



# ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ШУМА: ОТ МИКРОВОЛНОВОЙ ФОТониКИ ДО ПЛАЗМониКИ И БИОТЕХНОЛОГИЙ

## LOW NOISE LASER SOURCES: FROM MICROWAVE PHOTONICS TO PLASMONICS AND BIOTECHNOLOGIES

А.А.Фотиади\*, к.ф.-м.н., вед. науч. сотр. (ORCID: 0000-0002-8086-8218) / fotiadi@mail.ru  
A.A.Fotiadi\*, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Scientist

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.3-4.168.173

Получено: 30.07.2021 г.



Исследования в области оптоэлектроники, нелинейной оптики, волоконных лазеров не ограничиваются только фундаментальными задачами, на их основе создаются различные датчики, приборы и устройства для широкого круга применений – от микроволновой фотоники до биотехнологий. Ряд направлений, таких как создание интегрированных оптических чипов, требует уменьшения уровня шума лазерных источников, другие нуждаются в разработке новых принципов создания распределенных датчиков физических величин, методик фотодинамической терапии различных поверхностных новообразований и управления биохимическими процессами в области клеточной терапии. Наша лаборатория работает в контексте этих направлений и в перспективе может стать центром,

предлагающим научное сопровождение проектов по "Радиофотонике" и "Нанофотонике", реализуемых совместно с наукоемкими коммерческими компаниями. О лаборатории квантовой электроники и оптоэлектроники Научно-исследовательского технологического института имени С.П.Капицы (НИТИ) Ульяновского государственного университета, проводимых в ней исследованиях и их перспективах рассказывает кандидат физико-математических наук, руководитель лаборатории квантовой электроники и оптоэлектроники Фотиади Андрей Александрович.

Studies in optoelectronics, nonlinear optics and fiber lasers are not limited to fundamental tasks only but also include design of various sensors, instruments and devices intended for a wide range of applications starting from microwave photonics to biotechnology. A number of tasks, such as development of the integrated optical chips, require a progress in laser sources of high spectral purity while other directions need advanced distributed sensors of physical values to be developed, techniques for photodynamic therapy of various kinds of superficial tumors and means enabling to control biochemical processes in the cell therapy. Our laboratory works in these areas and in the future it can become a center offering scientific support for projects in Radiophotonics and Nanophotonics, being realized in collaboration with high-tech commercial companies. The Head of the Quantum Electronics and Optoelectronics Laboratory of Technological Research Institute named after S.P.Kapitza of Ulyanovsk State University, Cand. Sc. (Physics and Mathematics) Dr. Andrei A. Fotiadi tells about the studies conducted in the laboratory, the prospects of current research and future plans.

\* Лаборатория квантовой электроники и оптоэлектроники Научно-исследовательского технологического института имени С. П. Капицы (НИТИ) Ульяновского государственного университета / Laboratory of quantum electronics and optoelectronics of Technological Research Institute named after S.P.Kapitza of Ulyanovsk State University.

**Как возникла лаборатория квантовой электроники и оптоэлектроники и о каких фундаментальных исследованиях вам хотелось бы рассказать читателям? О каких вехах ее деятельности вам хотелось бы рассказать?**

Лаборатория квантовой электроники и оптоэлектроники зародилась задолго до моего прихода. Но сначала при университете был организован Научно-исследовательский технологический институт, который теперь носит имя С.П.Капицы. Основная специализация этого института – исследование влияния радиации на свойства различных материалов, радиационной устойчивости материалов, используемых в атомной промышленности. Такая специализация не случайна, а связана со спецификой региона, в котором Димитровград с его атомными реакторами занимает особое место. Среди задач, которыми занимался в то время институт, были средства измерения радиации на основе использования новых материалов, попросту говоря – дозиметры. Оптические методы показали хорошей альтернативой, а оптическое волокно давно зарекомендовало себя для применений в датчиках. Возможность таких применений обусловлена несколькими факторами. Во-первых, волокно длинное, то есть может покрывать собой достаточно протяженные объекты. Во-вторых, оно само может передавать информацию, что широко используется в современных волоконно-оптических линиях связи. Волоконно-оптические распределенные датчики температуры, натяжения и давления также используют именно эти свойства волокна. Для распределенных измерений волокно разматывается вдоль измеряемого объекта, в него запускается импульс излучения, который бежит по волокну и в каждой его точке вызывает обратное рассеяние назад (как в радаре). Результат этого рассеяния на каждом отрезке волокна каким-то определенным образом зависит от измеряемого физического параметра. Сигнал, рассеянный с разных отрезков волокна, передается по самому волокну, анализируется, и, таким образом, восстанавливается распределение измеряемой физической величины по волокну. Если длина распределенного датчика 50 км, а пространственное разрешение системы 1 м, то одна такая распределенная система позволяет заменить собой 50 тыс. одиночных датчиков. В институте была создана лаборатория, основной задачей которой было изучение механизмов воздействия радиации на оптическое волокно с целью дозиметрии, исследования радиационно-стойких и,

наоборот, радиационно-чувствительных волоконных материалов. Не имея опыта работы с оптическими волокнами, вновь созданная лаборатория активно сотрудничала с Научным центром волоконной оптики (НЦВО) РАН.

Огромное влияние на дальнейшее развитие лаборатории оказал один из столпов современной волоконной оптики Андрей Семенович Курков. Думаю, именно А.С.Куркова можно считать отцом-идеологом лаборатории. Оказалось, что волоконная оптика не ограничивается датчиками и телекомом, а это также мощные лазеры, и нелинейные эффекты, и возможности управления лазерным излучением. Кроме того, именно тогда была поставлена задача превратить лабораторию в сильный центр притяжения, используя при этом особенности региональной науки и потребности региона. Важным элементом этой стратегии стала интеграция лаборатории в контекст развития отечественного и мирового волоконного научного сообщества. В 2010 году в Ульяновске был организован семинар по волоконным лазерам. Он, по сути, является конференцией, которая с 2007 года раз в два года проходит в разных городах (хотя, в основном, в Новосибирском Академгородке). Традиционно семинар проходит на русском языке, но он также обеспечивает участие успешных иностранных и российских ученых, работающих в этой области. Семинар 2010 года позволил привести в Ульяновск многих выдающихся представителей научного сообщества, работающих в этой области, а также представителей заинтересованных организаций (Роснано, Минобрнауки, Сколково). Очень своевременной оказалась объявленная Министерством образования программа "Кадры", которая позволила привлечь ученых, состоявшихся в этой области. Мое сотрудничество с лабораторией началось примерно в это время. Огромное влияние на становление лаборатории оказало тесное сотрудничество с Олегом Геннадьевичем Охотниковым, одним из ведущих мировых лидеров в области нелинейной волоконной оптики, волоконных лазеров, профессором университета Тампере (Финляндия). В первые годы сотрудничества оно обеспечило лабораторию возможностью для стажировок молодых специалистов в современной западной лаборатории. В настоящее время эти люди составляют костяк лаборатории. Свое нынешнее название "Лаборатория квантовой электроники и оптоэлектроники" получила в 2014 году, когда коллектив под руководством О.Г.Охотникова выиграл мегагрант по 220-му постановлению правительства.



Проект был направлен на изучение лазерных источников ультракоротких импульсов сверхвысокой пиковой мощности для применений в задачах авионики, медицины и нанофотоники. В основе проекта лежала идея использования тейперированных активных волокон для генерации коротких импульсов огромной пиковой мощности. Особенностью таких волокон является уменьшение его диаметра по длине – на входе волокно толстое (многомодовое), а на выходе тонкое (одномодовое). Толстый многомодовый вход позволяет разгонять огромные мощности, не доходя до нелинейного предела, а тонкий одномодовый выход обеспечивает высокое качество пучка и возможность контроля нелинейностей для формирования гигантских импульсов высокого качества. Разработка и изучение такой системы объединило потенциал всех сотрудников лаборатории, специализирующихся на эксперименте, моделировании волноводных сред, изучении оптических нелинейных эффектов (солитонов, бризеров, ударных волн и т.д.). Это позволило всем сотрудникам приобрести огромный опыт не только в научных исследованиях, но также таких важных элементах научной работы как представление результатов в высокорейтинговых журналах, выступление на международных конференциях, выбор научной тематики, написание проектов и оформление отчетов, выбор и покупка оборудования, распоряжение ресурсами и т.д. Кроме того, выросла материальная база лаборатории, которая была оснащена за это время по стандартам западной лаборатории, специализирующейся в этой области. За время проекта, с 2014 по 2018 год, лабораторией было опубликовано около 70 статей в высокорейтинговых журналах, входящих в перечень Scopus и Web of Science. Сейчас мы продолжаем работу, не снижая этих темпов, имеем проекты РФФИ, РФФИ, недавно стали победителями мегагранта под руководством проф. Роя Тейлора – ученого не просто известного Российскому волоконно-оптическому сообществу, но в той или иной степени оказавшего влияние на формирование той его части, где слова солитон, фемтосекунды, волоконный лазер употребляются в повседневной речи.

**Эксклюзивна ли деятельность лаборатории в настоящий момент? Как вы оцениваете опыт работы и какими видите ее перспективы?**

Мы достаточно молодая лаборатория, но чувствуем себя довольно комфортно в одном пространстве с крупными научными центрами. У нас есть собственные достижения, по которым нас

принимают, есть круг своих наработанных знаний и умений, которыми мы охотно делимся. Для решения амбициозных задач лаборатория объединяет компетенции многих членов коллектива (теоретиков, экспериментаторов, инженеров), сотрудничает с ведущими российскими (ИНМЭ РАН, ИАиЭ СО РАН, ИРЭ РАН, ИОФ РАН, НГУ, МГУ, Сколтех, НПК ТЦ) и международными (Imperial College, UK; ORC, Finland; Aston University, UK; CICESE, Mexico, UMONS, Belgium) научными центрами. Коллектив лаборатории представлен известными российскими учеными И.О.Золотовским и Д.А.Коробко, активно занимающимися исследованиями в области нелинейной оптики, физики лазеров, квантовой электроники и оптоэлектроники, а также молодыми учеными, обладающими достаточной квалификацией для выполнения экспериментальных и теоретических работ различной степени сложности. Наличие хорошей технологической базы и обширных научных связей позволяет проводить исследования по целому ряду проектов в области оптоэлектроники, нелинейной оптики, волоконных лазеров. Целью является не только теоретическое понимание, моделирование, но и демонстрация макетов лазерных систем с передовыми параметрами.

**Расскажите о разработках лаборатории в направлении развития современной интегральной фотоники? Возможна ли интеграция волоконных лазеров с низким уровнем шума в фотонные интегральные схемы?**

Мы всегда стремимся сделать результаты наших работ общественно значимыми. Стараемся, чтобы каждая конкретная работа обладала практической направленностью, нацеленностью на получение конкретного результата в контексте важных мировых тенденций. Так, в настоящее время, оценивая наши силы – заделы, опыт и знания, мы внимательно следим за тем, что происходит в микроволновой фотонике, стараемся сориентировать работу лаборатории на реализацию долгосрочных целей в этой области. Микроволновая фотоника – это обширная, быстроразвивающаяся область фотоники, которая решает задачи приема, передачи и обработки радиосигналов методами фотоники. Находящаяся на стыке лазерной физики, радиоэлектроники, интегральной оптики, компьютерных и информационных наук, ее цель заключается в том, чтобы заменить сложные, дорогие, часто громоздкие радиоэлектронные устройства (процессоры) более простыми, дешевыми и компактными оптоэлектронными



устройствами, объединяющими такие базовые элементы, как лазеры, волноводы, оптические модуляторы, детекторы, представленные в универсальном и компактном формате. Реализация таких устройств в виде интегральных оптических чипов является современным трендом в этой области, в контексте которого работают ведущие в мире компании, такие как INTEL (USA), IMEC (Belgium), CUDOS (Australia). В России это направление долгое время не было представлено, только недавно НПК "Технологический центр" (НПК ТЦ, г. Зеленоград) начал развивать собственную российскую интегрально-оптическую технологию. НПК ТЦ является стратегическим партнером лаборатории. Общая заинтересованность НПК ТЦ в таком сотрудничестве обусловлена необходимостью научного сопровождения разрабатываемой технологии в контексте ее развития в направлении микролазеров и нелинейной оптики волноводов. Выбор нашей лаборатории в качестве долговременного партнера НПК ТЦ не случаен, так как лаборатория обладает достаточной экспертизой в волоконных лазерах и нелинейной волоконной оптике и заинтересована в переносе своих разработок на платформу интегральных волноводных структур. В этом контексте деятельность лаборатории направлена на решение актуальной задачи микроволновой фотоники – разработку лазерных источников с низким уровнем шума.

Со временем лаборатория может стать координирующим центром и основным исполнителем проектов по направлениям "Радиофотоника" и "Нанофотоника", реализуемых совместно с другими исследовательскими организациями. Некоторые результаты совместной деятельности (в т.ч. для биомедицинских применений) могут стать основой для наукоемких коммерческих компаний, в частности, в рамках консорциума по созданию и развитию Центра национальной технологической инициативы по развитию "сквозной" технологии "Фотоника", участником которого является лаборатория.

### **Какие научные разработки лаборатории наиболее приоритетны?**

Наши приоритеты определяются развитием лаборатории в направлении микроволновой фотоники. Ключевым элементом (задающим генератором) любого устройства микроволновой фотоники являются оптические квантовые генераторы (лазеры). Совсем не любой лазер годится для этого. Для того, чтобы лазер был пригоден к использованию в устройствах микроволновой фотоники, он

должен удовлетворять целому набору требований. Основное, самое главное требование – это низкий уровень шума (и прежде всего, фазового шума, который передается радиочастотному сигналу при его обработке в оптическом диапазоне). Из всего многообразия существующих лазеров этому требованию потенциально удовлетворяют только два вида лазеров – одночастотные узкополосные лазеры (с шириной линии генерации в кГц-диапазоне и уже) и лазеры с синхронизацией мод в резонаторе, которые вырабатывают строго периодическую последовательность оптических импульсов. Частота следования этих импульсов может быть от нескольких МГц до нескольких ТГц. Оптический спектр таких лазеров представляет собой набор огромного числа эквидистантных отдельных компонент (подобно гребню), поэтому такие лазеры называют генераторами оптического гребенчатого спектра (ОГС). Расстояние между отдельными компонентами в таком спектре строго соответствует частоте следования импульсов, а общая ширина спектра может быть очень большой (что важно для применений в спектроскопии). Однако, для использования в устройствах микроволновой фотоники необходим низкий уровень фазового шума, то есть необходимо, чтобы ширина каждой отдельной спектральной компоненты этого спектра была как можно уже (в кГц-диапазоне и уже). Существующие конструкции таких лазеров громоздки, дороги, требуют сложных средств стабилизации и потому практически непригодны для применений в микроволновой фотонике. Над реализацией компактных и недорогих источников с низким уровнем шума работают многие компании, например OEwave (USA), RIO Lasers (USA), NKT Photonics (Denmark).

Как и с лазерами, мы также стремимся к тому, чтобы сделать наши научные разработки когерентными. Поэтому сфера наших научных интересов весьма ограничена. В приоритете простые решения, направленные на реализацию лазеров с низким уровнем шума (компактные лазерные источники оптического гребенчатого спектра и узкополосные лазеры), исследования физических механизмов, обеспечивающих генерацию и стабилизацию излучения в таких лазерах (Бриллюэновское рассеяние, динамические решетки, резонаторы и микрорезонаторы, эффекты захвата частоты, специальные волокна, солитоны, плазмоники), и, наконец, в сотрудничестве с другими группами, демонстрация возможных приложений разрабатываемых лазеров (датчики, распределенные датчики, устройства микроволновой фотоники,



тестирование новых материалов, медицинские применения).

### **Какие фундаментальные физические принципы заложены в основе работы разрабатываемых в лаборатории узкополосных лазеров?**

В лаборатории изучаются одночастотные и двухчастотные узкополосные лазеры, самостабилизирующиеся через эффекты захвата частоты. Предлагаемый подход основан на развитии концепций случайных волоконных лазеров, Бриллюэновской фотоники, динамических волоконных решеток, узкополосного усиления, волоконных резонаторов с двойным резонансом, которые являются одновременно резонансными как для волны накачки, так и для Стоксовой волны. Схемы активной стабилизации, обычно используемые для стабилизации лазерного излучения в таких резонаторах, являются достаточно дорогим решением и сами приносят дополнительный шум. Их конструкция может быть значительно упрощена, если использовать новые методы пассивной стабилизации резонатора, основанные на эффектах самозахвата частоты. Нами изучены два нелинейных механизма: самозахват частоты моды резонатора полупроводниковым лазером накачки и создание во внешнем резонаторе динамической решетки инверсной населенности. В обоих случаях при достижении накачкой резонанса с кольцевым резонатором, нелинейный механизм поддерживает резонансное состояние – любая медленная расстройка частоты резонатора приводит к согласованному изменению частоты излучения накачки. Реализация этих эффектов в волоконных структурах с двойным резонансом является новым, простым и пассивным решением проблемы стабилизации двухчастотного лазера. В дальнейшем планируется перенос этих механизмов на фотонные интегральные схемы. Предполагается, что самостабилизирующиеся конфигурации лазеров будут перестраиваемыми по частоте и собраны с использованием кольцевых резонансных структур, что станет существенным успехом в развитии отечественных средств микроволновой фотоники.

### **Насколько важна для практических применений работа по уменьшению уровня шума волоконных лазеров?**

Это важно не только для задач микроволновой фотоники, то также для множества других

приложений. Лазерные источники с низким уровнем шума являются основными элементами оптоэлектронных устройств (реконфигурируемые фильтры, системы генерации и измерения микроволновых сигналов, устройства памяти и линии задержки, невзаимные элементы), проходящими на смену традиционным микроэлектронным схемам в системах обработки больших объемов данных, "облачных" решениях, нейросетях и других приложениях, требующих постоянного повышения быстродействия базовых элементов, остро востребованы в системах телекоммуникаций – для повышения скорости передачи и кодирования сигналов, в метрологических и измерительных системах – для повышения точности и качества измерений. Генераторы оптического гребенчатого спектра являются основой для построения лазерных систем атмосферного зондирования (для целей мониторинга экологической обстановки, например), спектрального анализа (в т.ч. биологических материалов, продуктов питания). Появление дешевых узкополосных одночастотных генераторов для использования в системах Рэлеевской и Бриллюэновской рефлектометрии даст толчок широкому применению новых систем мониторинга стратегических объектов (объектов атомной энергетики, железнодорожного полотна, газопроводов, нефтепроводов, в коммунальном городском хозяйстве). Компактные оптические гироскопы на основе интегрированных Бриллюэновских лазеров могут стать частью систем навигации, в том числе, в авиации, беспилотных автомобилях.

### **Что сделано в направлении разработки систем генерации последовательности ультракоротких лазерных импульсов? Где возможны практические применения подобных систем?**

В лаборатории проводятся исследования физических механизмов, приводящих к гармонической синхронизации мод в волоконных лазерах различной геометрии и состава, а также новых физических механизмов, обеспечивающих самостабилизацию работы лазеров в этих режимах. При типичной длине волоконного резонатора в 10 м фундаментальная частота генерации импульсов волоконным лазером на механизме синхронизации мод составляет всего 10 МГц. Поэтому интерес представляют лазеры, работающие на высоких гармониках (>100) от основной частоты резонатора, а именно в режиме гармонической синхронизации мод. Для достижения



такого режима высокая частота должна быть каким-нибудь образом встроена в волоконный резонатор. В лаборатории изучаются новые методы такого встраивания – как за счет взаимодействия между импульсами, так и посредством прямого включения в резонатор элемента, обладающего периодической спектральной передаточной функцией. Программа наших текущих исследований включает эксперименты по использованию высокодобротного микрорезонатора как селективного внутрирезонаторного элемента для гармонической синхронизации мод волоконного резонатора через механизм диссипативного четырехволнового смешения и генерации последовательности импульсов с частотой следования 100–1000 ГГц. Эти цели должны быть достигнуты в коллаборации с нашим партнером (НПК ТЦ), разрабатывающим элементы интегральной оптики на основе нитрида кремния.

Основным недостатком волоконных лазеров, работающих в режиме гармонической синхронизации мод, сдерживающим их широкое применение, является то, что генерация импульсов в них сопровождается значительным джиттером импульсов (фазовым шумом). В лаборатории проводятся экспериментальные и теоретические исследования как механизмов, ответственных за образование шума, так и новых механизмов, обеспечивающих самостабилизацию режима гармонической синхронизации мод (т.е. подавление шума). В частности, изучается возможность применения динамических Бриллюэновских решеток, решеток инверсной населенности и оптоакустического взаимодействия в лазерной среде для этих целей.

**Испытываете ли действия санкций, примененных к нашей стране, и используете ли санкционное давление как возможность расширения возможностей лаборатории?**

В значительной степени усилия лаборатории направлены на развитие отечественной элементной базы фотоники, и микроволновой фотоники, в частности. Санкционного давления мы напрямую не испытываем. Но как наверно и все другие лаборатории испытываем трудности с неоправданно усложненными процедурами закупки оборудования и необходимостью пользоваться посредническими структурами для этих целей. Это же касается трудностей с оплатой публикаций, участия в конференциях, командировочных расходов и другой,

ничем неоправданной бюрократией, оставшейся у нас с советских времен. В этом смысле мы живем под давлением санкций, которые сами на себя и наложили.

**Разрабатываете ли вы новые проекты, и какие из них появятся в самое ближайшее время?**

В рамках наших обязательств по развитию лаборатории мы обязаны участвовать в конкурсах и запускать пару новых проектов в год. Сейчас подготовлены проекты по плазмонике и по медицинским применениям лазеров. Традиционно на базе лаборатории совместно с физиками работает группа биологов. Отмечу, что инициатива по созданию такой междисциплинарной группы также исходила от А.С.Куркова. Результаты обнадеживающие. Узкополосные лазеры определенных длин волн могут быть использованы для разработки целого ряда биотехнологий, начиная от методик фотодинамической терапии различных поверхностных новообразований и заканчивая управлением биохимическими процессами в методах клеточной терапии. Тут сделаны только первые шаги, надеюсь, уже через год появятся результаты, о которых мы сможем рассказать подробнее.

**Где публикуются результаты ваших исследований и разработок?**

В научных журналах. По требованию полученных грантов мы обязаны публиковаться в журналах первого и второго квартиля. Это важно для того, держать нос по ветру мировых тенденций, ощущать научный контекст своих исследований, быть оцененными мировыми экспертами, сверять свои результаты с направлениями исследований ведущих групп.

**Что бы вы хотели рассказать нашим читателям? С чем бы вы хотели обратиться к молодежи?**

Хочу сказать, что им очень повезло. Сейчас все так быстро развивается, особенно фотоника. У молодого поколения существует уникальная возможность строить свою жизнь с учетом этих обстоятельств. Знания становятся не просто дополнением к профессии. Они становятся средой обитания, инструментом, которым приходится пользоваться каждый день, чаще чем телефоном, обеденной ложкой, необходимым атрибутом настоящей и будущей жизни, который всегда окупится независимо от того сколько часов, дней и лет вы потратили на их приобретение...

Спасибо за интересную беседу!