

УДК 778.38

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТБЕЛЕННЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ФОТОМАТЕРИАЛЕ ПЭ-2 ИЗЛУЧЕНИЕМ РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА

*И. М. Клиот-Дашинская*

Экспериментально исследованы дифракционная эффективность, голографическая чувствительность и шумовые характеристики промышленного фотоматериала ПЭ-2 при записи отбеленных отражательных голограмм излучением импульсного рубинового лазера. Проведена оптимизация химико-фотографической обработки таких голограмм. Показано, что при увеличении толщины фотослоя его можно использовать для записи импульсных изображательных отбеленных отражательных голограмм.

Применение импульсных рубиновых лазеров при записи изображательных отражательных голограмм, восстанавливаемых белым светом, позволяет существенно упростить процедуру записи голограмм и расширить круг голографируемых объектов. В работах [1-3] сообщалось о получении импульсных неотбеленных отражательных голограмм. В последние годы в связи с интенсивным развитием цветной голографии разработаны методы получения отбеленных отражательных голограмм с высокими значениями дифракционной эффективности (ДЭ) на отечественном промышленном фотоматериале ПЭ-2 излучением непрерывных лазеров [4, 5]. Высокие значения ДЭ и малый уровень дихроичной вуали [6] (что играет положительную роль при регистрации импульсных голограмм с неравномерной интенсивностью излучения в пучках записи) обуславливают перспективность применения отбеливания при записи импульсных изображательных отражательных голограмм. В то же время в литературе отсутствуют данные о шумовых характеристиках отбеленных отражательных голограмм и необходимые для получения качественных изображений данные об их параметрах при импульсном режиме записи. В связи с этим представляется актуальным исследование голографических характеристик промышленных фотопластинок ПЭ-2 при записи указанных голограмм.

Целью настоящей работы являлось систематическое экспериментальное исследование ДЭ, голографической чувствительности и шумовых характеристик отбеленных отражательных голограмм, записанных излучением импульсного рубинового лазера на промышленном фотоматериале ПЭ-2.

В экспериментах в качестве источника излучения для записи голограмм использовался импульсный рубиновый лазер, работавший в режиме свободной генерации с длительностью импульса  $3 \cdot 10^{-4}$  с и энергией 0.1 Дж. На образцах фотоматериала в соответствии с методикой [7] записывались голограммы плоских зеркал, экспозиция варьировалась от  $8 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup>, угол схождения пучков составлял 180°. Голограммы восстанавливались пучком He-Ne лазера с длиной волны 0.63 мкм. ДЭ определялась как отношение потока дифрагированного голограммой в восстановленное изображение к падающему на нее потоку, величины потоков регистрировались с помощью селенового фотоэлемента. Интенсивность шумов  $I_{\text{ш}}$  измерялась под углом  $\sim 1.5^\circ$  к восстановленному пучку с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-51,

По измеренным значениям ДЭ и  $I_{ш}$  вычислялось отношение сигнал/шум. Толщины исследуемых фотослоев измерялись с помощью двойного микроскопа МИС-11 и составляли 4—5 мкм.

Исследовались зависимости голографических характеристик от экспозиции, вида проявителя, времени проявления, концентрации растворителя галогенида серебра в проявителе и способа отбеливания. Для сравнения в работе приводятся голографические характеристики исследуемого фотоматериала при его экспонировании в непрерывном режиме и при проявлении в проявителе ГП-8. В работе рассматривались способы химико-фотографической обработки отражательных голограмм, рекомендованные при записи голограмм излучением He—Ne лазера [4, 5, 8]. В этом случае использовались проявители Д-94 [4], ФГ [8] и промышленный проявитель ВРП, а отбеливание проводилось в отбеливателе Филлипса [4, 9] и в жидких иодных отбеливателях [5, 10]. Кроме того,

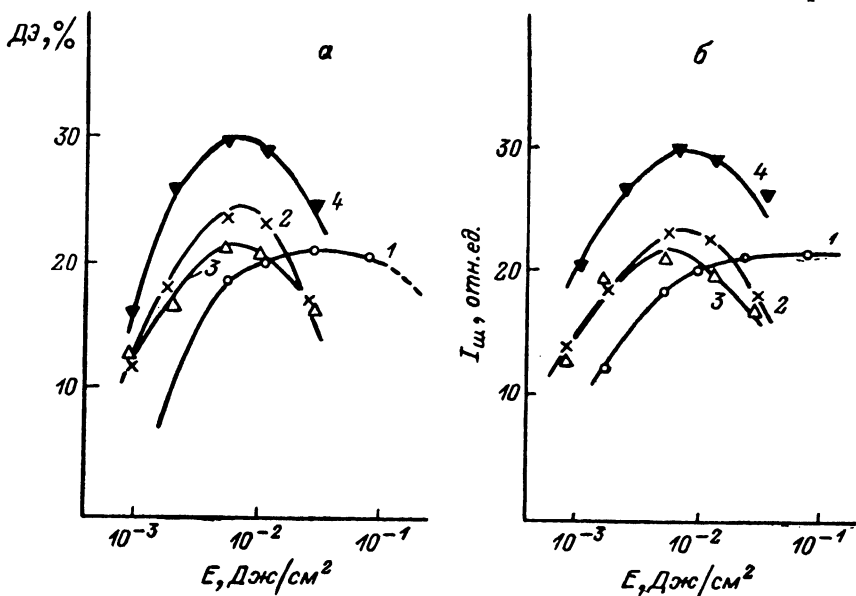


Рис. 1. Зависимости ДЭ (а) и  $I_{ш}$  (б) от экспозиции при проявлении в проявителях Д-94 (1), ФГ (2), ВРП (3), ПГ (4) при отбеливании в парах иода.

Времена проявления, мин: 1 — 24, 2 — 9, 3 — 5, 4 — 15.

с целью получения максимальных величин фазового набег при импульсном режиме записи голограмм был разработан проявитель ПГ следующего состава: гидрохинон — 10 г, сульфит натрия — 20 г, поташ — 60 г, бромистый калий — 7 г, вода до 1 л и использовалось отбеливание в парах иода. В качестве растворителя галогенида серебра применялся роданистый калий, который вводился в рабочие растворы проявителей в количествах от 0 до 8 г/л. Время проявления изменялось от 4 до 48 мин, после проявления голограммы фиксировались в промышленном фиксаже ВРП.

С целью определения оптимального способа проявления были проведены экспериментальные измерения экспозиционных зависимостей ДЭ и интенсивности шума при проявлении в вышеперечисленных проявителях во всем исследуемом диапазоне времен проявления при отбеливании в парах иода и в отбеливателе Филлипса. Полученные зависимости для времен проявления, соответствующих максимальным значениям ДЭ, приведены на рис. 1 для отбеливания в парах иода. Видно, что для исследуемого фотослоя (толщина ~5 мкм) максимальные значения ДЭ ~30 % достигались при проявлении в проявителе ПГ в течение 15 мин. Максимальные значения ДЭ при проявлении в остальных проявителях не превышали 25 %. Значения голографической чувствительности  $E_0$  были приблизительно одинаковы и составляли  $6 \div 7 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup> для проявителей ФГ, ВРП, ПГ и оказались меньшими (около  $2 \div 3 \cdot 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup>) для проявителя Д-94. В то же время диапазон экспозиций,

в котором ДЭ превышала 0.9 ее максимальной значения (характеризующий степень допустимой неравномерности интенсивности записывающих пучков), оказался для этого проявителя приблизительно в 1.5 раза большим. Из рис. 1, б видно, что зависимости  $I_m$  от экспозиции практически повторяют экспозиционную зависимость ДЭ. При нанесении на эмульсионную сторону обработанных голограмм оптического клея ОК72ФТ<sub>15</sub> с целью предотвращения рассеяния на поверхности эмульсии уменьшения  $I_m$  (при неизменном значении ДЭ) не наблюдалось. Эти факты свидетельствуют о преобладании в исследуемом малоугловом рассеянии голограмм голографической записи шумов, регистрирующей установки и рассеяния в непроявленном фотослое [11].

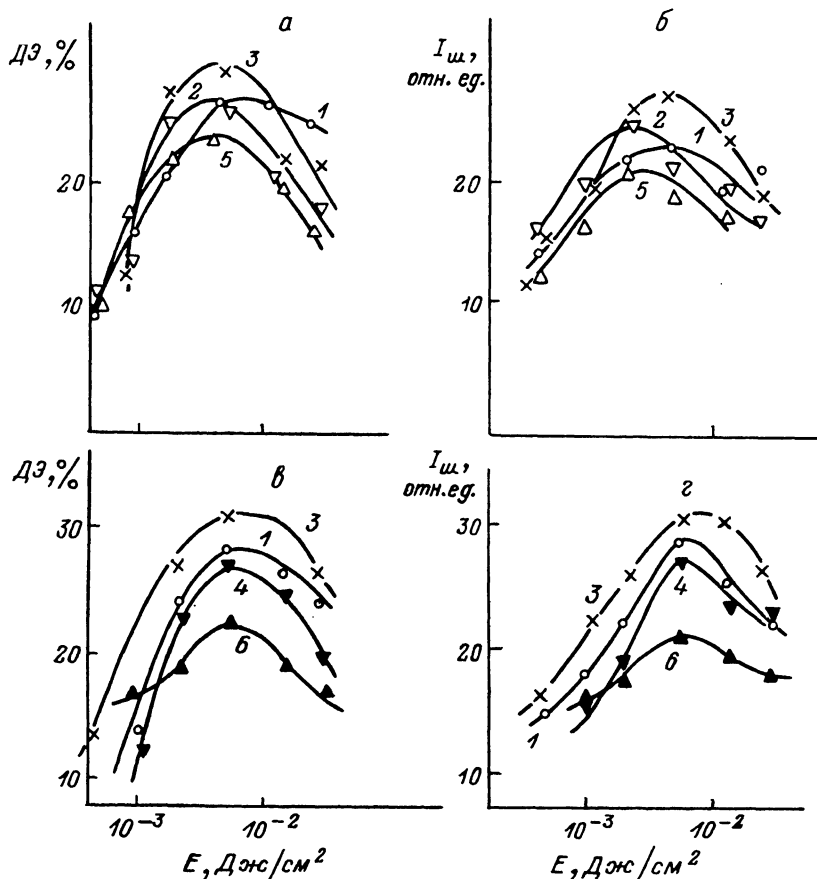


Рис. 2. Зависимости ДЭ и  $I_{ш}$  от экспозиции при проявлении в проявителе ПГ и отбеливании в отбеливателе Филлипса (а, б) и парах иода (в, г).

Времена проявления, мин: 1 — 4, 2 — 9, 3 — 15, 4 — 24, 5 — 36, 6 — 48.

В дальнейших экспериментах более подробно изучались голографические характеристики исследуемого материала при проявлении в проявителе ПГ. На рис. 2 представлены экспозиционные зависимости ДЭ и шумовые характеристики, полученные при отбеливании в парах иода и отбеливателе Филлипса. Видно, что при отбеливании в парах иода достигались большие максимальные значения ДЭ, но отношение сигнал/шум оказывалось несколько меньшим, чем при использовании отбеливателя Филлипса. Отношение сигнал/шум не зависело от времени проявления, было практически постоянным в широком интервале экспозиций в окрестности  $E_0$  и лишь немного уменьшалось при больших отклонениях от  $E_0$  (рис. 3).

На рис. 4 приведены экспозиционные зависимости ДЭ и  $I_{ш}$  при проявлении в проявителе ПГ в течение 15 мин и отбеливании в различных иодных отбеливателях. Видно, что применение предложенного метода отбеливания в парах

иода дало возможность увеличить максимальные значения ДЭ от 27 до 32 % при неизменном уровне шума.

Далее исследовалось влияние концентрации растворителя галоидного серебра в проявителе на голографические характеристики фотоматериала. На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости ДЭ и  $I_{ш}$  от экспозиции

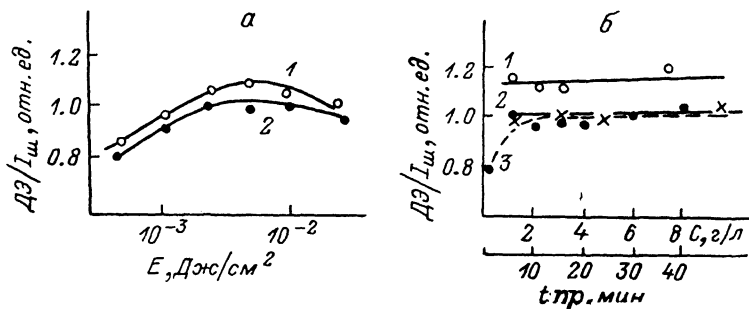


Рис. 3. Зависимости отношения сигнал/шум от экспозиции при проявлении в проявителе ПГ и отбеливании в отбеливателе Филлипса (1) и парах иода (2) (а). Зависимости отношения сигнал/шум от времени проявления при отбеливании в отбеливателе Филлипса (1) и в парах иода (2) и от концентрации растворителя галоидного серебра в проявителе при отбеливании в парах иода (3) (б).

при добавлении в проявитель от 0 до 8 г/л роданистого калия. Видно, что без использования растворителя галоидного серебра ДЭ лишь ненамного превышала 10 %, а добавление 6 г/л позволяло повысить это значение до 32 %; голографическая чувствительность при этом падала более чем на порядок. Отношение сигнал/шум увеличивалось при добавлении в проявитель 1 г/л

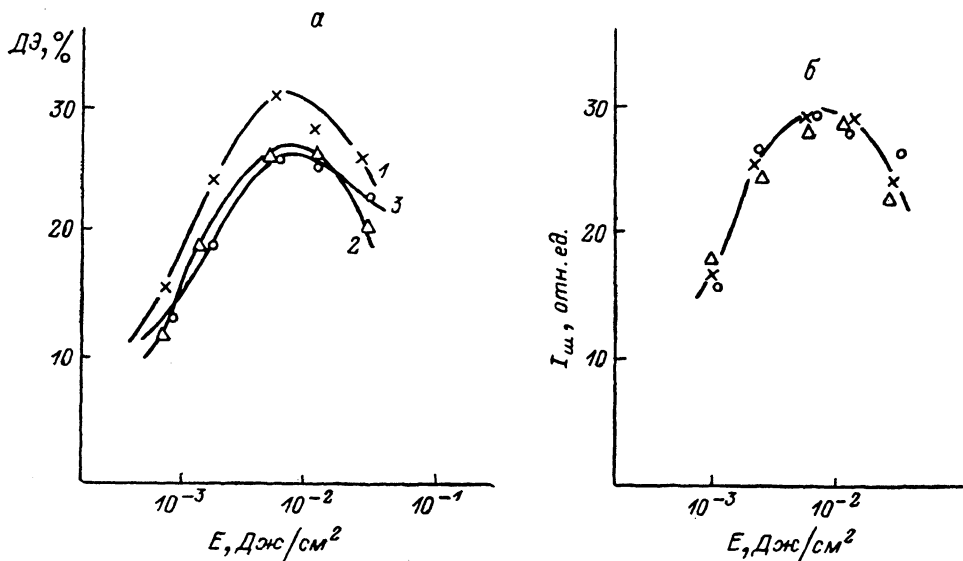


Рис. 4. Зависимости ДЭ (а) и  $I_{ш}$  (б) от экспозиции при проявлении в проявителе ПГ в течение 15 мин и отбеливании в парах иода (1), жидком иодном отбеливателе [5] (2) и прямом иодном отбеливателе [9] (3).

растворителя и далее оставалось постоянным во всем исследованном диапазоне концентраций, поэтому на практике при получении изображений необходимо искать разумный компромисс между возможностями получения максимальных значений ДЭ и необходимых значений голографической чувствительности.

На рис. 6, а приведены экспериментально полученные экспозиционные зависимости ДЭ для отбеленных и обработанных в проявителе ГП-8 голограмм, характерные для импульсного и непрерывного режимов записи. Видно, что ДЭ неотбеленных голограмм практически одинакова для обоих режимов за-

писи, в то время как при отбеливании ДЭ при импульсном режиме оказалась ниже и составляла приблизительно 0.8 значений ДЭ при непрерывном режиме.

С целью определения величин максимальных фазовых набегов, реализуемых при рассматриваемых в работе условиях записи и химико-фотографической

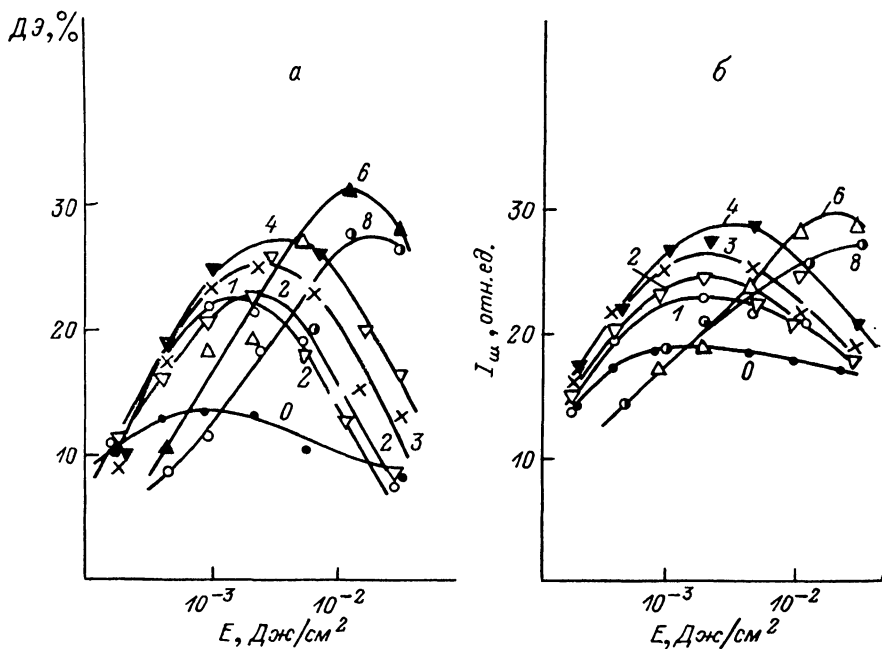


Рис. 5. Зависимости ДЭ (а) и  $I_{ш}$  (б) от экспозиции при проявлении в проявителе ПГ в течение 15 мин и отбеливании в парах иода при различных концентрациях роданистого калия в проявителе.

Цифрами у кривых обозначены концентрации в г/л.

обработки отражательных голограмм, был проведен расчет зависимостей ДЭ от значений максимального фазового набега при учете нелинейности фазово-экспозиционных характеристик реального фотослоя [12, 13]. На рис. 6, б при-

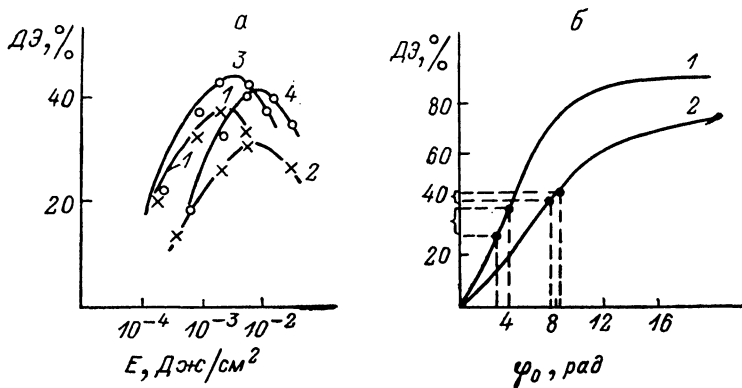


Рис. 6. Экспериментальные зависимости ДЭ от экспозиции для отбеленных (1, 2) и неотбеленных (3, 4) голограмм при импульсном (2, 4) и непрерывном (1, 3) режимах записи (а). Расчетные зависимости ДЭ от максимального фазового набега для отбеленных (1) и неотбеленных (2) голограмм (б).

Точки на кривых соответствуют экспериментальным условиям записи голограмм при импульсном и непрерывном режимах.

ведены расчетные зависимости, полученные при типичных для промышленного фотослоя ПЭ-2 и рассматриваемых условиях записи и обработки голограмм параметрах: величина пропускания обработанного фотослоя  $T \sim 0.8$  при записи

отбеленных и  $T \sim 0.3$  неотбеленных голограмм, соотношение пучков при записи близко к 1. Результаты расчетов показали, что применение предложенной в работе химико-фотографической обработки импульсных голограмм (проявление в проявителе ПГ, отбеливание в парах иода) позволило повысить удельное значение (достигаемое на 1 мкм толщины фотоматериала) максимального фазового набега с  $\sim 0.6$  рад (при химико-фотографической обработке, рекомендованной для непрерывного режима записи в [4]) до 0.8 рад. В этом случае максимальное значение фазового набега на полной толщине фотоматериала 5 мкм составляло 3.2 рад при импульсном и 4 рад при непрерывном режиме записи голограмм. Уменьшение ДЭ отбеленных импульсных отражательных голограмм по сравнению с ДЭ таких голограмм при непрерывной засветке можно объяснить уменьшением максимального фазового набега вследствие невыполнения закона взаимозаменяемости, которое, как видно из расчетных данных (рис. 6), приводит к значительному снижению ДЭ при отбеливании и практически не влияет на ДЭ неотбеленных голограмм.

Таким образом, в работе исследованы голографические характеристики промышленного фотоматериала ПЭ-2 при записи импульсных отражательных отбеленных голограмм. Проведена оптимизация химико-фотографической обработки таких голограмм. Установлено, что максимальный фазовый набег 3.2 рад (при толщине фотослоя 5 мкм) достигается при проявлении в проявителе ПГ с отбеливанием в парах иода.

Проведенные исследования показали, что рассмотренные голограммы обладают высокими значениями максимального фазового набега на единичной толщине фотоматериала при значениях голографической чувствительности, не уступающих полученным для неотбеленных голограмм, а также имеется возможность расширения диапазона экспозиций, в котором ДЭ остается практически постоянной. При увеличении толщины фотослоя до оптимальной при получении отбеленных отражательных голограмм значений 8—10 мкм [14], указанные свойства позволят использовать фотоматериал ПЭ-2 для получения импульсных изобразительных отбеленных отражательных голограмм.

В заключение автор выражает благодарность Д. И. Стаселько за полезное обсуждение и поддержку работы, а также В. Н. Ведерниковой за измерение толщин фотослоев и А. Л. Чураеву за предоставленную возможность регистрации голограмм в непрерывном режиме.

#### Литература

- [1] Кузин В. А., Стаселько Д. И. В кн.: Оптическая голография. Л.: Наука, 1979, с. 85—92.
- [2] Клиот-Дашинская И. М., Стаселько Д. И., Стригун В. Л. Опт. и спектр., 1985, т. 58, № 3, с. 618—622.
- [3] Бруй Е. Б., Клиот-Дашинская И. М., Курсакова А. М., Климо Э. Ф. В кн.: Оптическая голография. Практические применения. Л.: Наука, 1985, с. 117—123.
- [4] Денисюк Ю. Н., Шевцов М. К., Артемьев, С. В. и др. В кн.: Оптическая голография, Л.: Наука, 1983, с. 43—56.
- [5] Кособокова Н. Л., Михайлова В. И., Пальцев Г. П. и др. Тез. докл. V Всес. конф. по голографии. Рига, 1985, с. 381.
- [6] Пальцев Г. П., Кособокова Н. Л., Кракау Ю. А., Шевцов М. К. Тез. докл. республ. семинара «Прикладная голография». Киев, 1984, с. 34—36.
- [7] Воробова Н. Д., Стаселько Д. И. ОМП, 1977, № 4, с. 69—71.
- [8] Денисюк Ю. Н., Загорская З. А., Курсакова А. М. и др. Тез. докл. Всес. конф. «Физические процессы на основе галогенидов серебра». М., 1983, с. 266—267.
- [9] Phillips N. J., Porter D. J. Physics E: Scientific instruments., 1976, v. 9, N 8, p. 631—634.
- [10] Колфилд Г. Оптическая голография. М.: Мир, 1982, с. 397.
- [11] Чураев А. Л. Тез. докл. V Всес. конф. по голографии. Рига, 1985, с. 21—22.
- [12] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. Опт. и спектр., 1984, т. 57, № 4, с. 677—683.
- [13] Клиот-Дашинская И. М. ЖТФ, 1986, т. 56, № 12, с. 2346—2352.
- [14] Hariharan P. Optica acta, 1979, v. 26, N 12, p. 1443—1447.

Поступило в Редакцию  
7 января 1987 г.