

УДК 631.373

**В.А. Щербакова<sup>2</sup>, М.В. Ременникова<sup>1</sup>, Е.Е. Самылова<sup>2</sup>,  
Ю.А. Конин<sup>1</sup>, А.И. Гаранин<sup>1,2</sup>, П.В. Карнаушкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Лаборатория фотоники ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ, СОЗДАННОЙ НА КОНУСНОМ ВОЛОКНЕ**

Дается описание эксперимента, демонстрирующего возможность захвата частиц, взвешенных в нефти. Данный тип оптического пинцета можно использовать в научно-исследовательских лабораториях, на химических, фармакологических и других производствах для удержания и сортировки микрочастиц.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, оптический пинцет, оптоволоконные лазеры, конусное волокно.

**V.A. Shcherbakova<sup>2</sup>, M.V. Remennikova<sup>1</sup>, E.E. Samylova<sup>2</sup>,  
Yu.A. Konin<sup>1</sup>, A.I. Garanin<sup>1,2</sup>, P.V. Karnaushkin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Photonics Laboratory of the Perm Federal Research Center  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF AN OPTICAL TRAP CREATED ON A CONICAL FIBER**

The paper describes the experiment demonstrating the possibility of trapping particles suspended in oil. This type of optical tweezers can be used in scientific research laboratories of chemical, pharmacological and other industries for confinement and sorting of microparticles.

**Keywords:** optical fiber, optical tweezers, fiber optic lasers, cone fiber.

### **Введение**

Оптоволоконные лазеры с каждым годом все шире внедряются в различные сферы промышленности и научной деятельности. Свойства лазерного излучения широко востребованы в медицине. Интересен

способ манипулирования клетками в автоматизированном режиме, без внедрения и с минимальными человеческими трудозатратами.

Принцип работы оптического пинцета основан на явлении самофокусировки лазерного луча и захвата частицы в поле излучения лазера. Под действием излучения микрочастицы втягиваются и удерживаются в фокусе в направлении луча света.

Свободно взвешенные микрочастицы ускоряются в направлении луча света за счет силы давления света и попадают в устойчивые потенциальные ямы [1].

Геометрически выстроить микроскопические объекты можно с помощью аксиконного наконечника оптического волокна [2]. Путем формирования нужного угла конуса посредством химического травления плавиковой кислотой достигается одиночное оптическое улавливание и связывание частиц в ближнем (а также в дальнем) поле [3].

По теореме равного распределения было установлено [4], что жесткость удержания частицы зависит от размера объекта и угла конуса аксикона. Крепче удерживаются частицы с большим размером при большем угле конуса наконечника волокна.

Нельзя исключить влияние тепловых сил [5, 6] на среду и на сами частицы под действием непрерывного излучения лазера. Это является основной проблемой существующих лазерных пинцетов.

## **1. Методика эксперимента**

Для опытов был изготовлен макет иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1080 нм [7], схема которого изображена на рис. 1. В качестве активной среды использовалось волокно с многокомпонентной оболочкой GTWave, легированное ионами иттербия; длина активного контура составила 34 м. Накачка лазера производилась лазерным диодом с мощностью 8 Вт и центральной длиной волны 976 нм через пассивную жилу волокна GTWave. Лазерный диод был приварен к пассивной жиле со смещением для ограничения выходной оптической мощности лазера ниже порогов лучевой стойкости исследуемой среды.

К концам активной жилы были приварены брэгговские решетки с резонансной длиной волны  $\lambda_{BG} = 1080$  нм, коэффициент отражения решеток  $R$  составлял 100 и 30 %. Волоконный лазер работал в непрерывном режиме, спектральная ширина лазера – 0,2 нм.

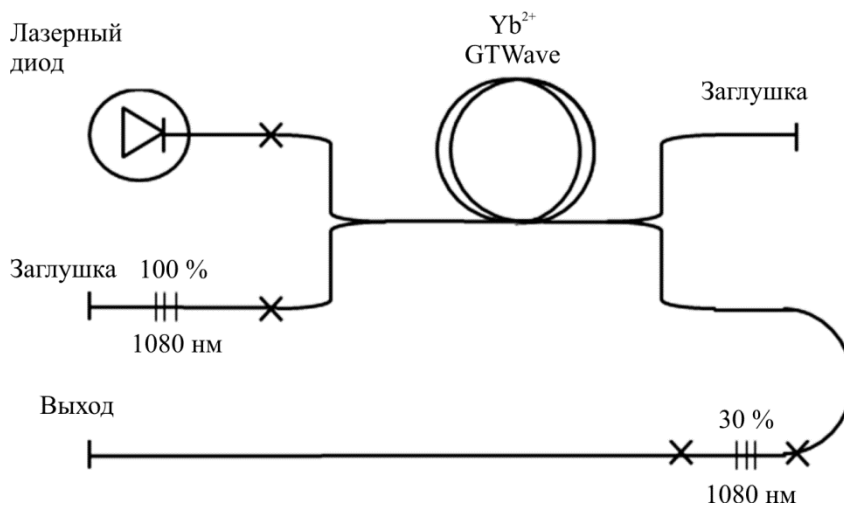


Рис. 1. Схема экспериментального иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1080 нм

Максимальная мощность излучения данного лазера с учетом встроенного аттенюатора составила 44 мВт. Величину выходной мощности можно было варьировать (рис. 2).

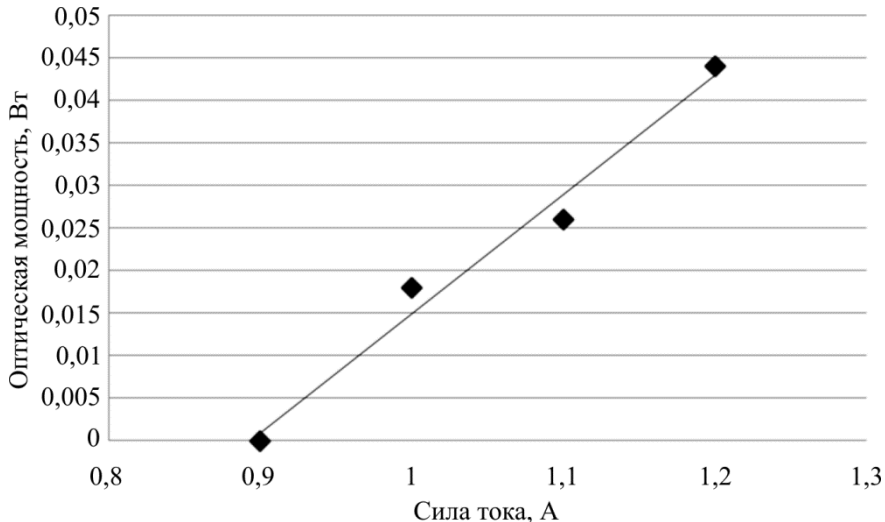


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от тока накачки лазерного диода

К выходу лазера было приварено волокно SMF 28 производства компании Corning. На выходном торце данного волокна с помощью химического травления в плавиковой кислоте был сформирован акси-

кон с углом раствора конуса  $26^\circ$ . Данная линза имеет фокусное расстояние не более 5 мкм и диаметр перетяжки 2 мкм в воздухе. Геометрические параметры аксикона представлены на рис. 3.

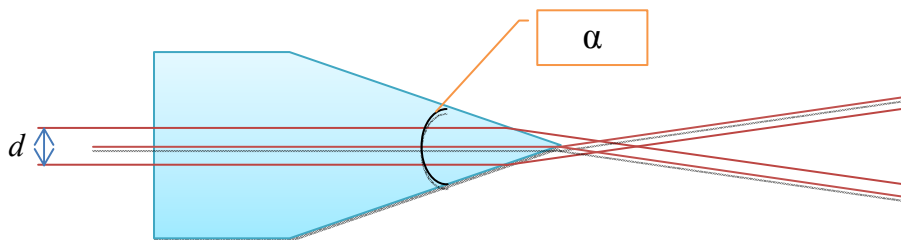


Рис. 3. Геометрические параметры аксикона:  
 $d$  – ширина пучка, равная 10 мкм;  $\alpha$  – угол раствора конуса

В качестве исследуемой среды использовалась неочищенная нефть с месторождения Талакан, НГДУ «Сургутнефтегаз», с точки отбора УДР ДНС 1СТ (Северный Талакан), без примеси реагентов, которая была отобрана 3 марта 2015 г. Физико-химические параметры и углеводородный состав нефти Талаканского месторождения указаны в отчете [8]. Жидкость встряхивалась перед исследованием для устранения расслоения компонентов.

Образец исследуемой жидкости помещался на лабораторное стекло. Выходной конец волоконного световода с аксиконом погружался в жидкость и фиксировался малярным скотчем. Лабораторное стекло закреплялось на предметном столике микроскопа Levenhuk 320 с цифровой камерой Levenhuk D320L NG. Далее производилась фото- и видеофиксация действия лазерного излучения на исследуемую жидкость и измерялись геометрические параметры (рис. 4).

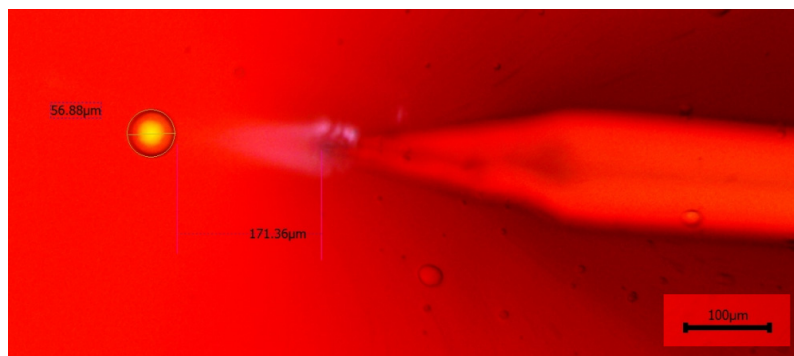


Рис. 4. Геометрические параметры частицы, захваченной в оптическую ловушку

Для количественной оценки производилось моделирование скорости втягивания частиц и силы воздействия на них со стороны лазерного излучения. Полученные данные сравнивались с экспериментальными.

## 2. Результаты эксперимента

В результате лазерного воздействия через аксикон на нефть был выявлен эффект захвата лазерным излучением содержащейся в нефти капли воды; масса капли составляла 0,771 мкг. Мощность лазерного излучения варьировалась от 0 до 44 мВт. Нефть из Талаканского месторождения имела плотность  $\rho = 844,1 \text{ кг/м}^3$ , кинематическую вязкость  $\nu = 17,68 \text{ мм}^2/\text{с}$  и динамическую вязкость  $\eta = 0,01492369 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Оценка предельной скорости частиц в вязкой среде производится по формуле

$$v = \frac{2qPr}{3\pi c\omega_0^2\eta},$$

где  $q$  – доля света, эффективно отраженного от сферы,  $q = 0,062$ ;  $P$  – мощность излучения;  $c$  – скорость света;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости.

Соответствующая сила, действующая на частицу, рассчитывается из закона Стокса:

$$F = 6\pi r\eta v.$$

Расчетные данные были сведены в таблицу.

Сила втягивания частиц

$P$ , Вт	$\nu$ , мкм/с	$F$ , нН
0	0	0
0,018	240,70	1,93
0,026	347,68	2,78
0,044	588,38	4,71

Измеренная скорость капли воды при мощности лазера 0,018 Вт составила  $282,0 \pm 14,1$  мкм/с. Сила, действующая на нее, равна  $2,26 \pm 0,11$  нН соответственно.

Кроме того, при увеличении мощности лазерного излучения наблюдается смещение центра оптической ловушки ближе к концу аксикона (рис. 5). Экспериментальные данные представлены на рис. 6.



Рис. 5. Смещение центра оптической ловушки к концу аксикона:  
*а* – на 172,73 мкм; *б* – на 11 мкм

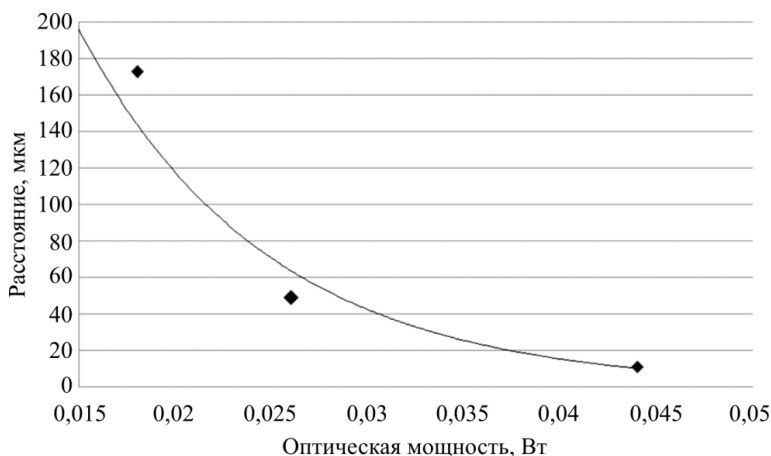


Рис. 6. Зависимость центра оптической ловушки от мощности излучения

За счет рассеяния излучения на частицах жидкости наблюдается визуализация перетяжки лазерного луча (см. рис. 5, *а*).

### 3. Обсуждение результатов

Результаты работы показывают, что оптическое волокно с конусным торцом можно использовать для создания оптического пинцета. В ходе эксперимента было произведено воздействие лазерным излучением с длиной волны 1,08 мкм на эмульсию нефти и воды.

Лазерное излучение фокусируется линзой аксиконом и создает потенциальную яму, в которую стремятся взвешенные в нефти капельки воды размером 20–60 мкм. Вокруг центра оптической ловушки возникают конвекционные потоки, в которые устремляются капельки воды. Наиболее крупные из них попадают в центр оптической ловушки и фиксируются там. Измеренная сила втягивания пинцета для мощности излучения 0,018 Вт составила  $2,26 \pm 0,11$  нН. Кроме того, было обнаружено смещение центра оптической ловушки (см. рис. 5) к концу аксикона при увеличении оптической мощности. Это свидетельствует об увеличении силы втягивания. Расчетные значения приведены в таблице.

Проведенный эксперимент показал возможность захвата частиц, взвешенных в нефти. Данный тип оптического пинцета можно использовать в научно-исследовательских лабораториях, на химических, фармакологических и других производствах для удержания и сортировки микрочастиц.

### Список литературы

1. Ashkin. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // *Phys. Rev. Lett.* – 1970. – Vol. 24, № 4.
2. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Organization of microscale objects using a microfabricated optical fiber. – 2008. – Vol. 33, № 18.
3. Mellor C.D., Bain C.D. Array formation in evanescent waves // *Chem. Phys. Chem.* – 2006. – № 7.
4. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Single-fiber optical tweezers for cellular micro-manipulation // *Biomed J. Opt.* – 2008. – № 13. – P. 42–54.
5. Nichols E.F., Hull G.F. The Pressure Due to Radiation // *Phys. Rev.* – 1903. – Vol. 17, № 26.
6. Debye P. *Ann. Physik.* – 1909. – Vol. 30. – № 57.
7. Курков А.С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства. – М., 2012. – 184 с.
8. Захарова С.С. Химико-технологические основы переработки углеводородного сырья Якутии. – 2014.

### References

1. Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, vol. 24, no. 4, pp. 156–159.
2. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Organization of microscale objects using a microfabricated optical fiber, 2008, vol. 33, no. 18.
3. Mellor C.D., Bain C.D. Array formation in evanescent waves. *Chem. Phys. Chem.*, 2006, vol. 7, no. 2, pp. 329–332.
4. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Single-fiber optical tweezers for cellular micro-manipulation. *Biomed. J. Opt.* 2008, 13, pp. 42–54.
5. Nichols E.F., Hull G.F. The pressure due to radiation. *Phys. Rev.*, series I, 1903, vol. 17, iss. 1, pp. 26–50.
6. Debye P. *Ann. Physik*, 1909, vol. 30, no. 57.
7. Kurkov A.S. Volokonnyye lazery: printsipy postroeniia i osnovnyye svoistva. Moscow, 2012, 184 p.
8. Zakharova S.S. Khimiko-tekhnologicheskie osnovy pererabotki uglevodorodnogo syr'ia Yakutii. 2014.

Получено 27.09.2017