

Новый класс оптических аподизирующих диафрагм на основе окрашенных полимеров

С.А.Волянюк, В.И.Безродный, Е.А.Тихонов

Предложены аподизирующие диафрагмы нового класса, получаемые путем градиентного фотообесцвечивания красителей в исходно однородном слое окрашенного полиуретанакрилата с применением адаптированного метода полутени. Для использования внутри резонаторов предлагаются «мягкие» апертуры двух видов: аподизирующие селекторы, применение которых предполагает наличие отдельного модулятора добротности, и селекторы, совмещенные с оптическими затворами (в одном элементе совмещены пассивный модулятор добротности и аподизирующий селектор поперечных мод резонатора). Мягкие апертуры первого вида на основе окрашенного дитиобензильным комплексом никеля полиуретанакрилата использованы для селекции поперечных мод в YAG:Nd³⁺-лазере.

Ключевые слова: аподизирующая диафрагма, окрашенный полиуретанакрилат, импульсный YAG:Nd³⁺-лазер, супергауссов профиль.

1. Введение

Формирование заданного пространственного профиля лазерного излучения необходимо для многих практических задач нелинейной оптики, голографии, лазерной локации и технологии. Один из методов коррекции пространственного распределения лазерного излучения основан на внесении в пучок элементов с радиально-зависимыми оптическими характеристиками. Такими элементами, например, являются так называемые мягкие, или аподизирующие диафрагмы (АД).

К настоящему времени предложен и реализован ряд способов формирования АД разных типов [1–15] – фотографических эмульсий с переменной степенью почернения [2], диэлектрических покрытий, стеклянных оптических фильтров, напыленных металлических слоев переменной толщины [3, 15], растворов красителей, помещенных в кювету с полостью переменной толщины [3], ячеек Поккельса и Фарадея с неоднородными электрическими и магнитными полями [5], элементов на основе наведенного поглощения при воздействии на прозрачные материалы ионизирующей радиации [6], оптических элементов на основе нарушенного полного внутреннего отражения [7].

Исследования в этой области актуальны и сегодня, поскольку многие мягкие апертуры не удовлетворяют всем требованиям к таким элементам. АД на основе фотопленок с переменной степенью почернения, с помощью которых была впервые осуществлена аподизация лазерного пучка, характеризуются самым низким порогом разрушения и плохим оптическим качеством, обусловленным неоднородностью толщины фотопластинок, наличием зерен фотоэмульсии, царапинами и др. [1]. АД на основе однослойных диэлектрических покрытий имеют

малый контраст. Такие АД на практике применяются для корректировки светового пучка после прохождения им дополнительной мягкой диафрагмы, обладающей большим контрастом.

В связи с вышеизложенным создаются новые и совершенствуются предложенные ранее технологии изготовления АД [8–12]. В [13] развивается голографическая технология изготовления зеркал с изменяющейся отражательной способностью. Этот метод позволяет одновременно регулировать частоту и ширину линии лазерного излучения. Авторы [14] предлагают новый аподизирующий элемент – фотополимерную голографическую фазовую пластинку для использования в резонаторе лазера на YAG:Nd с диодной накачкой.

В зависимости от задачи АД могут помещаться на выходе задающего генератора, в различных частях усилительной системы [1], вырезая из усиливаемого пучка пучок с распределением, близким к равномерному, либо внутри резонаторов – с целью селекции основной поперечной моды [8–10, 13, 14].

Применение АД является одним из простых методов предупреждения пространственных неоднородностей, вызванных дифракцией Френеля на апертурах лазерной системы [3]. Дифракция Френеля с градиентами интенсивности ответственна за самофокусировку пучка как целого и мелкомасштабную самофокусировку [16], которые обуславливают разрушение лазерной оптики.

Применение мягких диафрагм в лазерных установках предъявляет к ним ряд следующих требований: 1) наличие пространственного профиля пропускания, близкого к П-образному, но изменяющегося на краях таким образом, чтобы дифракционные выбросы интенсивности подавлялись (одним из таких профилей является супергауссов [1]); 2) наличие заданного (как правило, высокого (более 100) для внрезонаторного применения) контраста пропускания; 3) превышение лучевой стойкостью АД интенсивности канализируемого лазерного излучения; 4) обеспечение с помощью разрабатываемой технологии изготовления АД с практически оправданным рабочим ресурсом.

В настоящей работе решаются несколько взаимосвязанных задач: разрабатывается технология изготовления АД на основе окрашенного полиуретанакрилата, исследуются профили полученных АД, а также изучаются особенности селекции поперечных мод мягкими апертурами в сравнении с селекцией мод жесткими металлическими диафрагмами.

2. Метод формирования АД

При создании АД для лазеров на YAG:Nd^{3+} мы использовали триплексную конструкцию, в которой окрашенная дитиобензильным комплексом никеля (ДБН) пленка полиуретанакрилата (ПУА) толщиной 100–500 мкм формируется в процессе фотополимеризации между стеклянными подложками хорошего оптического качества. Этот материал и технология изготовления триплексов были предложены ранее для пассивных модуляторов добротности твердотельных лазеров [17]. Мы расширяем диапазон использования указанного материала и предлагаем создание на его основе АД.

Спектр поглощения ДБН представлен на (рис.1,б). Спектральный диапазон поглощения используемого красителя перекрывает частоты генерации лазеров, работающих на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ (область 1.06 мкм) неодама во всех известных матрицах. ДБН чрезвычайно стоек к излучению в основной полосе поглощения 1.06 мкм и достаточно легко распадается при облучении в ближней УФ области спектра, где расположены электронные переходы в более высокие состояния. Фотохимические свойства ДБН в ПУА оказались благоприятными для изготовления АД методом градиентного фотообесцвечивания. Оптические характеристики ПУА, полученного методом радикальной фотополимеризации олигоуретанакрилата, приведены в работе [17]. ПУА имеет окно

прозрачности от 0.4 до 1.5 мкм (рис.1,а.), что дает возможность использовать указанный материал для изготовления АД в этом диапазоне, применяя различные красители. Эластичность ПУА обеспечивает высокую лучевую прочность этой полимерной матрицы [18, 19].

Диффузия красителей в ПУА – один из процессов, который может изменять исходный градиентный профиль АД. В работе [20] мы показали на примере кумарина-7, что диффузия молекул красителей в эластичном ПУА происходит достаточно медленно. При концентрации в центре диффузионной области 10^{-3} моль/л (толщина пленки 170 мкм) и 300 К коэффициент диффузии равен $(8.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-11}$ см²/с. Начальная концентрация кумарина-7 в объеме окрашенного полимера (на значительном расстоянии от диффузионной границы) составляла $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л. С увеличением толщины пленки коэффициент диффузии увеличивался (для кумарина-7 – на порядок). Исследования показали, что диффузия красителей в полимерах имеет дисперсионный характер, т.е. уменьшается со временем [21]. Коэффициент диффузии зависит также от размеров диффундирующей молекулы и поэтому различен для разных красителей. Диффузия ДБН (молекулярный вес 629.55) в ПУА происходит более медленно, чем кумарина-7 (молекулярный вес 333). Это обеспечивает необходимое для практического использования время жизни изготавливаемых диафрагм.

Время жизни АД можно оценить по формуле $t_{ad} = l^2/D$, где l – диффузионная длина; D – коэффициент диффузии молекул красителя. При $l = 1$ мм, $D = 10^{-11}$ см²/с время эффективной эксплуатации АД (с учетом только диффузии молекул красителя) составляет 33 года. Таким образом, оптические, фотохимические и диффузионные свойства этой композиции благоприятны для ее использования в данной технологии.

Расчет картины дифракции света на мягкой апертуре показывает, что аподизирующая способность АД (т.е. способность подавлять дифракционные всплески интенсивности одновременно с реализацией возможно большего коэффициента заполнения) возрастает с переходом от гауссова профиля к супергауссову. Супергауссова функция, используемая для описания профилей АД, имеет вид

$$T(r) = T_0 \exp \left[- \left(\frac{r}{R} \right)^N \right]. \quad (1)$$

Здесь $T(r)$ – пропускание в зависимости от расстояния до центра апертуры r ; T_0 – пропускание в центре апертуры; R – расстояние от центра апертуры до места, где $T = T_0/e$; N – порядок супергауссова закона.

Для формирования АД с супергауссовым профилем пропускания путем фотохимического выжигания красителя в пленках окрашенного полиуретанакрилата мы адаптировали метод полутени [22], применявшийся ранее для создания АД на основе галогидосеребряных фотографических пленок. Источником света в этом методе служила лампа накаливания с круглой жесткой диафрагмой и непрозрачным экраном в форме диска. В модифицированном методе полутени источником света выступает УФ лампа с амплитудной маской, которая устанавливается на заданном расстоянии от поверхности полимерной пленки. Амплитудная маска представляет собой жесткую круглую диафрагму в металлической фольге. Требуемый пространственный профиль пропускания АД достигался фотообесцвечиванием окрашенного плоско-

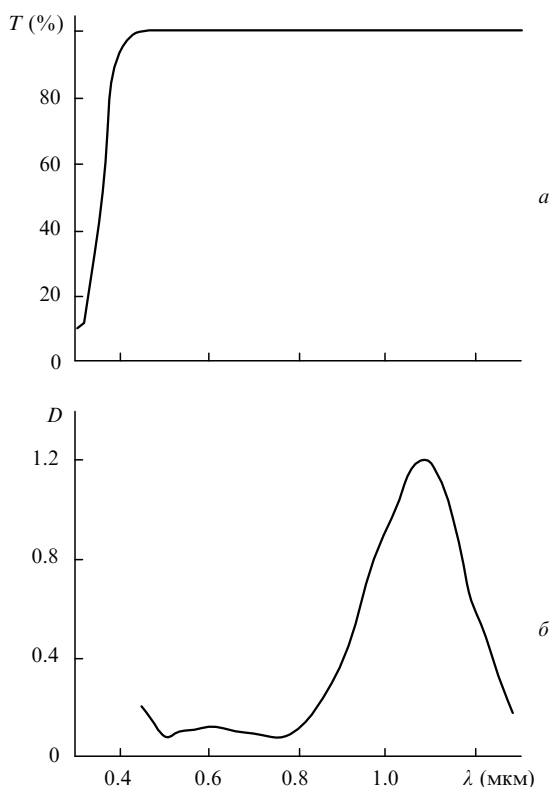


Рис.1. Спектры пропускания ПУА (а) и поглощения ДБН (б).

параллельного слоя полимера УФ светом от указанного источника.

Для усреднения дозы облучения образца в азимутальном направлении исходный окрашенный триплекс с амплитудной металлической маской помещался в специальное вращающееся вокруг собственной оси устройство. Как уже отмечалось выше, фотостойкость ДБН при возбуждении в более высокие электронные состояния невысока. Со временем фотодеградация красителя ускоряется за счет реакций с участием возникающих продуктов распада, содержащих возбужденные молекулы ДБН.

Параметры режима облучения (время экспозиции, положение исходной композиции относительно источника света, использование амплитудных масок разного диаметра) подбирались эмпирически. Заметное разрушение этого красителя (увеличение пропускания на 10 %) наступает уже после 7 ч экспозиции при размещении триплекса на расстоянии 7 см от УФ лампы. При средних временах экспозиции (порядка 30 ч для триплексов с начальным пропусканием 10 %) и сравнительно малых диаметрах амплитудных масок (1 мм) выжигались апертуры с гауссовым профилем (пропускание в центре 35 %).

Профили пропускания, аппроксимируемые супергауссовыми функциями, записывались с увеличением времени экспозиции при неизменных прочих условиях. Выбранный метод не накладывает существенных ограничений на формируемый профиль и на рабочую длину волны АД, позволяя получать АД с заданным контрастом.

Методика позволяет изготавливать АД двух видов: с супергауссовым градиентом поглощения на краях и полным пропусканием в центре, а также АД, совмещенные с пассивным лазерным затвором. При создании АД, совмещенных с пассивным лазерным затвором, пропускание на оси апертуры максимально, но не достигает 100 %, при этом пропускание к краям уменьшается по супергауссову закону. Подобный нелинейный элемент можно использовать одновременно для селекции мод и модуляции добротности. Следует ожидать, что генерация в лазере с подобным элементом будет начинаться на оси на основной поперечной моде и по мере развития моноимпульса растекаться в радиальном направлении, заполняя объем активной среды и препятствуя появлению мод более высокого порядка. Ранее подобные элементы были предложены на основе кристаллов LiF с F_2^- -центрами окраски [23], а также в работе [8].

Преимущество использования для изготовления АД исходно окрашенной полимерной пленки между двумя оптическими поверхностями состоит еще и в том, что ее поверхность в такой АД защищена от механических повреждений (в АД на основе фотопленки с переменной степенью почернения царапины, пылинки, прилипшие к эмульсии, ухудшают ее оптическое качество). Кроме того, относительная простота технологии изготовления и компактность предлагаемых АД предполагают их широкое использование в лазерных системах.

3. Измерение и анализ профилей пропускания АД

Схема установки для измерения профиля предложена на рис.2. Излучение на длине волны 1.06 мкм с частотой 20 Гц, генерируемое импульсным YAG:Nd³⁺-лазером с полупроводниковой накачкой *I*, проходит фокусирующую систему 2, световод 3 и рас-

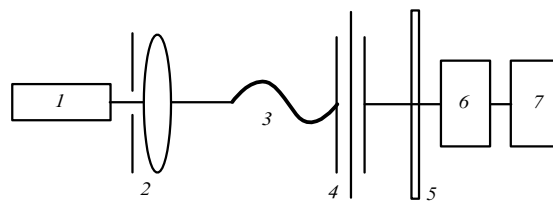


Рис.2. Схема измерения профиля АД.

сеивающую систему 4, частично поглощается АД 5, попадает на ПЗС-камеру 6 и оцифровывается фрейм-грабером 7.

Полученные профили оказались близкими к супергауссовым и аппроксимировались функциями вида (1). Порядок *N* профиля пропускания апертур изменялся в пределах 2–20. Увеличивая диаметр жесткой диафрагмы-маски (при одинаковых временах экспозиции и расстоянии между маской и УФ лампой), можно получить профили от гауссова (*N* = 2) до супергауссова с *N* = 20. Увеличивая время экспозиции при неизменном диаметре амплитудной маски, можно получить АД с требуемой контрастностью I_{\max}/I_{\min} . Надо отметить, что для эффективной работы внутрирезонаторных АД достаточной оказалась контрастность 1.43.

На рис.3 приведены примеры нескольких полученных нами нормированных профилей мягких апертур. Сравним супергауссов профиль АД с *N* = 6, *R* = 2.6 (кривая 3) и гауссов профиль с *N* = 2, *R* = 2.6 (кривая 1). Супергауссово распределение пропускания ближе к равномерному, чем гауссово. В [1] показано, что в случае супергауссова распределения интенсивности на выходе мягкой диафрагмы фактор заполнения больше, нежели в случае гауссова распределения, поэтому энергетический выход установки в первом случае будет больше. Это значит, что при АД с *N* = 6 сечение лазерного стержня будет использоваться гораздо эффективнее.

Нами исследованы АД с плавным градиентом показателя поглощения, совмещенные с пассивным лазерным затвором, и АД, не совмещенные с оптическим затвором. Зависимости пропускания АД обоих типов от координаты представлены на рис.4.

4. Результаты применения АД в лазерных резонаторах

Мягкие диафрагмы с плавным градиентом показателя поглощения мы использовали в резонаторе твердотельного лазера на кристалле YAG:Nd³⁺ одновременно с

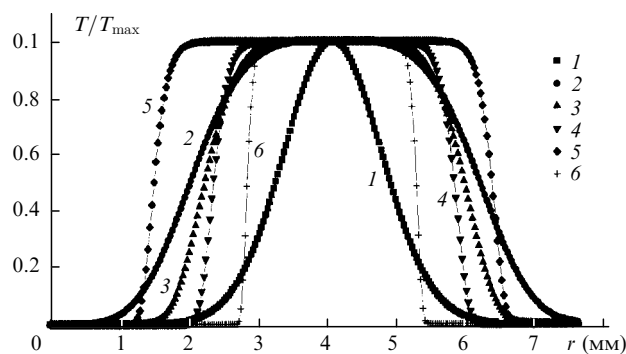


Рис.3. Нормированные профили АД с параметрами экспоненты *N* = 2 (1), 4 (2), 6 (3), 12 (4) 18 (5) и 20 (6) для мягких апертур и радиусами профиля АД 2.6 (1, 3, 5), 3.6 (2), 2 (4) и 1.5 мм (6).

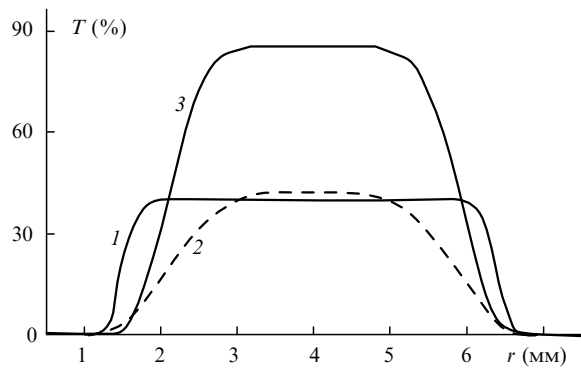


Рис.4. Профили АД, совмещенные с лазерными затворами при $N = 18$ (1) и 4 (2), и АД, не совмещенной с оптическим затвором при $N = 6$ (3).

пассивным лазерным затвором. Известно, что для того чтобы дифракционная картина от мягкой диафрагмы радиусом a сглаживалась на расстоянии z' от нее (в линейных средах), нужно, чтобы изменения числа Френеля $F = a^2/\lambda z'$, вызванные неправильностью или размытием краев, были порядка единицы [1], т. е.

$$\Delta F = 2a \frac{\Delta a}{\lambda z'} = \frac{2\Delta a}{a} F \approx 1. \quad (2)$$

Отсюда можно найти необходимый размер размытия краев мягкой диафрагмы $\Delta a \approx a/2F = \lambda z'/2a$.

Однако при использовании АД внутри резонатора для селекции основной поперечной моды этот принцип, по-видимому, нарушается. Мы исследовали АД в плоском резонаторе (длина резонатора 110 см, диаметр апертуры кристалла YAG: Nd³⁺ 6 мм), используя анализатор лазерных пучков фирмы SPIRICON (модель LBA-300PC). Измерения показали, что полученные АД эффективно осуществляют селекцию высших поперечных мод при изменении F от 1 до 14, а ΔF – от 0.4 до 8.9. Мы также исследовали АД в резонаторе с пассивным модулятором добротности, начальное пропускание которого составляло 11%. При таких условиях генерация на основной моде достигалась с АД, у которой $a = 3.5$ мм, $N = 6$, $F = 10$, $\Delta a = 1.5$ мм, $\Delta F = 4$ и контрастность 1.43.

На рис.5 представлены измеренные в ближнем поле (сразу после выходного зеркала) профили лазерного излучения без АД, с АД и с жесткой диафрагмой диаметром 2.7 мм. Масштаб на рис.5, а–в одинаков, размеры сетки составляют 6.336×5.940 мм. Исследования показали, что мягкая апертура с супергауссовым профилем предотвращает дифракционные выбросы интенсивности и позволяет селектировать основную поперечную моду излучения YAG: Nd³⁺-лазера. Использование жесткой диафрагмы внутри резонатора с таким же числом Френеля обуславливает дифракционную картину Эйри в генерированном излучении. Этот профиль распределения поля уже не соответствует основной поперечной моде и обусловлен дифракцией Фраунгофера на круглом отверстии. Сложное многомодовое излучение лазера получается и в случае применения для селекции жесткой диафрагмы меньшего диаметра по сравнению с диаметром АД. Анализируя рис.5, можно заключить, что при использовании АД внутри резонатора необходимые для селекции основной поперечной моды числа Френеля отличаются от чисел Френеля для жестких диафрагм.

В работах [8, 23] применение АД, совмещенных с пас-

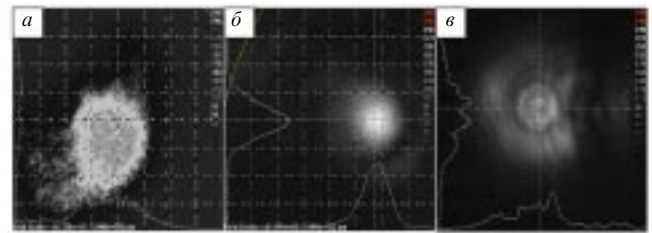


Рис.5. Распределение поля на выходе импульсного твердотельного лазера на кристалле ИАГ: Nd³⁺ в ближнем поле без АД (а) с АД в резонаторе (б) и с жесткой диафрагмой диаметром 2.7 мм (в).

сивными лазерными затворами, обеспечило уменьшение угловой расходимости моноимпульсных лазеров и увеличение яркости за счет селекции мод в режиме нелинейного пропускания. Более детальное исследование селекции мод мягкими диафрагмами будет проведено в последующих работах.

5. Заключение

Исследования профилей пропускания, полученных с помощью АД на основе фотовыжигания полутеневого методом красителя в пленках окрашенного полиуретана-крилата, показали, что метод изготовления не накладывает существенных ограничений на формируемый профиль и позволяет получать АД с заданным контрастом. Мягкие апертуры на основе окрашенных пленок ПУА позволяют выделять в генерированном излучении основную поперечную моду при больших числах Френеля.

Использование жестких диафрагм даже меньшего диаметра (по сравнению с диаметром аподизирующих диафрагм) приводит к появлению в генерированном излучении высших поперечных мод. При использовании мягкой диафрагмы энергетическая эффективность получения основной поперечной моды (отношение энергии основной поперечной моды к максимально возможной энергии основной поперечной моды, полученной с помощью жесткой диафрагмы) при больших числах Френеля составляет 4.3.

1. Лукишова С.Г., Красюк И. К., Пашинин П. П., Прохоров А.М. *Труды ИОФАН*, 7, 92 (1987)
2. Lawrence Livermore National Laboratory. *Semiannual Report UCRL-50021-73-1* (1973).
3. Costich V.R., Johnson B.C. *Laser Focus*, 10, № 9, 43 (1974).
4. Jacquinot P., Roizen-Dossier B. *Progress in optics* (N.Y., North-Holland, Wiley, 1964, v. 3, p. 29).
5. Simmons W.W., Leppelmier G.W. *Appl. Optics*, 13, 1629 (1974).
6. Горшков Б.Г., Иваниченко В.К., Карпович В.К. *Квантовая электроника*, 12, 1453 (1985).
7. Красюк И.К., Лукишова С.Г., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, 3, 1337 (1976).
8. Vinogradsky L.M., Sobolev S.K., Zubarev I.G., Pyatakhin M.V., Senatsky Yu.V., Mizin V.M., Ueda K.-I. *Proc.SPIE*, 3683, 186 (1998).
9. Mizin V.M., Senatsky Yu.V., Sobolev S.K., Vinogradsky L.M., Zubarev I.G. *Proc.SPIE*, 3343, 344 (1998).
10. Vinogradsky L.M., Sobolev S.K., Bykovsky N.E., Zubarev I.G., Pyatakhin M.V., Senatsky Yu.V., Mizin V.M., Ueda K.-I. *X Conf. Laser Optics* (St-Petersburg, Russia, 2000, TuA-p33).
11. Vinogradsky L.M., Kargin V.A., Krotov V.A., Sobolev S.K., Jidkov N.V., Mizin V.M., Senatsky Yu.V. *X Conf. Laser Optics* (St-Petersburg, Russia, 2000, TuA-p36).
12. Cherezova T.Yu., Chesnokov S.S., Kaptsov L.N., Samarkin V.V., Kudryashov A.V. *X Conf. Laser Optics* (St-Petersburg, Russia, 2000, TuA-p34).

13. Pich M., Jeannette D., Massudi R. *X Conf. Laser Optics* (St-Petersburg, Russia, 2000, WeA3-8).
14. Bourderionnet J., Huot N., Brignon A., Huignard J.-P. *X Conf. Laser Optics* (St-Petersburg, Russia, 2000, WeA3-9).
15. Jacquinot P., Roizen-Dossier B. *Progress in optics* (N.Y., North-Holland, Wiley, 1964, v. 3, p. 29).
16. Баранова Н.Б., Быковский Н.Е., Зельдович Б.Я., Сенатский Ю.В. *Квантовая электроника*, **1**, 2435 (1974).
17. Безродный В.И., Тихонов Е.А. *Квантовая электроника*, **13**, 12, 2486 (1986).
18. Бондар М.В., Пржонская О.В., Тихонов Е.А. *ЖТФ*, **58**, 514 (1988).
19. Безродный В.И., Бондар М.В., Козак Г.Ю. *ЖПС*, **50**, 711 (1989).
20. Волянюк С.А., Безродный В.И., Тихонов Е.А. *ЖПС*, **67**, 457 (2000).
21. Волянюк С.А., Тихонов Е.А. *Укр. физ. ж.* **46** 899 (2001).
22. Campillo A.J., Carpenter V., Newnam V.E., Shapiro S.L. *Optics Comm.*, **10**, 313 (1974).
23. Тарасов А.А. *Квантовая электроника*, **9**, 1727 (1982).