

*В.П. Гарицев, М.А. Голуб, С.В. Карнеев, С.Г. Кривошликов,
И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, Г.В. Уваров*

ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ МОД ГРАДИЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К РАДИАЛЬНОМУ СМЕЩЕНИЮ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ПУЧКА

Интерес к селективному возбуждению мод в оптических волокнах отчетливо проявился с середины 70-х годов в связи с необходимостью исследования дифференциальных модовых задержек, дифференциального модового затухания и связи мод в оптических волокнах [1-5].

Однако используемые в работах [1-3] методы возбуждения мод с помощью внеосевого (наклонного или смещенного па-

раллельно оси волокна) лазерного пучка с малым размером пятна на входном торце обеспечивают, в лучшем случае, возбуждение отдельных модовых групп с близкими значениями постоянных распространения мод, принадлежащих к одной группе, причем, селективность возбуждения, за исключением мод низшего порядка, весьма низка.

Возможность селективного возбуждения отдельных близких к отсечке мод как в волокнах со ступенчатым профилем показателя преломления, так и в градиентных волокнах с использованием призмного ввода излучения продемонстрирована в [4], а в [5] при помощи призмного конусного элемента связи получена серия селективно возбужденных мод маломодового ступенчатого волокна. К сожалению, методы селективного возбуждения мод, основанные на применении призмного ввода излучения сложны в реализации, а их распространение на промышленные многомодовые волокна с диаметром сердцевины $50 \div 60$ мкм наталкивается на значительные трудности.

Наиболее очевидный и идейно простой метод селективного возбуждения оптических волокон состоит в создании на торце волокна электромагнитного поля, полностью согласованного с полем возбуждаемой моды или суперпозиции мод. Первой попыткой применения такого метода была работа [6], где для селективного возбуждения мод маломодового (параметр V , определяющий число направленных мод волокна, был равен девяти: $V = 9$) ступенчатого волокна использовалась картина дифракции Фраунгофера на кольцевой апертуре, которая при надлежащем выборе размеров кольца и фокусного расстояния Фурье-линзы является достаточно хорошей аппроксимацией распределения комплексной амплитуды в поперечном сечении сердцевины волокна для случая аксиально-симметричных мод низшего порядка. Таким образом были селективно возбуждены $HE_{11}(LP_{01})$ и $HE_{12}(LP_{02})$ моды, а для возбуждения мод более высоких порядков, в том числе и с отличными от нуля азимутальными индексами, было предложено использовать синтезированные на ЭВМ голограммы, формирующие заданные распределения комплексной амплитуды, которые совпадают с полями возбуждаемых мод.

Использованный в [6] подход к задаче селективного возбуждения мод получил дальнейшее развитие в цикле исследований [7-9]. Применение в этих работах набора сложных пространственных фильтров (каждый из них был образован бинарной амплитудной маской с регулируемым давлением воздуха в ее отверстиях для создания требуемых фазовых сдвигов) позволило генерировать поля, эквивалентные модам Гаусса-Лагерра ψ_{p1} с нулевым радиальным индексом ($l = 0$), при этом селективно возбуждались моды с азимутальными индексами $p = 2, 4, 12$, а также их суперпозиция с $p = 2$ и $p = 12$. В экспериментах [7-9] использовалось существенно многомодовое градиентное волокно с $V = 70$ и длиной ≈ 10 м, но все же, невзирая на впечатляющие результаты, применение предложенных в [7-9] пространственных фильтров не решает всех вопросов, связанных с селективным возбуждением многомодовых волокон и,

прежде всего, в силу сложности самих пространственных фильтров.

Несмотря на уже солидную предысторию, проблема селективного возбуждения мод в оптических волокнах на сегодняшний день не только не потеряла своей актуальности, но даже более того, обогатилась новыми аспектами, связанными, например, с перспективами применения селективного возбуждения в волоконно-оптических датчиках [10], а также с попытками дальнейшего расширения пропускной способности волоконных линий связи за счет использования модового уплотнения, предполагающего использование отдельных мод оптического волокна в качестве независимых каналов связи [8].

Представленная здесь работа является, вероятно, первой удачной попыткой применения синтезированных голограмм для селективного возбуждения мод в оптических волокнах. В экспериментах использовалось многомодовое ($V = 61$) градиентное волокно длиной ≈ 1 м с профилем показателя преломления, близким к параболическому; показателем преломления на оси $n_1 = 1,458$; абсолютной разностью показателей преломления $\Delta n = 0,0145$; радиусом сердцевины $a = 30$ мкм. Схема экспериментальной установки, предназначенной для селективного возбуждения и анализа мод волокна, представлена на рис. 1а,б. Пространственные фильтры $ПФ_1$, предназначенные для селективного возбуждения, также как и пространственные фильтры $ПФ_2$, представляют собой голограммы сфокусированного изображения, синтезированные методом наложения плоской несущей с частотой $\beta_0 = 10$ лин./мм и содержат 256×256 отсчетов с шагом 25 мкм. Были синтезированы голограммы, содержащие аксиально-симметричные ($p = 0$) моды Гаусса-Лагерра ψ_{p1} с радиальными индексами $l = 0 \div 3, 5, 7, 8, 10, 16 \div 18$. Каждая такая голограмма имеет амплитудное пропускание $\psi = \psi_{p1}^*(x, y) \cos(2\pi\beta_0 x)$. При освещении голограммы коллимированным излучением с $\lambda = 0,6328$ мкм в первый дифракционный порядок восстанавливается пучок, имеющий в поперечном сечении амплитудное распределение $\psi_{p1}(x, y)$. Для выделения этого пучка из общей дифракционной картины и согласования его размеров с размерами возбуждаемой моды служит оптическая система, состоящая из линзы L_1 , точечной диафрагмы D и микрообъектива O_1 (см. рис. 1а). Размер перетяжки возбуждающего пучка, создаваемой микрообъективом O_1 , регулировался путем изменения расстояния между O_1 и предшествующей перетяжкой, совпадающей с отверстием диафрагмы D . Контроль размера осуществлялся посредством микроскопа и окулярного микрометра. Критерием согласования размеров служило равенство диаметра темного кольца (первого минимума) в перетяжке пучка, формирующего моду ψ_{01} расчетному значению, в нашем случае приблизительно равному 7,9 мкм. Процесс селективного возбуждения мод волокна заключался в совме-

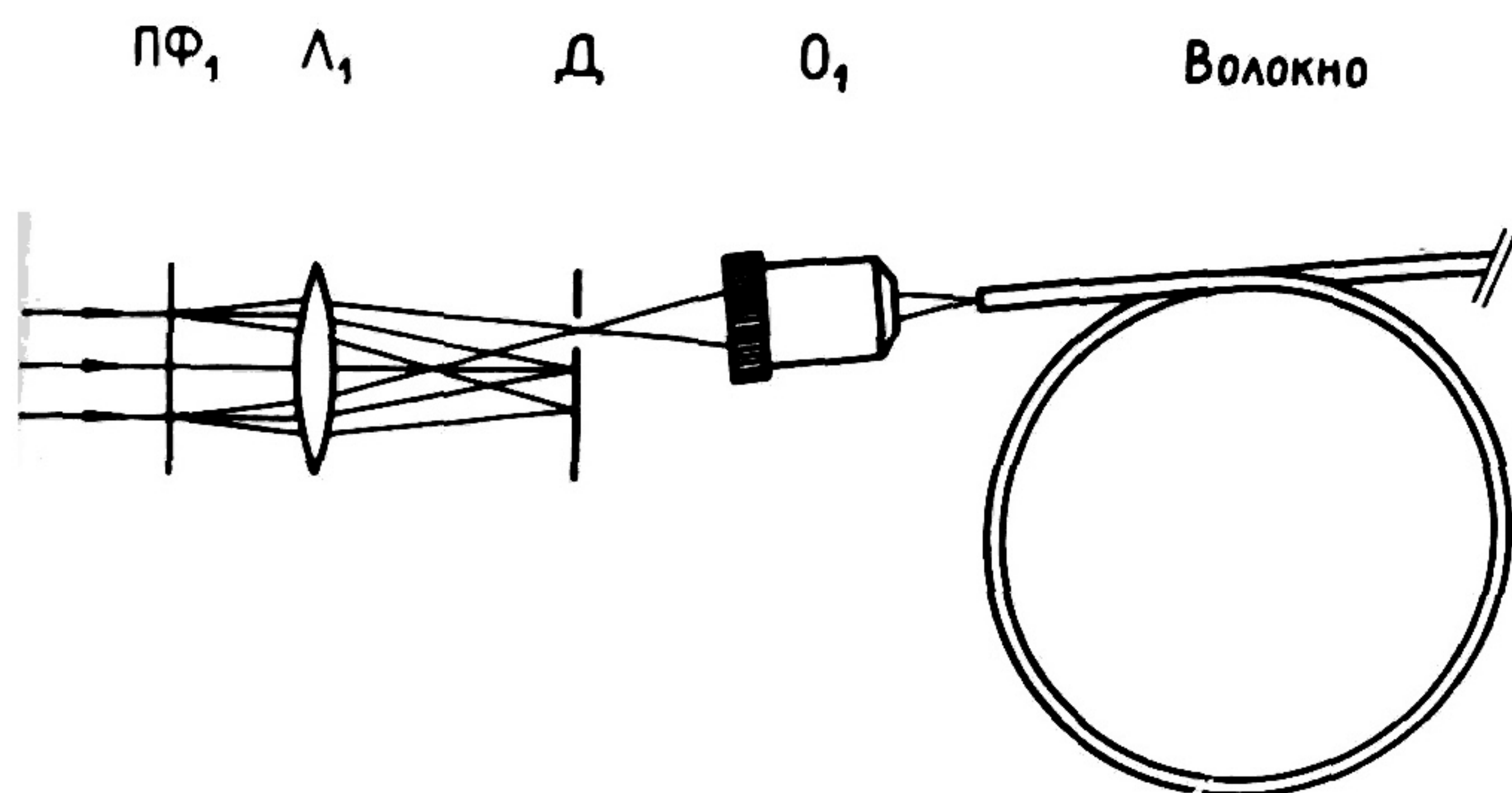


Рис. 1а. Оптическая система для селективного возбуждения мод

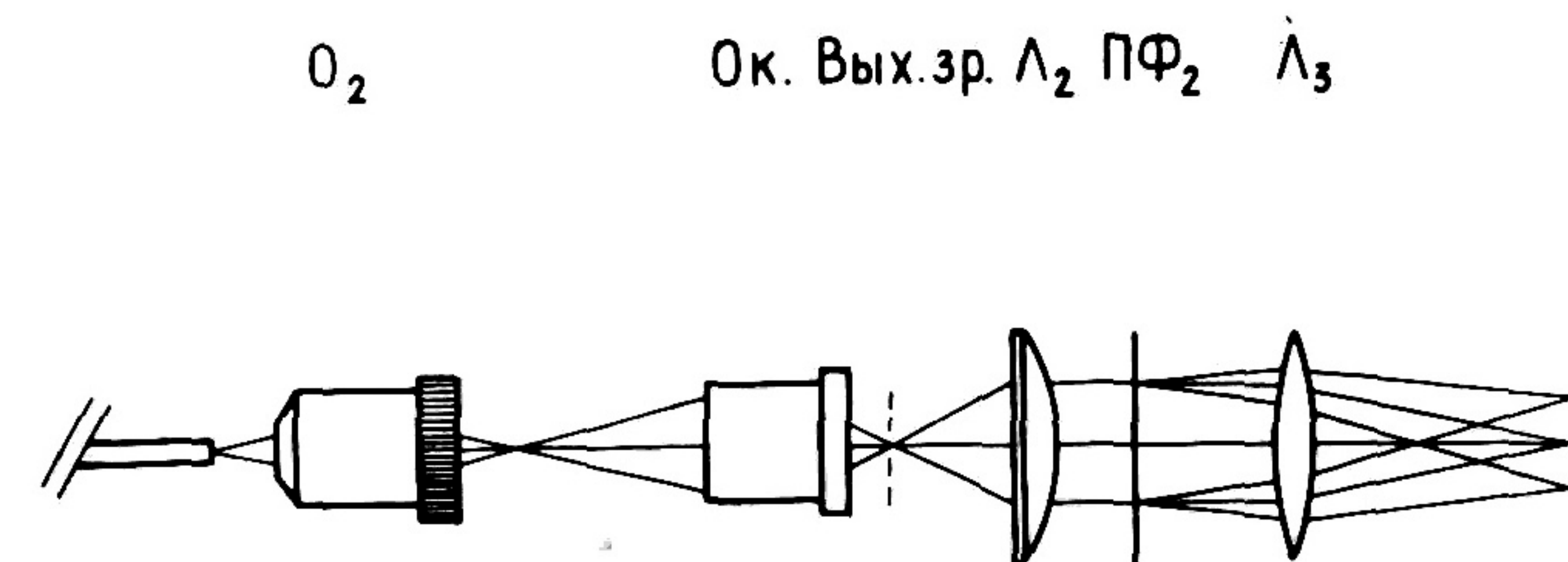


Рис. 1б. Оптическая система для количественного модового анализа

щении торца волокна с перетяжкой пучка, сформированного с помощью соответствующей голограммы и описанной выше оптической системы, а также устранении децентровки и поворотов пучка относительно торца путем юстировки. На рис. 2а представлены фотографии пучков, формирующих моды ψ_{00} , ψ_{01} и ψ_{02} , а на рис. 2б фотографии ближнего поля выходного торца волокна, свидетельствующие о селективном возбуждении указанных мод. Моды с радиальным индексом $l > 2$ селективно возбудить не удалось.

Высокая степень селективности возбуждения мод $\psi_{00} \div \psi_{02}$ подтверждалась также измерениями коэффициентов возбуждения этих и соседних с ними аксиально-симметричных мод с помощью неоднократно описанного нами (см., например, [11]) метода количественного модового анализа, позволяющего в принципе, выделить любую моду из полного набора направляемых мод волокна и измерить ее мощность. Этой цели служит часть экспериментальной установки, изображенная на рис. 1б и состоящая из проекционной системы (микрообъектив O_2 , окуляр Ок и линза L_2), пространственного фильтра $ПФ_2$, Фурье-линзы L_3 и сопряженного с осциллографом линейного формирователя видеосигнала (ПЗС-линейка 1200ЦЛ1).

Применение метода количественного анализа мод в совокупности с описанным выше методом селективного возбуждения сделало возможным экспериментальное исследование зависимости коэффициентов возбуждения K_{r1} мод ψ_{00} , ψ_{01} и ψ_{02} от нормированного по отношению к радиусу основной моды w_0 радиального смещения возбуждающих пучков δ (для использованного в эксперименте волокна $w_0 = 5,6$ мкм). Полученные зависимости $K_{r1} = f(\delta/w_0)$ представлены на рис. 3.

В процессе эксперимента торец волокна смещался относительно возбуждающего пучка с помощью прецизионного устройства, а величина смещения δ измерялась под микроскопом. Кривые, проведенные сплошной линией, являются результатом теоретического расчета, выполненного на основе рекуррентных соотношений для коэффициентов возбуждения мод градиентного волокна, приведенных в [12].

Графики рис. 3 демонстрируют удовлетворительное качественное совпадение теоретических и экспериментальных данных. Причиной расхождения эксперимента и теории, также как и причиной, по которой оказалось невозможным селективное возбуждение мод с радиальным индексом $l > 2$, является, вероятно, отличие профиля показателя преломления использованного в экспериментах волокна от параболического, в силу чего моды волокна в действительности не являются точными модами Гаусса-Лагерра.

Параллельно с экспериментами, описанными выше, селективное возбуждение мод $\psi_{00} \div \psi_{02}$ было осуществлено также с использованием фазовых голограмм, изготовленных путем копирования амплитудных голограмм на фотопленку "Микрат-300" и отбеливания полученных копий в растворе отбеливателя R-10. Фазовая запись голограмм позволила увеличить их дифракционную эффективность в 4÷5 раз, что привело, в свою очередь, к такому же росту светового потока на выходе из волокна. Размещение отрезка возбуждаемого волокна в одном из плеч интерферометра Маха-Цендера (рис. 4) сделало возможной одновременную регистрацию распределения интенсивности и фазы в возбужденных модах. Полученные таким образом распределения интенсивности и соответствующие им интерферограммы представлены на рис. 5.

Результаты настоящей работы свидетельствуют о перспективности использования синтезированных голограмм для селективного возбуждения мод в оптических волокнах. Дальнейший прогресс в этом направлении связан, по-видимому, с применением голограмм, синтезированных с учетом всех особенностей профиля показателя преломления используемого волокна.

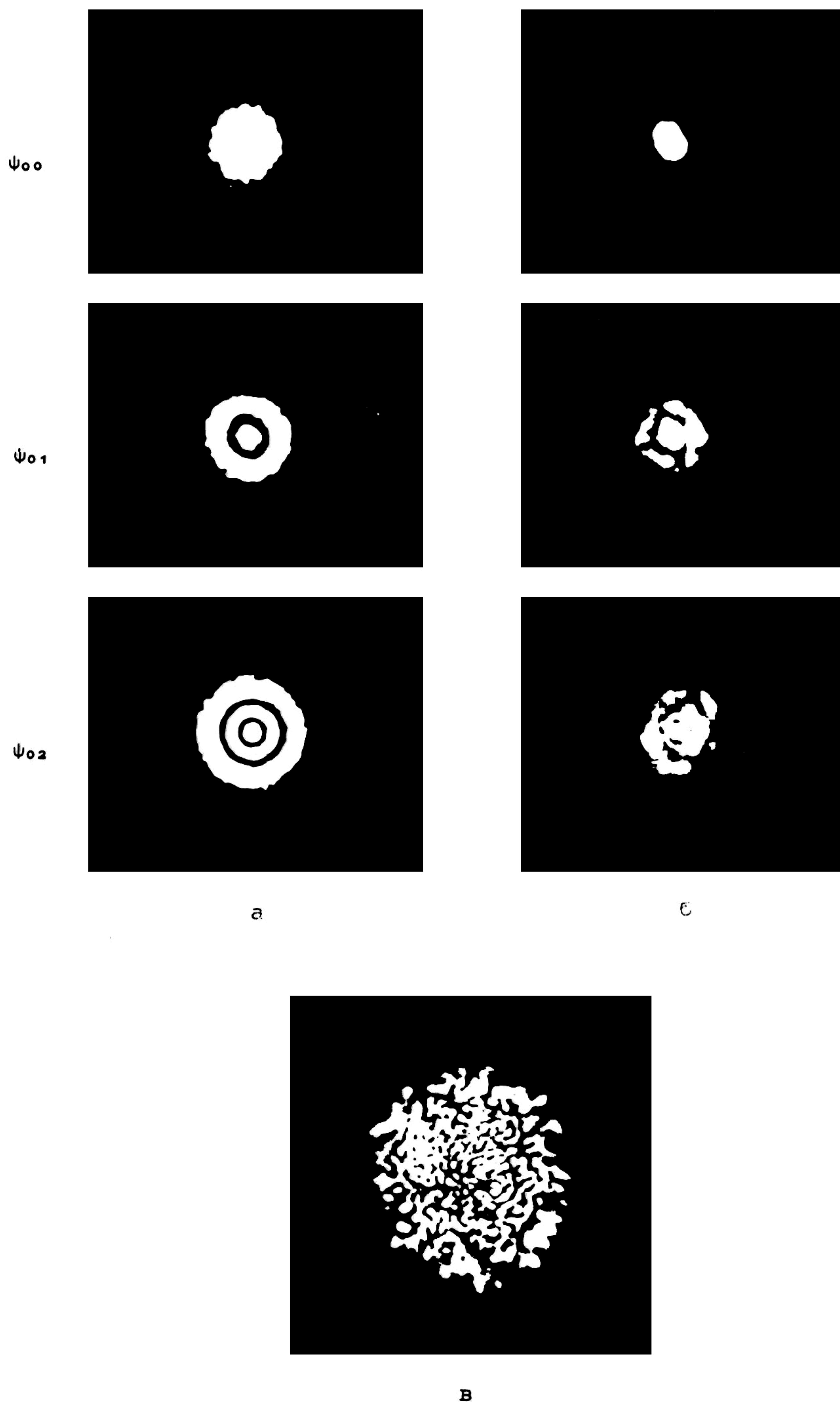


Рис. 2. Распределение интенсивности:
а) в поперечном сечении пучков формирующих моды; б) в ближнем поле выходного торца волокна при возбуждении пучками, представленными на фотографиях слева; в) в ближнем поле выходного торца в случае возбуждения всех направляемых мод

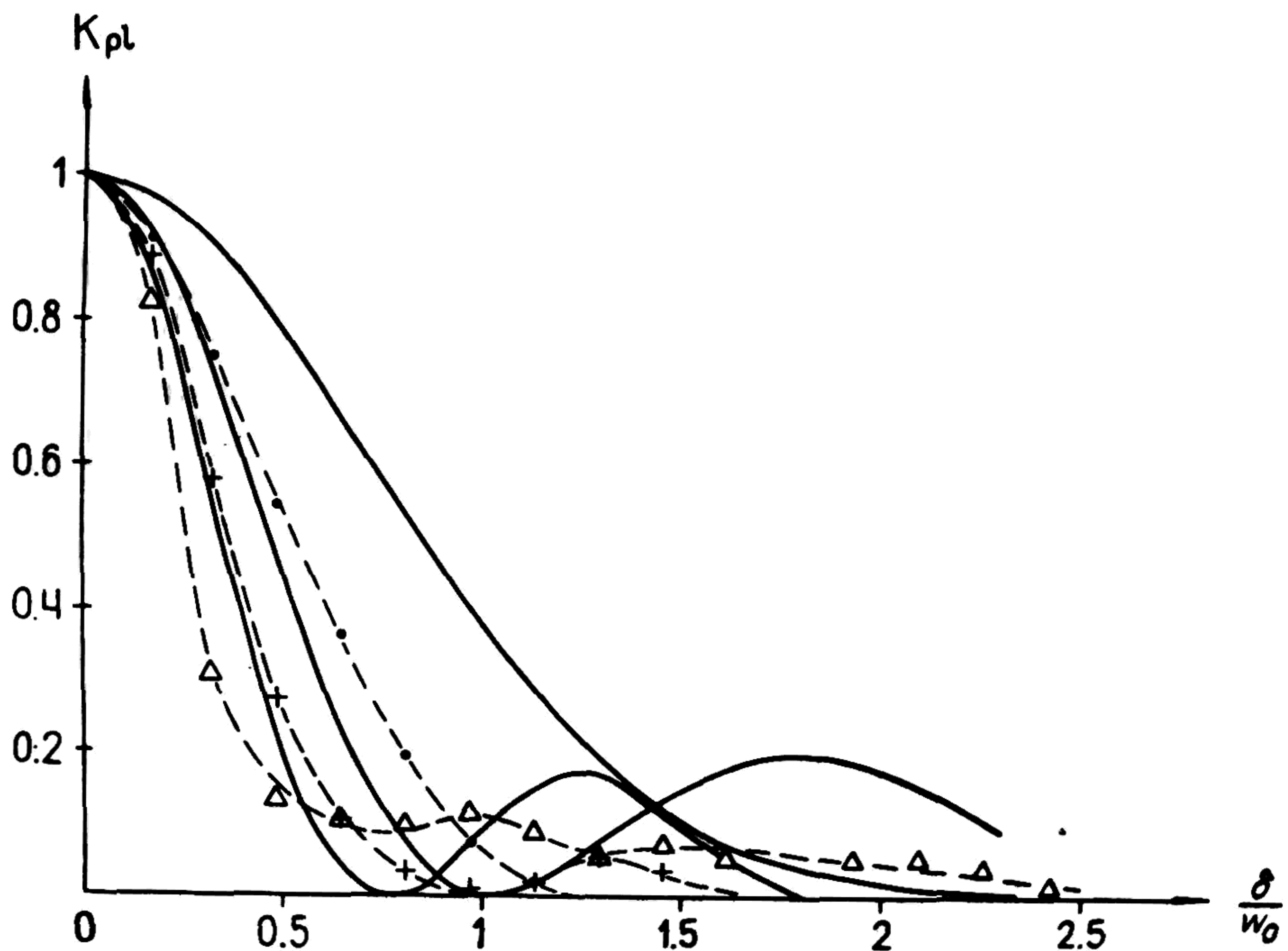


Рис. 3. Зависимости коэффициентов возбуждения мод K_{pl} от нормированного по отношению к радиусу основной моды w_0 радиального смещения возбуждающих пучков δ :
 • — ψ_{00} ; + — ψ_{01} ; Δ — ψ_{02}

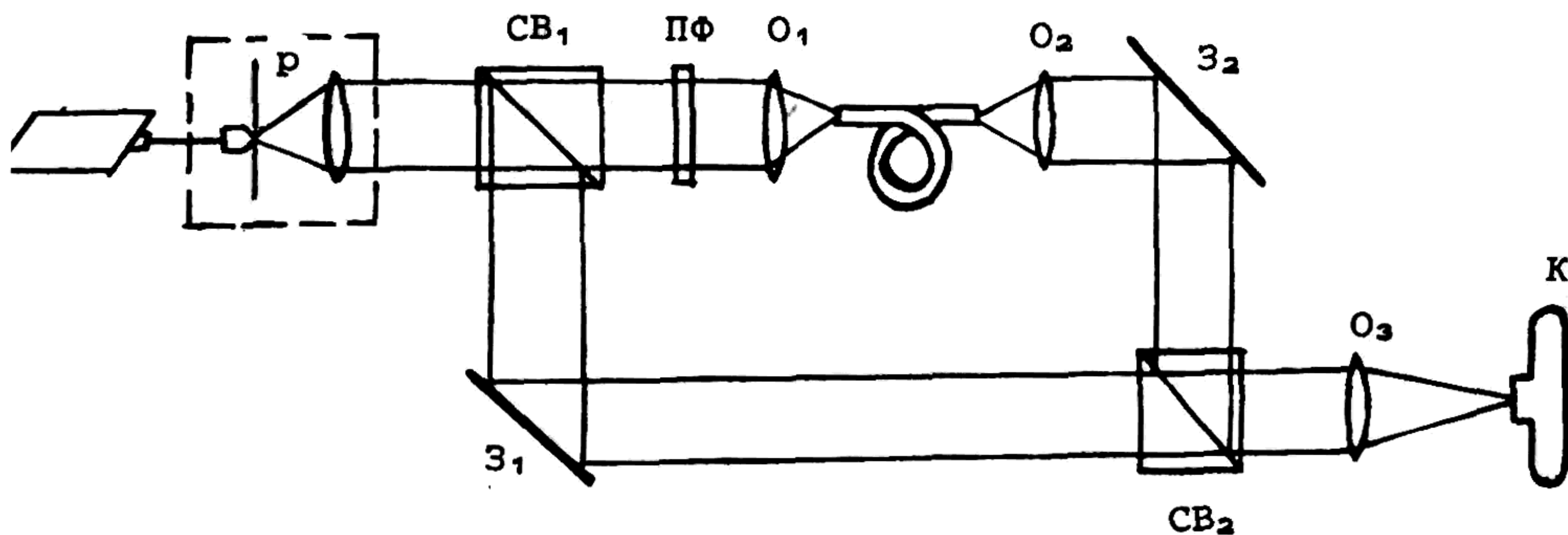


Рис. 4. Возбуждение волокна в схеме интерферометра Маха-Цендера:
 СВ₁, СВ₂ - светоделительные кубики; ПФ - пространственный фильтр-голограмма; З₁, З₂ - зеркала; О₁ ÷ О₃ - объективы (О₁ - панкратический объектив с $f = 9 \div 27$ мм); К - фотокамера

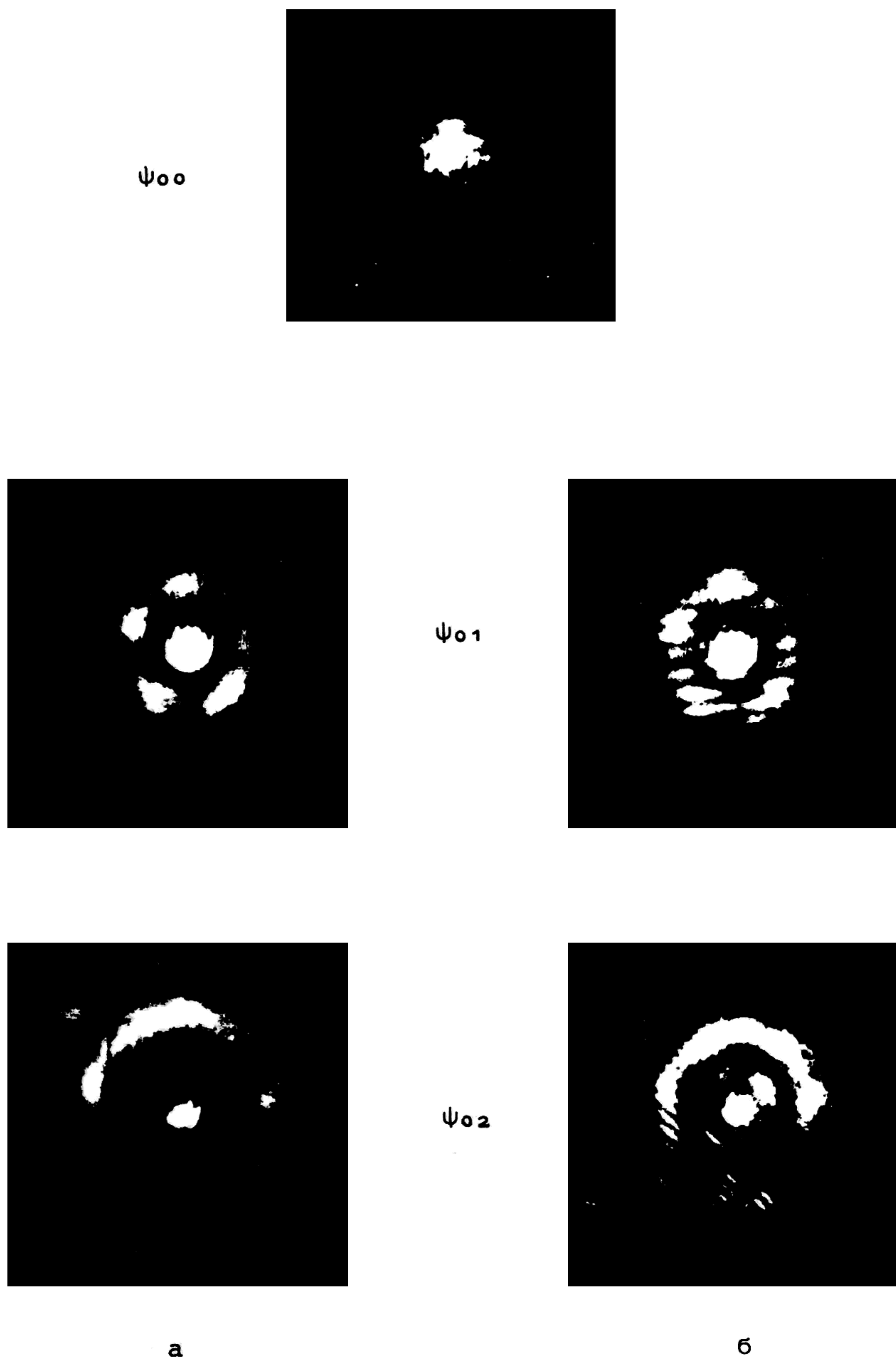


Рис. 5. Результаты селективного возбуждения мод с помощью фазовых голограмм по схеме рис. 4:
а) распределения интенсивности; б) соответствующие им интерферограммы

Л и т е р а т у р а

1. К е с к D.B. Appl. Opt., 13, 1882 (1974).
2. О л ш а н с к у R., О а к с S.M. Appl. Opt., 17, 1830 (1978).
3. J e u n h o m m e L., L a m o u l e r P. Opt. and Quant. Electron., 12, 57 (1980).
4. S t e w a r t W.J. Optical Fiber Transmission. Williamsburg, Va.: OSA/IEEE, January 1975.

5. M i d w i n t e r J.E. Opt. and Quant. Electron., 7, 297 (1975).
 6. K a p a n y N.S., B u r k e J.J., S a w a t a r i T.J. Opt. Soc. Amer., 60, 1178 (1970).
 7. F a c q P., A r n a u d J. Proceedings of Photon 80, Paris, Oct. 21-23 1980 (Quartz et Silice, Pithiviers, France, 1981)
 8. B e r d a g u e S., F a c q P. Appl. Opt. 21, 1950 (1982).
 9. d e F o r n e l F., A r n a u d J., F a c q P. J. Opt. Soc. Amer., 73, 661 (1983).
 10. К р и в о ш л ы к о в С.Г., С и с а к я н И.Н. Препринт ИОФАН № 70 (1986).
 11. G a r i t c h e v V.P., G o l u b M.A., K a r p e e v S.V., K r i v o s h l y k o v S.G., P e t r o v N.I., S i s s a k i a n I.N., S o i - f e r V.A., H a u b e n r e i s s e r W., J a h n J.-U., W i l l s c h R. Opt. Commun., 55, 403 (1985).
 12. K r i v o s h l y k o v S.G., S i s s a k i a n I.N. Opt. and Quant. Electron., 11, 393 (1979).
-