

2. Скорость агрегации для разных образцов крови, оцененная из сравнения этой зависимости с экспериментальными данными, имеет значения, лежащие в интервале от 0.2 до 0.8 с⁻¹. Для выяснения причины столь широкого диапазона значений скорости агрегации эритроцитов и их связи с другими параметрами крови требуются дополнительные исследования.

Изменение формы детектора в силу симметрии представленной модели не приводит к качественным изменениям результатов.

Следует отметить, что построенная модель не полностью учитывает кинетику агрегации, так как в крови кроме линейных эритроцитарных агрегатов присутствуют еще и двумерные и трехмерные, которые образуются вслед за образованием линейных агрегатов (характерное время образования составляет примерно 45 секунд [1]). Для построения полной кинетики необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования механизмов агрегации эритроцитов. Следующим шагом в построении модели рассеяния на агрегирующих эритроцитах станет учет эритроцитов и эритроцитарных агрегатов, приближенных по форме к действительным.

Применение данного метода моделирования и разработанных программ не ограничивается случаем рассеяния на эритроцитах. Возможен переход к расчету взаимодействия света и ионизирующего излучения с другими клетками и структурами живых тканей.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Фирсову и Ю.И. Гурфинкелю за помощь в проведении экс-

периментов, а также В.В. Лопатину за обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке гранта «Ведущие научные школы России» (00-15-97-843), а также гранта по Междисциплинарному научному проекту МГУ «Оптика крови».

Литература

1. *Priezzhev A.V., Ryaboshapka O.M., Firsov N.N., Sirko I.V.* // J. Biomed. Opt. 1999. **4**, No. 1. P. 76.
2. *Priezzhev A.V., Firsov N.N., Vyshlova M.A. et al.* // Proc. SPIE. 1999. **3599**. P. 9.
3. *Murata T., Secomb T.W.* // Biorheol. 1988. No. 25. P. 113.
4. *Фирсов Н.Н.* // Совр. пробл. биомех. 1994. № 9. С. 85.
5. *Лопатин В.В., Приезжев А.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 5. С. 19 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 5. P. 21).
6. *Кудинов Д.В., Приезжев А.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 3. С. 30 (Moscow University Phys. Bull. 1998. No. 3. P. 39).
7. *Лопатин В.Н., Сидько Ф.Я.* Введение в оптику взвесей клеток. Новосибирск: Наука, 1988.
8. *Кандидов В.П.* // УФН. 1996. **166**, № 12. С. 1309.
9. *Yaroslavsky A.N., Yaroslavsky I.V., Goldbach T., Schwarzmair H.-J.* // J. Biomed. Opt. 1999. **4**, No. 1. P. 47.
10. *Roggan A., Friebel M., Dorschel K. et al.* // J. Biomed. Opt. 1999. **4**, No. 1. P. 34.

Поступила в редакцию
25.07.01

УДК 621.373.826

ДИНАМИКА ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

**В.Г. Воронин, О.Е. Наний, А.Н. Туркин, А.С. Курков, С.Е. Васильев,
О.И. Лобадецкий, Д.А. Губанков, М.Н. Николаев**

(кафедра оптики и спектроскопии)

E-mail: nanii@optictelcom.ru

Экспериментально обнаружен режим спонтанных периодических переключений поляризации выходного излучения иттербиевого волоконного лазера с двойной оболочкой. Установлено, что переключения между двумя ортогональными линейными поляризациями возникают при мощности накачки, превышающей некоторое критическое значение, и период переключений уменьшается с ростом мощности накачки. При мощности накачки выше пороговой, но меньше критической выходное излучение иттербиевого волоконного лазера линейно поляризовано (степень поляризации 0.95 ± 0.03).

Последнее десятилетие XX в. характеризовалось появлением большого числа новых типов твердотельных лазеров и стремительным улучшением их выходных параметров и эксплуатационных характеристик [1–6]. В большой степени эти достижения связаны с появлением полупроводниковых лазеров

и линеек полупроводниковых лазеров с высокими мощностью и к.п.д. и с большим сроком службы [7]. Доступность мощных полупроводниковых источников излучения с узким спектром не только привела к быстрому повышению качества выходных характеристик твердотельных лазеров с традицион-

ной поперечной накачкой [2, 8], но и стимулировала появление и развитие эффективных твердотельных лазеров с торцевой накачкой, в частности лазеров с объемными открытыми резонаторами [1–3, 6–8] и волоконных лазеров [4, 5, 9–11].

Волоконные лазеры отличаются от лазеров с объемными резонаторами существенно большей длиной резонатора, достигающей десятков метров. Большая длина резонатора, широкие линии усиления, хаотическая ориентация активных центров и двулучепреломление волоконных световодов определяют сложную динамику генерации волоконных лазеров [12, 13]. При этом излучение таких лазеров, как правило, деполяризовано.

Иттербиевый волоконный лазер представляет большой практический интерес как источник накачки для ВКР-лазеров и усилителей [6]. В настоящей работе впервые проведены детальные экспериментальные исследования поляризационных характеристик излучения иттербиевого волоконного лазера с двойной оболочкой, что позволило обнаружить сложную динамику поляризации выходного излучения. При малых превышениях накачки W_{pump} над порогом W_0 ($\eta = W_{\text{pump}}/W_0 < 1.78$) выходное излучение линейно поляризовано. Когда мощность накачки становилась больше некоторого критического значения, соответствующего превышению накачки над порогом $\eta_{\text{cr}} = 1.78$, устанавливался режим самопроизвольных переключений между двумя ортогональными линейными поляризациями излучения. Высокая степень линейной поляризации излучения волоконного лазера, обнаруженная при малых превышениях накачки над порогом, является неожиданным результатом, так как излучение исследованных ранее волоконных лазеров представляет собой смесь двух компонент (или поляризационных мод) с ортогональными эллиптическими поляризациями и примерно равными мощностями компонент. Исследование поляризационной динамики излучения иттербиевого лазера при больших мощностях накачки помимо чисто научной цели — изучения нового класса сложных динамических систем — имеет и сугубо практическую цель: установление механизмов деполяризации излучения и их устранение. Разработка волоконных лазеров большой мощности с линейно поляризованным выходным излучением имеет большое практическое значение, так как позволяет увеличить эффективность работы ВКР-преобразователей и усилителей на их основе вдвое.

Экспериментальные исследования проводились с использованием лазера на активном иттербиевом волокне с двойной оболочкой. Накачка этого лазера осуществлялась полупроводниковым лазером с длиной волны излучения накачки $\lambda_{\text{pump}} = 972$ нм, имеющим волоконный выход с диаметром световедущей сердцевины 250 мкм и числовой апертурой 0.22. Пороговый ток полупроводникового лазера 250 мА, выходная мощность при номинальном токе

1.2 А составляла 710 мВт, при максимальном токе 1.4 А — 890 мВт. Излучение полупроводникового лазера вводилось в иттербиевый волоконный световод с внутренней оболочкой квадратного сечения 120×120 мкм, покрытый внешней тефлоновой оболочкой. Внутренняя оболочка обеспечивает большое значение числовой апертуры (0.6) и высокую эффективность ввода накачки (более 95%). Концентрация ионов иттербия в сердцевине активного световода достигает $7 \cdot 10^{19}$ см⁻³, при этом коэффициент поглощения накачки был равен ~ 1.5 дБ/м. Длина резонатора иттербиевого волоконного лазера составляла 30 м, диаметр сердцевины около 6 мкм. В качестве «глухого» зеркала лазера использовался брэгговский отражатель, выполненный в виде периодической решетки показателя преломления длиной 5 мкм в неактивном волокне, согласованном по параметрам с активным волокном. Отрезок волокна с брэгговской решеткой с одной стороны приваривался к активному волокну, а с другой — к волоконному выходу полупроводникового лазера, представлявшему собой отрезок многомодового волокна длиной 1 м с диаметром сердцевины 100 мкм. В качестве «выходного» зеркала использовался аналогичный брэгговский отражатель той же длины, выполненный в стандартном одномодовом волокне. Принимались специальные меры для устранения отражения от торца одномодового волокна.

Поляризационные характеристики излучения волоконного лазера исследовались с помощью измерительного тракта, включающего поляризационную призму, фотоприемники с полосой до 1 МГц, аналоговый и цифровой осциллографы и измеритель мощности. Поляризационная линза была расположена в устройстве, позволяющем плавно изменять ее ориентацию с точностью до 0.1° . Большая расходимость выходного излучения иттербиевого лазера компенсировалась линзой-объективом. Выходное излучение волоконного лазера после прохождения линзы и поляризатора подавалось на измеритель мощности или фотоприемник. Сигнал с фотоприемника направлялся для постоянного визуального контроля на аналоговый осциллограф и спектроанализатор. Наиболее интересные режимы регистрировались цифровым виртуальным осциллографом, временные зависимости выходной мощности оцифровывались и вводились в память компьютера.

Пороговая мощность накачки иттербиевого лазера составляет 180 мВт при токе накачки полупроводникового лазера 450 мА. Вблизи порога генерации (мощность накачки до 320 мВт, $\eta < \eta_{\text{cr}} = 1.78$) выходное излучение линейно поляризовано (степень поляризации 0.95 ± 0.03). При токе накачки более 780 мА (мощность накачки 320 мВт) устанавливается режим самопроизвольных переключений поляризации выходного излучения. Переключения происходят в случайные моменты времени, при этом средний период переключений уменьшается с увели-

чением мощности накачки. Временные зависимости выходного излучения при двух положениях поляризатора-анализатора, определяющих направление поляризации прошедшего излучения, для тока накачки 0.8 А приведены на рис. 1. Из сравнения приведенных осциллограмм (рис. 1, а, б) видно, что излучение лазера поляризовано линейно, причем ориентация

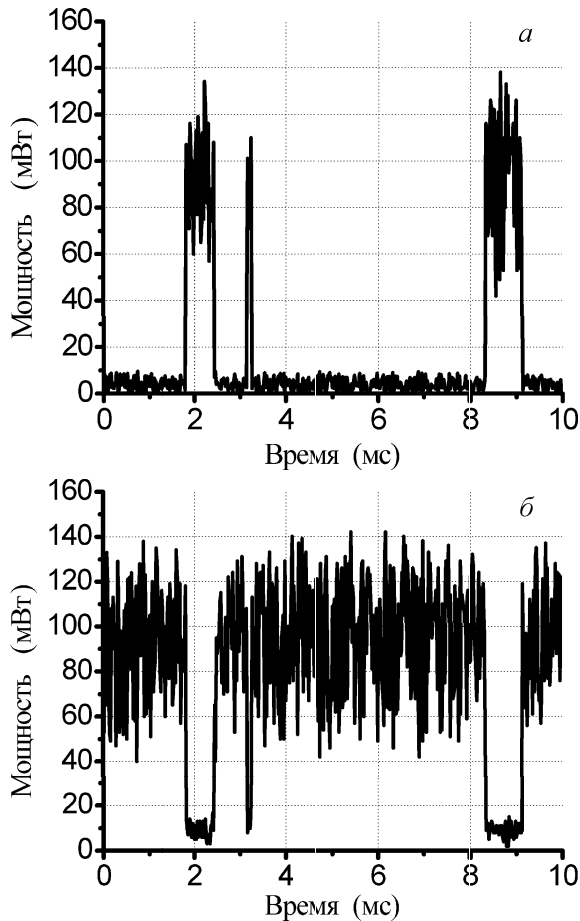


Рис. 1. Временные зависимости выходного излучения при различных положениях азимута оси пропускания поляризатора-анализатора для тока накачки 0.8 А

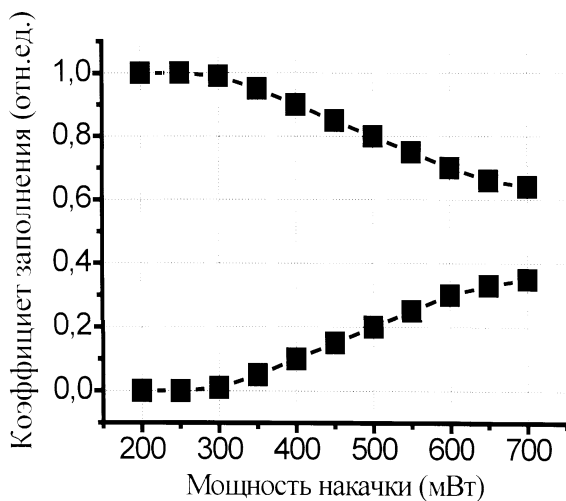


Рис. 2. Зависимости коэффициентов заполнения (отношение средней мощности к импульсной) для излучения двух ортогональных поляризаций от тока накачки

плоскости поляризации выходного излучения время от времени изменяется на ортогональную. Средние импульсные мощности выходного излучения обеих поляризаций приблизительно одинаковы, но средние длительности импульсов различны, в результате чего средние мощности ортогональных компонент при большом времени усреднения отличаются, что иллюстрируется на рис. 2.

Тот факт, что собственные состояния поляризации излучения исследованного лазера линейные, может быть объяснен паразитным линейным двулучепреломлением (фазовой анизотропией), возникающим в процессе изготовления активного волокна с двойной оболочкой.

Анализ экспериментальных результатов позволяет предположить, что исследованный иттербиевый лазер обладает слабой амплитудной анизотропией, так как порог генерации сначала достигается только для излучения, поляризованного вдоль оси с меньшими потерями (обозначим ее как ось x , а ортогональную ей — как ось y). Порог генерации излучения, поляризованного вдоль оси y , достигается при мощности накачки, превышающей пороговую мощность для излучения, поляризованного вдоль оси x , в 1.78 раз (см. рис. 2). Амплитудная анизотропия волоконного лазера не может быть объяснена влиянием механических напряжений, которые возникают при изготовлении внутренней оболочки, имеющей квадратное сечение. Действительно, механические напряжения и отличие формы сердцевинки активного волокна от цилиндрической являются источниками слабой фазовой, а не амплитудной анизотропии [14].

Из факта переключения между двумя ортогональными поляризациями излучения можно сделать вывод о том, что конкуренция ортогонально поляризованных волн достаточно сильна, чтобы препятствовать одновременной генерации двух ортогональных компонент излучения, т.е. коэффициенты кросснасыщения для ортогонально поляризованных волн превышают коэффициенты самонасыщения. Как известно, в отсутствие флуктуаций интенсивности поля внутри резонатора или потерь резонатора в лазере с двумя каналами генерации устанавливается бистабильный режим генерации, если коэффициенты кросснасыщения больше коэффициентов самонасыщения. Случайные флуктуации потерь или интенсивности приводят к переходам из одного квазистабильного состояния в другое и обратно.

Следует отметить, что ранее режим редких переключений каналов генерации наблюдался в кольцевых твердотельных лазерах [15], также обладающих сильной конкуренцией двух генерирующих каналов, соответствующих волнам встречных направлений.

Таким образом, в настоящей работе впервые исследована динамика поляризации выходного излучения иттербиевого лазера. Установлено, что в области малых превышений накачки над порогом

($1 < \eta < 1.78$) излучение линейно поляризовано и степень поляризации $P = 0.95 \pm 0.03$. При увеличении мощности накачки лазер переходит в режим самопроизвольных периодических переключений между двумя ортогональными линейными поляризациями с сохранением высокого значения P . Полученные результаты могут быть качественно объяснены наличием фазовой и амплитудной анизотропии волоконного лазера и сильной конкуренцией ортогонально поляризованных мод, а также наличием флуктуаций потерь в резонаторе лазера. Вместе с тем необходимы дальнейшие исследования для выяснения физической природы амплитудной анизотропии лазера и сильной конкуренции ортогональных линейных поляризаций, а также для установления основных источников флуктуаций, ответственных за переключение поляризации излучения.

Литература

1. *Krupke W.F.* // IEEE J. on Selected Topics in Quant. Electron. 2000. **6**, No. 6. P. 1287.
2. *Vyer R.L.* // IEEE J. on Selected Topics in Quant. Electron. 2000. **6**, No. 6. P. 911.
3. *Воронин В.Г., Наний О.Е.* // Квант. электроника. 1997. **24**, № 10. С. 891.
4. *Курков А.С., Карпов В.И., Лаптев А.Ю.* и др. // Квант. электроника. 1999. **27**, № 3. С. 239.

5. *Курков А.С., Дианов Е.М., Парамонов В.М.* и др. // Квант. электроника. 2000. **30**, № 9. С. 791.
6. *Кравцов Н.В., Наний О.Е.* // Квант. электроника. 1993. **20**, № 4. С. 322.
7. *Streifer W., Scifres D.R., Hainagel G.L.* et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1988. **24**. P. 883.
8. *Machan J., Moyer R., Hoffmaster D.* et al. // Opt. Soc. Am. Proc. ASSI Conf. 1998. P. 263.
9. *Gapontsev V.P., Platonov N.S., Vyatkin M.* et al. // Proc. SPIE. 1999. **3615**. P. 264.
10. *Muendeel M.H.* // Proc. SPIE. 1998. **3264**. P. 21.
11. *Pask H.M., Carman R.J., Hanna D.C.* et al. // IEEE J. on Selected Topics in Quant. Electron. 1995. **1**, No. 1. P. 2.
12. *Wu B., Chu P.L.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 1996. **8**. P. 230.
13. *Lehers R., Froncois P.L., Stephan G.* // Opt. Lett. 1993. **19**. P. 275.
14. *Poole C.D., Nagel J.* Polarization Effects in Lightwave Systems // Optical Fiber Telecommunications. Vol. IIIA. Acad. Press, 1997.
15. *Корниенко Л.С., Кравцов Н.В., Наний О.Е., Шелев А.Н.* // Квант. электроника. 1981. **8**, № 12. С. 2552.

Поступила в редакцию
24.09.01

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 534.23

РАЗВИТИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ СТРУИ В ПРОСТРАНСТВЕ У ОТКРЫТОГО КОНЦА ВОЛНОВОДА

И.В. Лебедева, А.Е. Грушин

(кафедра акустики)

E-mail: lebedeva@acs373a.phys.msu.su

Экспериментально изучаются параметры акустической струи, возникающей на открытом конце волновода, в котором на его резонансной частоте устанавливается интенсивное гармоническое звуковое поле в виде стоячей волны. Используется разработанная ранее методика регистрации и анализа поля скорости. Исследовано пространственное развитие струи вблизи открытого конца волновода на резонансных частотах 175 и 358 Гц при уровне звукового давления в падающей волне 160 дБ. Получена количественная оценка скорости струи и колебательной компоненты скорости.

Акустическое течение в свободном пространстве известно давно, но теория этого явления не разработана и экспериментальные работы по его изучению немногочисленны [1, 2]. В последнее время возник особый интерес к исследованию искусственных струйных течений в связи с возможностью их практического применения. В частности, созданы малогабаритные устройства, которые обеспечивают струйное течение и используются в авиации для увеличения эффективности и стабильности работы гидромеханических агрегатов [3, 4].

Разработанная нами методика регистрации и анализа поля скорости [5] была использована для изучения параметров акустической струи, возникающей на открытом конце волновода, в котором устанавливается интенсивное гармоническое звуковое поле в виде стоячей волны на резонансных частотах волновода.

Цель настоящей работы состоит в исследовании пространственного развития струи у открытого конца волновода и количественной оценке скорости струи и колебательной компоненты скорости.