УДК 535.211

**ОПТОВОЛОКОННАЯ СХЕМА ДИАГНОСТИКИ ПРОЗРАЧНЫХ НАНОСУСПЕНЗИЙ**

В.И. Иванов, А.В. Мяготин

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия, 1ivanov@festu.khv.ru, 2tmeh@festu.khv.ru, 3naivi@rambler.ru

*В данной статье анализируется нелинейная линза, индуцированная светом, в оптоволоконной схеме с прозрачной наносуспензией, обладающей электрострикционной нелинейностью. Теоретический анализ светоиндуцированного переноса массы в наносуспензии был проведен для больших интенсивностей излучения гауссовского лазерного пучка, когда изменение концентрации сравнимо с первичной. Нелинейная линза в этом режиме является экспоненциальной функцией интенсивности падающего света. Результаты имеют значение для изучения самодействия излучения в наносуспензиях и оптической диагностики таких материалов.*

Техника тепловой линзы широко используется для оптической диагностики материалов [1-4]. В двухкомпонентной жидкости переток тепла также может вызывать поток концентрации, возникающий из-за термодиффузии (эффект Соре [2]). Еще одним механизмом оптической нелинейности среды являются силы, действующие на частицы дисперсной фазы в градиентном световом поле. Эта оптическая нелинейность была изучена экспериментально и теоретически в наносуспензиях [5] и микроэмульсиях [6] (искусственные Керр-материалы). Нелинейная реакция соответствует кубической нелинейности для малых интенсивностей излучения, поскольку изменение концентрации частиц (и эффективного показателя преломления) пропорционально интенсивности излучения [7].

Цель настоящей работы — проанализировать реакцию линзы, индуцированную светом, в оптоволоконной схеме с прозрачной наносуспензии при высоких интенсивностях излучения.

Рассмотрим схему с оптоволокном и световой линзой. В нашей схеме два коаксиальных волокна вставлены в оптическую ячейку с наносуспензией. Первое волокно генерирует гауссовый луч, а второе связано с фотодиодом для обнаружения мощности прошедшего луча.

Для гауссового луча имеем следующее распределение интенсивности в плоскости, перпендикулярной оптической оси:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |
|  | (2) |

где 𝐼0 — интенсивность излучения на оси в перетяжке луча, 𝜆 — длина волны излучения, 𝑟 — расстояние от оси луча, — радиус перетяжки, 𝑤 (𝑧) — радиус луча на расстоянии 𝑧 от перетяжки,  — конфокальный параметр.

Светолинзовый отклик  показывает изменение интенсивности луча на оптической оси за нелинейным слоем [7]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Сигнал световой линзы определяется прозрачностью линзы ячейки [9]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

где расстояние между двумя концами волокон равно , — нелинейная фаза оптического пути на оси луча.

Далее рассмотрим прозрачную наносуспензию под воздействием лазерного излучения с гауссовым профильным распределением интенсивности [9].

Уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц с учетом диффузии и электрострикционного эффекта, можно записать как [4]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

где  — массовая концентрация дисперсных наночастиц, 𝐷 — коэффициент диффузии, ,  — поляризуемость частиц, — постоянная Больцмана, 𝑛 — эффективный показатель преломления, — скорость света в вакууме,  — интенсивность излучения.

Источником в уравнении (4) является градиентная сила , создаваемая электрическим полем световой волны [5]:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (6) |

В стационарном режиме уравнение (5) принимает следующую форму:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (7) |
|  |  |

Общее решение для уравнения (7) ищется в следующей форме:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

где  — интенсивность «насыщения»,  — нормирующая константа.

Введём безразмерный параметр интенсивности света . Для малых интенсивностей излучения изменение концентрации частиц пропорционально интенсивности радиации ().

Константа нормализации  определяется из закона сохранения числа частиц:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

где 𝑅 — радиус цилиндрической ячейки,  — начальная концентрация дисперсных частиц.

Зависимость концентрации от расстояния до оси пучка была рассчитана для 

Нелинейная фаза  пропорциональна изменению концентрации  на оси пучка (для стационарного режима):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |
|  | (11) |

где 

Рисунок 1 показывает изменение концентрации  на оси пучка в зависимости от нормированной интенсивности 𝛼.

|  |
| --- |
| *α* |
| Рисунок 1. Изменение концентрации  на оси пучка в зависимости от нормализованной интенсивности α. Линейная зависимость представлена для сравнения.  |

В наносуспензии радиус частиц значительно меньше длины волны излучения 𝜆, поэтому показатель преломления среды пропорционален концентрации частиц [8]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (12) |

где;  и  показатели преломления вещества и дисперсионной среды дисперсной фазы, соответственно;  это объемная доля дисперсной фазы,  - это радиус наночастицы- это объем одной наночастицы.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

Таким образом, получено выражение для стационарного отклика световой линзы в наносуспензии. Проведенный анализ позволяет определить не только концентрацию наночастиц, но и транспортные коэффициенты наночастиц [9]. Результаты имеют значение для оптической диагностики дисперсных жидких наноматериалов, включая термолинзовую спектроскопию [10-12].

Работа поддержана грантом Министерства науки и образования Хабаровского края №98С/2024.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самовоздействие гауссова пучка в жидкофазной микрогетерогенной среде / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, А.И. Ливашвили [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 23–24.

 2. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И. Термоиндуцированное самовоздействие гауссова пучка излучения в жидкой дисперсной среде// Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2010. Т. 5. № 1. С. 5–8.

3. Giant optical non-nonlinearities of critical microemulsions / E. Freysz, M. Afifi, A. Ducasse [et al.] // J. Phys. Lett. – 1985. – V. 46. – P. L181–L187.

4. Иванов В.И., Иванова Г.Д. Светоиндуцированная термодиффузия наночастиц // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвузовский сборник научных трудов // под общей ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь : Твер. гос. ун-т, 2016. № 8. С. 135–138.

5. Vicary L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion // Philosoph. Mag. B. 2002. Vol. 82. № 4. P. 447–452.

6. Иванов В.И., Мяготин А.В., Иванова Г.Д. Электрострикционный механизм светолинзового отклика в наносуспензии // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвузовский сборник научных трудов // под общей ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. Тверь : Твер. гос. ун-т, 2017. Вып. 9. С. 205–209.

7. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Kirjushina S.I. and Mjagotin A. V. The concentration mechanisms of cubic nonlinearity in dispersive media // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 735. P.012013.

8. Ивахник В.В., Савельев М.В. Нестационарное четырехволновое взаимодействие в прозрачной двухкомпонентной среде // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 2. С. 227–235.

9. Иванов, В. И. Самовоздействие гауссова пучка излучения в слое жидкофазной микрогетерогенной среды / В. И. Иванов, А. И. Ливашвили // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – № 8. – С. 751–752.

10. Ivanov V.I., Ivanova G.D. A thermal lens response of the two components liquid in a thin him cell // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 735, № 1. P. 012037.

 11. Иванов, В.И. Перспективные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец // Вестник ДВО РАН. 2003. № 1. С. 93–97.

 12. Ивахник, В.В. Влияние дисперсности наночастиц в прозрачной жидкости на пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения / В.В. Ивахник, М.В. Савельев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 9–17.