

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕТОРАССЕИВАЮЩИМИ СЛОЯМИ С РАЗНОЙ УПАКОВКОЙ ЧАСТИЦ

В. П. Дик, А. П. Иванов и В. А. Лойко

Проведено экспериментальное исследование частотно-контрастных характеристик слоев дисперсной среды при двух упаковках частиц: предельно разбавленной и плотной. Показано, что при плотной упаковке частиц проявляются кооперативные явления, приводящие как к ухудшению, так и к улучшению передачи изображения. Определены области пространственных частот и навесок рассмотренного в работе дисперсного вещества, при которых наблюдается увеличение передачи контраста и исследована величина изменения коэффициента передачи модуляции. Приведено объяснение некоторых особенностей передачи изображения плотноупакованными системами.

Одним из основных параметров, определяющих передачу изображения светорассеивающими слоями, является концентрация частиц дисперсного вещества. Изучение зависимости качества изображения от упаковки частиц необходимо для решения большого круга практических задач, например в научной фотографии при поиске оптимальной упаковки микрокристаллов для обеспечения высокого качества передачи изображения.

Теория переноса излучения [1] позволяет определить зависимость частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) сред с независимо рассеивающими центрами от концентрации дисперсного вещества. Из нее следует, что пространственная частота ω , передаваемая с контрастом T , изменяется линейно с концентрацией дисперсного вещества. Указанная закономерность справедлива лишь тогда, когда расстояние между частицами много больше длины волны облучающего света и объемная концентрация дисперсного вещества мала. В средах с близко расположенными неоднородностями появляются эффекты плотной упаковки частиц [2-4]. Они приводят к тому, что зависимость частоты ω от концентрации может отличаться от линейной.

Данная работа посвящена рассмотрению изменений ЧКХ, вызванных концентрационными эффектами. Анализируются два предельных случая: когда частицы дисперсного вещества удалены на большие расстояния и когда они максимально сближены. Сравнение ЧКХ таких слоев позволяет установить некоторые особенности передачи изображения плотноупакованными системами.

Объект исследования был выбран таким образом, что при плотных упаковках имели место эффекты затенения [2]. Они наблюдаются при рассеянии света на ансамблях крупных частиц и обусловлены исчезновением прямого света вследствие экранировки; при этом все фотоны взаимодействуют с частицами и изменяют направления распространения относительно первоначального.

В экспериментах использовалась взвесь частиц крахмала со средним диаметром $d=5$ мкм в воде. ЧКХ разбавленной системы $T_p(\nu)$ (ν — пространственная частота) определялась при объемной концентрации крахмала $c=0.03$. Это соответствовало расстоянию между частицами, в 6 раз большому их диаметра. Чтобы убедиться в отсутствии взаимного влияния рассеивателей, уменьшали объемную концентрацию взвеси, разбавляя ее водой. Анализ показал, что трансформация ЧКХ была вызвана только изменениями геометрических размеров слоя. Это свидетельствовало о реализации светового режима, при котором зависимость рассеяния от упаковки частиц отсутствует [1].

ЧКХ плотноупакованной системы $T_n(\nu)$ определялась для взвеси с объемной концентрацией крахмала $c=0.5$. Эта ситуация соответствовала максимальному сближению частиц крахмала и реализовалась после их осаждения.

Метод определения ЧКХ рассеивающих слоев был основан на исследовании размытия узких световых пучков, которое проводилось на описанной ранее установке. Измерялась функция размытия $E'(x)$ узкой световой полоски (x — расстояние от оси полоски), которая вырезалась из коллимированного пучка света с расходимостью θ щелью малой ширины a , расположенной на расстоянии z от рассеивающего слоя. ЧКХ рассчитывалась по формуле

$$T(\nu) = \frac{S'(\nu)}{S(\nu)}, \quad (1)$$

где $S(\nu)$ — пространственный спектр распределения интенсивности входящего в слой излучения,

$$S'(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} E'(x) \exp(-i2\pi\nu x) dx \quad (2)$$

— пространственный спектр распределения интенсивности в пучке после его размытия в среде.

Для вычисления $S'(\nu)$ осуществлялось численное Фурье-преобразование $E'(x)$ по формуле Филона [5].

Функция $S(\nu)$ рассчитывалась аналитически. При этом учитывалось, что пространственная структура падающего на рассеивающую среду пучка представляет собой картину дифракции Френеля на щели, смазанную вследствие расходимости падающего на щель света [6]. В этом случае распределение интенсивности на входе в среду можно записать в виде

$$E(x) = \left| \frac{1}{\sqrt{\lambda z}} \int_{-\infty}^{\infty} f(y) \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda} \frac{(x-y)^2}{z}\right) dy \right|^2 * \varphi(x), \quad (3)$$

где

$$f(y) = \begin{cases} 1, & |y| \leq \frac{a}{2}, \\ 0, & |y| > \frac{a}{2}, \end{cases}$$

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{\theta z}{2}, \\ 0, & |x| > \frac{\theta z}{2}, \end{cases}$$

λ — длина волны излучения, равная 546 нм. Выполняя Фурье-преобразование $E(x)$, получаем

$$S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x) \exp(-i2\pi\nu x) dx = \frac{\sin(\pi\nu a - \pi\nu^2 z \lambda)}{\pi\nu a} \frac{\sin(\pi\nu z \theta)}{\pi\nu z \theta}. \quad (4)$$

Результаты расчета ЧКХ для слоев с разной навеской и концентрацией крахмала представлены на рис. 1. Каждая навеска характеризуется коэффициентом перекрытия η , под которым понимается отношение площади поперечного сечения всех частиц к площади, на которой они расположены. Штриховые кривые соответствуют разбавленной системе, сплошные — плотноупакованной. По оси абсцисс отложена величина $\tilde{\nu} = \nu d/c$, которую назовем приведенной пространственной частотой. Такой параметр удобен тем, что для дисперсной среды с независимо рассеивающими центрами величина его пропорциональна безразмерной частоте $\nu^* = \nu/\varepsilon$, где ε — показатель ослабления среды. Действительно, при отсутствии кооперативных явлений

$$\tilde{\nu} \frac{d}{c} = \nu \frac{3}{2} \frac{Q}{\varepsilon} = \nu^* \frac{3}{2} Q, \quad (5)$$

где Q — фактор эффективности ослабления [7]. Поэтому построенные в выбранных координатах ЧКХ рассеивающих систем, у которых разная концентрация, но одинаковая навеска дисперсного вещества, совпадают, если частицы рассеивают независимо. Несовпадение ЧКХ свидетельствует о наличии кооперативных эффектов при рассеянии света. Таким образом, как следует из рис. 1, можно констатировать существование кооперативных явлений в дисперсной среде с объемной концентрацией крахмала $c=0.5$.

Эффекты взаимного влияния отдельных рассеивателей могут, как видно из рис. 1, приводить как к ухудшению, так и к улучшению передачи пространственных частот. Две кривые, представленные на рис. 2, соответствуют значениям частот $\tilde{\nu}$ и коэффициентов перекрытия η , при которых кооперативные

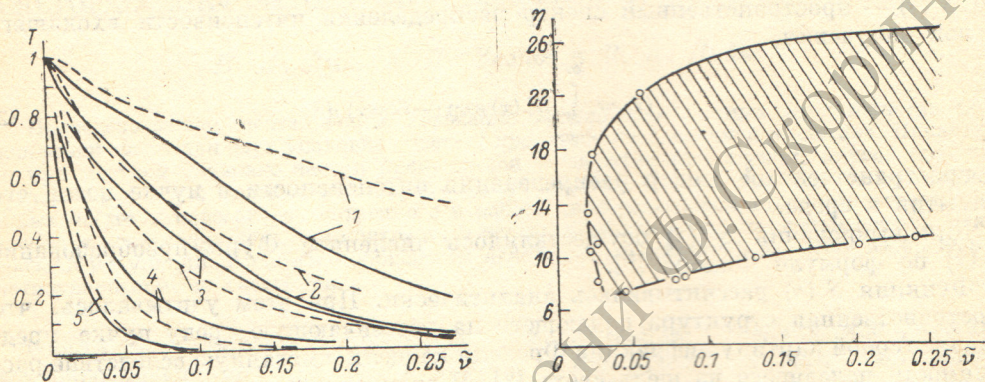


Рис. 1. ЧКХ при разных η .

Сплошные линии — плотный слой, штриховые — разреженный. 1 — $\eta=5.5$, 2 — 8.3, 3 — 11, 4 — 15.4, 5 — 22.

Рис. 2. Области, соответствующие улучшению (заштрихована) и ухудшению (без штриховки) передачи контраста вследствие проявления кооперативных эффектов. Кривые, построенные по экспериментальным данным, соответствуют $T_n = T_p$.

явления не изменяют коэффициент передачи модуляции (КПМ). Область между ними показывает, при каких навесках дисперсного вещества и на каких частотах кооперативные явления приводят к увеличению коэффициента передачи модуляции. В остальных случаях наблюдается ухудшение передачи контраста.

Из рис. 2 можно видеть, что для тонких слоев, коэффициент перекрытия которых $\eta \leq 7$, и для толстых слоев с $\eta \geq 27$ кооперативные эффекты приводят к ухудшению передачи контраста на всех частотах. В промежуточных случаях, когда $7 \leq \eta \leq 27$, в зависимости от частоты может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение КПМ. Область частот, передача которых улучшается вследствие повышения концентрации дисперсного вещества, с увеличением навески расширяется, достигая максимума при $\eta \approx 13$. При дальнейшем увеличении η начинает расти низкочастотная область, соответствующая уменьшению КПМ, и при $\eta \geq 27$ ухудшение передачи контраста происходит на всех частотах. Можно видеть, что при $11 \leq \eta \leq 27$ улучшается передача высоких частот. Однако в области низких частот кооперативные явления приводят к уменьшению КПМ независимо от навески дисперсного вещества.

Рассмотрим изменение КПМ $\Delta T = T_n - T_p$ в зависимости от навески и частоты. Ограничимся случаем $\Delta T \geq 0$, что соответствует улучшению передачи контраста. Как уже отмечалось, улучшение передачи модуляции, вызванное кооперативными эффектами, наблюдается для слоев с $7 \leq \eta \leq 27$. Из рис. 1 видно, что при фиксированной навеске на некоторой частоте $\tilde{\nu}_m$ увеличение КПМ достигает максимального значения ΔT_m . Изменение частоты как в сторону уменьшения, так и увеличения от $\tilde{\nu}_m$ приводит к монотонному убыванию ΔT , и на некоторых частотах изменение КПМ $\Delta T = 0$ (кривые рис. 2). Зависимости максимального увеличения КПМ ΔT_m и $\tilde{\nu}_m$ от коэффициента перекрытия η представлены на рис. 3. С увеличением навески ΔT_m растет, достигает максимума при $\eta=13$, затем убывает. Следует отметить, что увеличение ΔT_m соответ-

ствуется расширению области частот, в которой эффекты плотной упаковки приводят к увеличению КПМ (рис. 2). Частота $\bar{\nu}_m$, как видно из рис. 3, в области $7 \leq \eta \leq 18$ растет с увеличением навески. Такая зависимость сохранится, вероятно, и при больших η , поскольку с ростом количества вещества в слое улучшение передачи контраста наблюдается на все более высоких частотах (рис. 2).

Некоторые особенности передачи изображения плотноупакованными средами можно объяснить, если учесть влияние кооперативных эффектов на ослабление излучения дисперсной средой. В частности, в работе [2] показано, что эффекты затенения приводят к исчезновению прямопрошедшего излучения и уменьшению толщинного показателя ослабления.

В плотноупакованной среде практически весь свет взаимодействует с частицами, что сопровождается расширением функции размытия линии (ФРЛ) в приосевой области. Оно проявляется для слоев с коэффициентом перекрытия $\eta \leq 11$ и тем больше, чем меньше навеска дисперсного вещества. Такая трансформация ФРЛ, как следует из свойств преобразования Фурье, является причиной ухудшения передачи контраста на высоких частотах. Как уже отмеча-

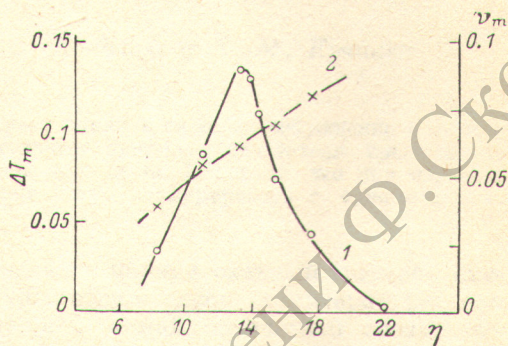


Рис. 3. Зависимость ΔT_m (1) и $\bar{\nu}_m$ (2) от η .

лось, увеличение навески дисперсного вещества в пределах указанного интервала приводит к уменьшению влияния кооперативных явлений на ФРЛ вблизи оси. Это в свою очередь вызывает сокращение области частот, на которых передача контраста плотноупакованной средой хуже, чем разбавленной (рис. 2).

Изменение толщинного показателя ослабления среды при увеличении концентрации дисперсного вещества сказывается на краях ФРЛ, которые формируются многократно рассеянным излучением. Как показано в [8], уменьшение толщинного показателя ослабления приводит к замедлению скорости спада на краях ФРЛ и соответственно к ухудшению передачи модуляции на низких частотах. Поэтому на низких частотах кооперативные эффекты проявляются в уменьшении КПМ. Необходимо заметить, что при увеличении навески все большую роль в формировании ФРЛ играет многократно рассеянный свет. Следовательно, на передаче контраста плотноупакованными слоями все сильнее сказывается уменьшение толщинного показателя ослабления. Как можно видеть из рис. 2, это проявляется для слоев с $\eta > 13$ и приводит к расширению области частот, при которых вследствие кооперативных явлений ухудшается передача контраста. Когда навеска дисперсного вещества $\eta \geq 27$, уменьшение толщинного показателя ослабления приводит к ухудшению передачи контраста плотноупакованными средами на всех частотах.

Таким образом, приводимые результаты показывают, что увеличение плотности упаковки частиц дисперсного вещества может приводить как к увеличению, так и к уменьшению передачи контраста в зависимости от пространственной частоты и количества вещества в слое. Следует ожидать, что закономерности, аналогичные полученным в работе, будут всегда иметь место для систем передачи и регистрации изображения, когда реализуются эффекты затенения. К числу таких систем можно отнести, например, фотослой и фотометрические экраны, оптимизация передаточных характеристик которых представляет собой важную практическую задачу.

Литература

- [1] А. П. Иванов. Физические основы гидрооптики. «Наука и техника», Минск, 1975.
- [2] А. П. Иванов, В. Г. Данилюк. Опт. и спектр., 42, 739, 1977.
- [3] В. Г. Верещагин, Л. В. Мацкевич. Журн. прикл. спектр., 25, 1050, 1976.

- [4] Г. В. Розенберг. В кн.: Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света, 159. «Наука и техника», Минск, 1971.
- [5] В. И. Крылов, Л. Т. Шильгина. Справочная книга по численному интегрированию. М., 1966.
- [6] А. Папулис. Теория систем и преобразований в оптике. М., 1971.
- [7] К. С. Шифрин. Рассеяние света в мутной среде. М. Л., 1951.
- [8] А. Р. Иванов, В. А. Ложек. J. Signal AM, 3, 23, 1975.

Поступило в Редакцию 26 января 1981 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины