в первую очередь временем переключения ЭОП, которое в лучших коммерчески-доступных ЭОП может быть порядка 0.1 нс. Отношение

сигнал/шум в измеренных радиочастотных спектрах последовательностей импульсов было 50 дБ, что сопоставимо с типичными параметрами активной синхронизации мод.

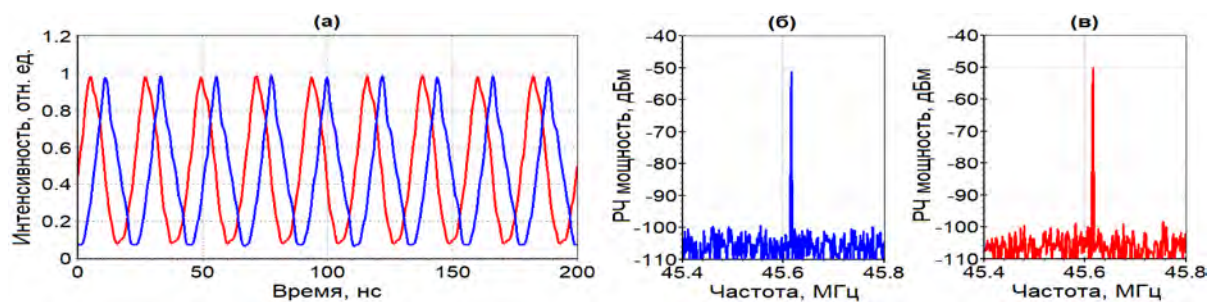


Рис. 2. (а) – осциллограммы двух встречно-направленных последовательностей лазерных импульсов (выделены синим и красным цветом) с частотой повторения ~45.6 МГц. (б) и (в) – радиочастотные (РЧ) спектры этих последовательностей импульсов измеренные в окрестностях частоты повторения с разрешением 1 кГц

Необходимо также отметить особенности возможного использования промежуточной ($0 \text{ В} < U_{con} < 13 \text{ В}$) топологии резонатора. В этом случае резонатор подобен резонаторам широко известного типа «фигура-8». Пассивная петля резонатора в этом топологическом состоянии работает подобно интерферометру Саньяка. В середине своего диапазона переключения ($U_{con} = 6,5 \text{ В}$) ЭОП обеспечивает коэффициент деления 50:50 для обоих направлений распространения в пассивной петле и поэтому в результате интерференции прошедших через пассивную петлю волн происходит возвращение (эффективное отражение) излучения в тот же самый порт, через который оно вошло в ЭОП. Поэтому лазерная генерация в таком стационарном топологическом состоянии рассматриваемой конфигурации резонатора невозможна. Однако, пропускание петли Саньяка может стать достаточным для преодоления порога генерации при некоторой отстройке от центра диапазона переключения ЭОП. Об этом, в частности, свидетельствуют представленные на Рис. 3 мощностные характеристики непрерывной генерации в тестовой конфигурации лазера с ПОУ.



Рис. 3. Зависимость внутрирезонаторной мощности от управляющего напряжения на ЭОП: черная кривая – мощность на выходе ПОУ, синяя и красные кривые – мощности излучения, циркулирующего в пассивной петле по часовой стрелке и против. соответственно

Возможность электронного управления коэффициентом деления в волоконной петле Саньяка открывает широкие перспективы при ее использовании в существенно нелинейном режиме (при дифференциальном нелинейном фазовом набеге порядка π). В таком режиме петля работает как нелинейное оптическое петлевое зеркало (nonlinear optical loop mirror, NOLM [3]), а при внесении в эту петлю оптического усилителя как нелинейное усиливающее петлевое зеркало (nonlinear amplifying loop mirror, NALM [4]). NOLM и NALM с фиксированными коэффициентами деления давно и широко применяются в волоконных лазерах в качестве искусственного насыщающегося поглотителя для получения импульсных режимов генерации. Однако предложенный в контексте исследуемой трансформируемой резонаторной топологии вариант нелинейной петли с возможностью плавного

регулирования и динамического управления коэффициентом деления позволяет существенно упростить настройку и оптимизацию режимов импульсной генерации, а также находить новые режимы в широком пространстве адиабатных вариаций параметров лазерной системы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 21-42-04401).

Литература

1. Nyushkov B.N., Kobtsev S.M., *Quantum Electron.* **48**, 1099-1104 (2018)
2. Singh G., Janyani V., Yadav R. P., *Optica Applicata* **42**, 613-625 (2012)
3. Doran N.J., Wood D., *Opt. Lett.* **13**, 56-58 (1988)
4. Fermann M.E., et al, *Opt. Lett.* **15**, 752-754 (1990)