

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АН УССР

На правах рукописи

МЕШВЕДЬ

Наталья Викторовна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ  
ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ  
С СИНТЕЗИРОВАННОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

01.04.04. - физическая электроника,  
в том числе квантовая

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Киев - 1981

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени  
Институте физики АН УССР

Научные руководители: член-корреспондент АН УССР

доктор физико-математических наук  
ШТАК М.Т.

кандидат физико-математических наук  
ГНАТОВСКИЙ А.В.

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН УССР

доктор физико-математических наук  
БРОДИН М.С.

кандидат физико-математических наук  
КАКИЧАШВИЛИ Ш.Д.

Ведущая организация: Киевский ордена Ленина государственный  
университет им. Т.Г.Шевченко

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 198 г. в \_\_\_\_\_ час.  
на заседании Специализированного Ученого совета Д016.04.01 при  
Институте физики АН УССР / 252028, Киев-28, пр.Науки 144/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
физики АН УССР.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 198г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

кандидат физико-математических наук

 /ИЩУК В.А./

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Настоящая работа посвящена разработке и исследованию новых когерентно-оптических методов преобразования лазерного излучения в пучки с требуемыми для практических задач пространственно-угловыми характеристиками.

Известно, что многие разделы науки и техники в последние годы переживают бурное развитие, связанное с внедрением лазеров в практику. Однако практическое применение лазеров не ограничивается только расширением круга задач, успешно решаемых с их помощью. Оно подразумевает также и совершенствование уже известных технических систем, методов исследований и пр., в которых лазеры имеют бесспорные преимущества. А это, в свою очередь, делает необходимым улучшение всех полезных и уникальных характеристик лазерного излучения. Такие свойства лазерного излучения, как узкая направленность пучка, большая спектральная яркость и выходная энергия, высокая степень когерентности превосходят подобные характеристики у других источников света. Но те исследования, которые направлены на улучшение именно этих характеристик, по-прежнему продолжают оставаться актуальными.

При решении многих практических задач требования, предъявляемые к пространственно-угловым характеристикам лазерного пучка, все более расширяются, конкретизируются и ужесточаются. С другой стороны, набор световых полей, генерируемых лазерами, невелик. Известные методы преобразования и формирования лазерных пучков также обеспечивают решение только сравнительно узкого класса задач. Возникает противоречие между потребностью в когерентных полях с заданными свойствами и возможностью их получения. Исследования, которые проводятся в данной работе, способствуют

уменьшению такого противоречия. Они направлены на улучшение характеристик лазерных пучков и на расширение набора пучков, формируемых из лазерного излучения.

Целью работы является разработка новых когерентно-оптических методов преобразования лазерного излучения в пучки с требуемыми характеристиками диаграммы направленности, исследование эффективности и границ применимости этих методов, а также способов их реализации, т.е. изучение конкретных схем и решений, направленных на их использование в практических задачах.

Научная новизна. В работе используется единый подход к формированию пучков с требуемыми пространственно-угловыми характеристиками при помощи внерезонаторных корректирующих систем, состоящих из одноэтапных оптических элементов — фазовых дифракционных транспарантов. В рамках этого подхода решаются две важные самостоятельные задачи. В одной из них рассматривается формирование пучков с различными характеристиками диаграммы направленности из стабильного когерентного поля. В другой, наоборот, обеспечивается стабилизация пространственно-угловых характеристик формируемого пучка независимо от характеристик корректируемых полей. Разработаны и исследованы новые методы и оптические схемы, обеспечивающие решение указанных задач как порознь, так и совместно.

В работе теоретически обосновано и экспериментально осуществлено использование в качестве корректирующих элементов специальных фазовых масок, которые обеспечивают требуемое перераспределение энергии в формируемых пучках. Благодаря применению фазовых масок с несколькими градациями фазы получено эффективное преобразование энергии по сечению пучка из различных поперечных мод лазера в пучки с равномерным распределением энергии. Впервые

предложены корректирующие системы, состоящие из двух оптически сопряженных фазовых масок с бинарным характером распределения фазы. Такие системы позволяют заменить корректирующую голограмму при уменьшении расходимости простых и сложных поперечных мод газового лазера. Эти же системы со смежными масками позволяют формировать из одного и того же лазерного поля световые пучки с различными конфигурациями диаграммы направленности.

Предложен и осуществлен метод статистической модуляции волнового фронта в корректирующей когерентно-оптической системе, включающей модулятор волнового фронта и голограмму. Этим методом удалось устранить информацию о структуре лазерного поля в сформированном пучке и тем самым унифицировать и стабилизировать его диаграмму направленности. В частности, при помощи одной и той же корректирующей системы удалось уменьшить до дифракционного предела расходимость излучения газового лазера независимо от поперечных индексов генерируемых мод. Впервые осуществлена коррекция сложных нестационарных полей на выходе волоконных световодов и оптических кабелей. На выходе двух многомодовых волокон получено интерференционное поле с высокой пространственной когерентностью.

Впервые получена полная коррекция лазерных полей, которая заключается не только в стабилизации угловых характеристик формируемых пучков, но и в придании этим пучкам требуемого распределения энергии по сечению.

Практическое значение. Полученные в работе общие соотношения и закономерности могут быть использованы при проектировании и расчетах корректирующих систем для формирования когерентных световых пучков с разнообразными конфигурациями диаграммы направленности и заданным распределением энергии по сечению пучка. На

основании теоретических и экспериментальных данных, приведенных в работе, оказывается возможной точная оценка границ применимости и эффективности предложенных методов в различных практических ситуациях.

Полученные решения частных задач могут сразу же найти применение в целом ряде практических вопросов. Так метод формирования пучков с равномерным распределением энергии по сечению целесообразно использовать в голографии для формирования опорного пучка, в системах оптической обработки информации, системах оптической навигации, в оптической интерферометрии. Формирование пучков с различной геометрией диаграммы направленности может быть полезно в устройствах для лазерной сварки и пайки элементов, системах светолокации и навигации. Результаты по стабилизации диаграммы направленности пучка найдут применение в системах светолокации и дальнометрии, в волоконно-оптических системах связи.

Результаты работы позволяют по-новому оценить уже известные практические решения ряда задач. Так простая и дешевая система, состоящая из многомодового оптического волокна и корректора в некотором смысле эквивалентна одномодовому волокну хорошего оптического качества; двухэлементная система сопряженных фазовых масок в ряде задач эквивалентна линзовой телескопической системе, но обладает значительно более приемлемыми массо-габаритными характеристиками, а также простотой и дешевой изготовлением.

Ряд задач, рассмотренных в работе, вообще до сих пор не имел удовлетворительного решения. Это относится, например, к формированию пучка с равномерным и треугольным профилями распределения энергии по сечению пучка или же к формированию диаграмм направленности в виде сложных геометрических фигур. Такие задачи ожидают своего практического применения.

### Защищаемые положения.

1. Использование фазовых масок различных типов позволяет с высокой эффективностью преобразовывать распределение энергии по сечению когерентного пучка, уменьшать расходимость лазерных пучков и формировать у них диаграммы направленности сложной пространственной конфигурации.

2. Метод статистической модуляции волнового фронта обеспечивает стабилизацию диаграммы направленности у сформированных пучков независимо от поперечно-модовой структуры лазерного излучения.

3. Объединение в схеме коррекции методов статистической модуляции волнового фронта и фазовых масок позволяет осуществить синтез световых пучков со стабилизированными угловыми характеристиками и требуемым распределением энергии по сечению на лазерных полях, имеющих различную поперечную структуру.

Такой же синтез возможен и для сложных полей на выходе многомодовых волоконных световодов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения с выводами; содержит 146 страниц, 31 рисунок и 4 таблицы. Список литературы включает 94 наименования.

## II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дается общая характеристика и сформулирована цель диссертационной работы. Кратко описывается структура работы и приводятся основные защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены вопросы, связанные с формированием при помощи фазовых масок когерентных пучков с требуемым распределением энергии по сечению. Действие таких фазовых масок

заключается в сдвиге или колебаний одних участков поля по сечению преобразуемого пучка по отношению к другим. В результате этого в дальней зоне сформируется новый световой пучок с измененным в нужную сторону распределением энергии. Основное внимание уделяется вопросам формирования пучка с равномерным распределением энергии по сечению, как имеющим наиболее важное практическое значение.

В первом параграфе сделан краткий обзор известных методов получения пучков с равномерным распределением энергии по сечению, а также намечен новый возможный подход к решению такой задачи. Он основывается на анализе процесса формирования из картины Эйри при ее Фурье-преобразовании пучка с равномерным распределением энергии. Этот процесс можно представить как результат интерференционного сложения колеблющихся в противофазе кольцевых участков поля. Подобный же принцип было предложено использовать и для выравнивания распределения энергии по сечению у полей с другими чем у картины Эйри распределениями амплитуды и фазы, например, для поперечных мод газового лазера. Соответствующие фазовые маски будут иметь достаточно простой рельеф с бинарным характером распределения фазы.

Во втором параграфе рассмотрена методика расчета структуры бинарных фазовых масок, выравнивающих распределение энергии по сечению пучка. Для ее апробации в качестве корректируемых пучков были выбраны типичные модовые структуры — одномерные симметричная мода  $TEM_{00}$  и антисимметричная мода  $TEM_{01}$ . Здесь же рассмотрены вопросы, связанные с изготовлением и отстройкой рассчитанных фазовых масок. Полученные таким путем фазовые маски обеспечивали концентрацию  $\sim 60-65\%$  всей энергии для моды  $TEM_{00}$  и  $\sim 30-40\%$  для  $TEM_{01}$  в пучок с неравномерностью  $\sim 5\%$ .

В третьем параграфе по отработанной выше методике были проведены расчеты и на их основании изготовлены фазовые маски, выравнивающие распределение энергии в аксиально-симметричной моде  $TEM_{00}$ . Решение этой задачи имеет большое практическое значение. Поэтому для фазовых масок подробно изучалось влияние размера и числа зон постоянной фазы на эффективность преобразования и неравномерность распределения энергии в сформированном пучке. Исследования указывают на возможность создания таких масок, которые обеспечивают концентрацию до 55% исходной энергии в пучок с неравномерностью  $\sim 5\%$ . Эти значения существенно превосходят величину эффективности преобразования, достигнутую другими методами.

В четвертом параграфе главы намечены пути построения фазовых масок с несколькими градациями фазы. Показано, что несмотря на некоторое усложнение расчетов и технологии изготовления, такие маски могут обеспечить формирование пучка с более высокой степенью равномерности и лучшей эффективностью по сравнению с бинарными фазовыми масками. Кроме того, многоградационные маски позволяют формировать пучки с другими, отличающимися от равномерного, распределениями энергии по сечению. В качестве примера в параграфе приведены рассчитанные структуры масок, которые обеспечивают формирование пучка с треугольным профилем распределения энергии по сечению и различной полушириной.

Во второй главе область применения фазовых масок расширяется на формирование лазерных пучков с различными формами диаграммы направленности, в том числе и с уменьшенной угловой расходимостью излучения.

В обзорном параграфе главы анализируются известные когерентно-оптические методы уменьшения расходимости и используемые в них

физические процессы, которые обеспечивают выравнивание волнового фронта корректируемого излучения. Отвлекаясь от конкретных достоинств и недостатков, присущих этим методам, основное их различие заключается в формировании двух отличающихся типов полей. Так в случае метода коррекции обращением волнового фронта и голографического метода полученное поле в ближней зоне описывается выражением

$$u(x, y) \sim |f(x, y)|^2 \quad (1)$$

где  $f(x, y)$  - комплексная функция распределения поля в корректируемом пучке; в случае фазовой маски или киноформа получается другое выражение

$$u(x, y) \sim |f(x, y)| \quad (2)$$

Это различие, однако, дает ощутимый вклад в эффективность коррекции. Известны результаты, показывающие, что уменьшение расходимости излучения с помощью фазовых масок, происходящее за счет формирования на выходе поля вида (2), сопровождается меньшими потерями энергии, чем в случае коррекции голографическим методом, когда поле на выходе определяется соотношением (1). Отсюда следует целесообразность замены корректирующих голограмм на фазовые маски.

Во втором параграфе исследуется уменьшение расходимости поперечных мод газового лазера при помощи двухэлементной корректирующей системы, в которой проведена замена голограммы на фазовую маску. В двухэлементной схеме на первом элементе - модуляторе волнового фронта - происходит дифракция корректируемого пучка, а второй элемент - голограмма - выравнивает волновой фронт у промодулированного поля. Задача замены голограммы на фазовую маску

состояла в определении таких структур для модуляторов волнового фронта, в дифракционной картине которых обеспечивалось такое распределение поля, для которого можно легко рассчитать и изготовить фазовую маску, выравнивающую волновой фронт. Были рассмотрены модуляторы в виде фазовых зонных пластинок Френеля и установлено, что наиболее подходящими из них являются модуляторы с треугольной и прямоугольной формой фазового рельефа. Поле дифракции простых поперечных мод на таких модуляторах имеет бинарный характер распределения фазы. Поэтому и сопряженная этим модуляторам выравнивающая волновой фронт фазовая маска будет иметь бинарное распределение фазы. Двухэлементная схема уменьшения расходимости светового излучения, состоящая из сопряженных модулятора волнового фронта и фазовой маски, была экспериментально опробована. Она дала значительный выигрыш в энергии по сравнению с голографической двухэлементной схемой.

В третьем параграфе главы рассмотрено использование фазовых масок в корректирующих системах, действие которых основано на переходе от традиционных операций автокорреляции к операциям взаимной пространственной корреляции различающихся полей. Такой переход может осуществляться при смене модуляторов или же сопряженных им фазовых масок в процессе коррекции лазерных полей. Нами были определены конфигурации необходимых фазовых элементов, обеспечивающих формирование диаграмм направленности в виде сложных пространственных фигур -  $V$ -луча, окружности, квадрата, а также, в частности, мультиплицирование пучков. Проведенные эксперименты позволили реализовать пучки с такими диаграммами направленности.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой метода коррекции, который исключает влияние поперечной структуры корректируемых полей на сформированный пучок, и таким

образом стабилизирует его пространственно-угловые характеристики.

В первом параграфе этой главы намечаются пути решения такой задачи. Предлагается использовать двухэлементную схему коррекции с таким модулятором волнового фронта, который стирает информацию о структуре корректируемых полей в каких-либо пространственных характеристиках промодулированного пучка. В поисковых опытах было установлено, что для таких целей пригодны шероховатые рассеиватели, например, матовое стекло. При их использовании информация о корректируемых полях сохраняется только в спекл-структуре промодулированного пучка и отсутствует в огибающей распределения энергии углового спектра. Однако условия, необходимые для эффективной экспериментальной реализации схемы коррекции, накладывают некоторые ограничения на форму рассеивателей, их размеры и фазовый рельеф. Показано, что наиболее полно поставленным требованиям отвечает модулятор волнового фронта с пропусканием вида

$$t(x, y) = \left\{ 1 + \sum_j \text{circ} \left[ \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{d/2} \right] (e^{i\varphi} - 1) \right\} \text{circ} \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2} \right) \quad (3)$$

где  $(x, y)$  - координаты в плоскости модулятора,  $D$  - диаметр апертуры модулятора. Модулятор состоит из большого числа одинаковых, статистически расположенных фазовых элементов в виде цилиндров с диаметром  $d$  и координатами центра  $(x_j, y_j)$ . Он имеет бинарный фазовый рельеф, т.е. по-сути представляет элемент, аналогичный фазовой маске, но предназначенной для предварительного, а не окончательного воздействия на характеристики корректируемого поля.

Во втором параграфе описывается методика изготовления статистических модуляторов волнового фронта, а также проводится изучение структуры промодулированных ими пучков. Экспериментально

подтверждено, что информация об амплитудно-фазовых характеристиках преобразуемых пучков содержится только в спекл-структуре промодулированного поля и отсутствует в огибающей распределения энергии в его угловом спектре. Форма этой огибающей определяется структурой самого модулятора, что открывает возможность определенного дополнительного воздействия на пространственно-угловые характеристики скорректированного пучка посредством изменения параметров модулятора.

В третьем параграфе изучаются свойства схемы коррекции лазерных пучков, содержащей статистический модулятор волнового фронта и фазирующую голограмму. Последняя придает промодулированному полю плоскую форму волнового фронта. Формируемый такой системой пучок имеет в дальней зоне резкий максимум и слабый фон излучения, рассеиваемого в большой телесный угол. Распределение энергии в центральном максимуме определяется Фурье-образом огибающей в распределении энергии промодулированного пучка и, в конечном счете, зависит только от структуры модулятора и не зависит от изменения структуры корректируемых полей. Однако такое изменение скажется на структуре рассеянного фона и, что более важно, на относительном уменьшении доли энергии, концентрируемой в центральном максимуме. В параграфе приводятся исследования, подтверждающие независимость диаграммы направленности скорректированных пучков от индекса поперечных мод, их ориентации, степени пространственной когерентности и величины сечения.

В четвертой главе исследуются многоэлементные корректирующие системы, которые позволяют синтезировать пучки с требуемым распределением энергии по сечению из различающихся по структуре поперечных мод лазера. Такие системы включают в себя схему стабилизации угловых характеристик поля, описанную в предыдущей главе,

и фазовые маски, которые осуществляют необходимое дополнительное преобразование пространственно-угловых характеристик в скорректированном пучке.

В первом параграфе проводятся точные расчеты формы отгибающей в распределении энергии пучка, промодулированного статистическим модулятором, поскольку именно эта характеристика является основной для расчета дополнительных фазовых масок. При расчете решается задача дифракции плоской волны на модуляторе с комплексным пропусканием (3). Пропускание такого модулятора рассматривается как результат одновременного действия двух дополнительных экранов, сдвинутых друг относительно друга на полдлины волны. Полученное выражение имеет определенное сходство с выражением для классической задачи дифракции поля на множестве отверстий. Однако в нем также присутствуют сомножители, учитывающие ближний порядок в расположении рассеивающих центров модулятора волнового фронта.

Во втором параграфе главы изучаются конкретные схемы формирования пучков. В этих схемах воздействие на фазу стабилизированного поля достигается двумя способами. Один из них заключается в помещении непосредственно за голограммой дополнительной фазовой маски, второй - в записи информации о фазе дополнительной маски на голограмме. Фазовая маска при этом помещается в опорный пучок и присутствует только на стадии получения голограммы. Были проведены экспериментальные исследования обеих схем коррекции. Они показали возможность формирования пучка с равномерным распределением энергии по сечению из различных поперечных мод газового лазера независимо от изменения их индекса.

В третьем параграфе приводятся данные в практическом отношении результаты по коррекции световых полей на выходе многомодо-

вых оптических волокон и кабелей. Известно, что на выходе последних формируются поля со сложной поперечно-модовой структурой и большой расходимостью излучения. Это накладывает ограничение на применение многомодовых волокон в целом ряде практических задач. Разработанные методы и схемы коррекции позволяют существенно улучшить пространственно-угловые характеристики многомодовых волоконно-оптических систем. Так например, на выходе отдельных волокон было получено уменьшение расходимости излучения до угловых минут со стабильной равномерной формой распределения энергии по сечению независимо от условий возбуждения волокон и их деформации. Аналогичные результаты получены для оптических кабелей, состоящих их нескольких многомодовых волокон.

В последнем параграфе проводится подробное изучение характеристик скорректированного поля на выходе волоконных систем. Исследуется как пространственная когерентность скорректированного поля, так и возможность интерференции скорректированных полей от двух разнотипных многомодовых волокон. Измерения показали, что в последнем случае контрастность интерференционных полос составляет величину  $\sim 0,5-0,7$ . За счет высокой когерентности и равномерного распределения энергии по сечению каждого из пучков формируется ровные, четкие интерференционные полосы. Это свойство скорректированных пучков было использовано для создания нового типа волоконного интерферометра, позволяющего определять изменения оптической длины пути на входе одного из волокон по сдвигу интерференционных полос на выходе интерферометра.

Основные результаты и выводы работы можно сформулировать в виде следующих положений.

I. В работе впервые изучены свойства фазовых масок в качестве корректирующих элементов. Применение таких элементов позво-

ляет осуществлять решение важных в практическом отношении задач. Помещая на пути лазерного пучка формирующие фазовые маски различной структуры, можно с высокой эффективностью управлять распределением энергии по сечению корректируемого пучка. Применяя в двухэлементной корректирующей системе фазовые маски, которые выравнивают волновой фронт излучения, удалось добиться уменьшения расходимости лазерных пучков с меньшими потерями энергии по сравнению с корректирующей голограммой.

2. В работе предложен и осуществлен новый метод статистической модуляции волнового фронта корректируемых пучков. С помощью этого метода оказалось возможным стабилизировать диаграмму направленности скорректированных пучков независимо от поперечного индекса исходных мод газового лазера.

3. Разработана метод синтеза сложных диаграмм направленности лазерных пучков, основанный на кросс-корреляционных операциях с угловыми спектрами модуляторов волнового фронта. В этом методе при замене одного модулятора на другой удается существенно изменять пространственную структуру диаграммы направленности одного и того же исходного пучка.

4. Осуществлялось уменьшение расходимости сложных, нестационарных полей на выходе волоконно-оптических систем, состоящих из многомодовых волокон. При использовании системы из двух многомодовых волокон, снабженных коррекционными насадками, получено интерференционное поле с ровными контрастными полосами.

5. Во всех исследовавшихся методах проведены теоретические и экспериментальные оценки эффективности преобразования и формирования пучков, позволяющие достаточно четко определять границы применимости этих методов, их преимущества и недостатки по сравнению с известными методами коррекции.

Апробация основных результатов. Основные вопросы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на IX Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике ( г. Ленинград, 1978г. ), на III Всесоюзной школе по оптической обработке информации ( г. Рига, 1980г. ), на I Всесоюзной конференции по радиооптике ( г. Фрунзе, 1981г. ) и опубликованы в следующих работах

1. Воляр А.В., Гнатовский А.В., Логинов А.П., Медведь Н.В., Кучикян Л.М., Шпак М.Т. Коррекция волнового фронта поля на выходе волоконного световода. - ДАН УССР, 1978, серия А, № 4, с. 329-332.

2. Воляр А.В., Гнатовский А.В., Логинов А.П., Медведь Н.В., Шпак М.Т. Уменьшение расходимости светового пучка на выходе волоконного кабеля. - Укр. физ. журнал, 1978, 23, № 5, с. 863-866.

3. Гнатовский А.В.; Логинов А.П., Медведь Н.В., Шпак М.Т. Коррекция световых пучков на выходе волоконных систем. - Тезисы IX Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике, М., 1978, с. 133.

4. Гнатовский А.В., Зубрилин Н.Г., Логинов А.П., Медведь Н.В., Николаев М.Б., Шпак М.Т. Применение метода статистической модуляции фазы поля для формирования остронаправленных световых пучков. - Укр. физ. журнал, 1978, 23, № 3, с. 514-516.

5. Гнатовский А.В., Зубрилин Н.Г., Логинов А.П., Медведь Н.В., Николаев М.Б., Шпак М.Т. Преобразование световых полей с помощью стохастических когерентно-оптических фильтров. - Укр. физ. журнал, 1978, 23, № 9, с. 1452-1457.

6. Гнатовский А.В., Логинов А.П., Медведь Н.В., Шпак М.Т. Преобразование пространственно-угловых характеристик гауссовых пучков при помощи фазовых масок. - ДАН УССР, 1980, серия А,

№ 4, с. 63-67.

7. Гнатовский А.В., Медведь Н.В., Шпак М.Т. Использование бинарных фазовых масок для коррекции пространственно-угловых характеристик когерентных пучков. - Тезисы III Всесоюзной школы по оптической обработке информации, г.Рига, 1980, с.215.

8. Гнатовский А.В., Медведь Н.В., Мороз Т.З., Шпак М.Т. Стабилизация заданного распределения энергии в световом пучке. - Тезисы I Всесоюзной конференции по радиооптике, г. Фрунзе, 1981, с.31-32.

9. Гнатовский А.В., Медведь Н.В., Шпак М.Т. Использование волоконно-оптических систем для формирования синтезированного интерференционного поля. - Квантовая электроника, 1981, 8, № 5, с. 1108-1111.

Медведь  
Наталья Викторовна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ  
ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ С  
СИНТЕЗИРОВАННОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

ОПТИ ИФ АН УССР

Зак.112 БФ 33825 Тир.120 II.XI.81г.