



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С - 655

13-81-368

СОРОКО
Лев Маркович

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ,
ОСНОВАННЫЕ
НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ
НАБЛЮДАЕМЫХ ВЕЛИЧИН

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика,
01.04.05 - оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР

Исай Израилевич
ГУРЕВИЧ,

доктор физико-математических
наук профессор

Иван Андреевич
ДЕРИГИН,

доктор физико-математических
наук профессор

Дрий Исаевич
ОСТРОВСКИЙ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий, Протвино.

Защита диссертации состоится " " _____ 1981 г. в " " _____
часов на заседании специализированного совета Д-047.01.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московский обл., Лаборатория ядерных
проблем ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛЯП ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 1981 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физ.-мат. наук

Д.А. БАТУСОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981 - 1985 годы и на период до 1990 года", которые были приняты XXVI съездом КПСС, поставлена задача повышения эффективности научных исследований. Определяющим фактором успешного решения этой задачи является процесс непрерывного усовершенствования и обновления аппаратуры, используемой при изучении физики микромира, космоса и в прикладных науках. В истоках указанного процесса лежат новые идеи, нетрадиционные теоретические разработки и возникающее на базе нескольких направлений новое, ранее не существовавшее направление.

Актуальность проблемы повышения эффективности научных исследований обостряется на этапе развития экспериментальных методов, когда параметры аппаратуры приближаются к своим физико-техническим пределам и когда процесс совершенствования экспериментальной техники замедляется. В этих условиях у новой техники остается либо путь усложнения конструкций установок и повышения абсолютных и относительных затрат на достижение поставленной цели, либо переход на нетрадиционные и более эффективные методы решения тех же задач.

Тема диссертации непосредственно связана с отмеченной выше задачей повышения эффективности научных исследований. В ней описаны нетрадиционные экспериментальные методы, которые позволяют получить выигрыш в эффективности выполняемого эксперимента.

ЦЕЛЬ РЕФЕРИРУЕМОЙ ДИССЕРТАЦИИ. Цель диссертации заключается в том, чтобы теоретически обосновать нетрадиционный путь повышения эффективности экспериментальных методов, подтвердить экспериментально корректность новых подходов и продемонстрировать экспериментально или путем моделирования на ЭЕМ, рассматривая различные примеры, каким образом разработанные автором методы позволяют решить актуальные проблемы экспериментальной физики. К этим проблемам относятся: 1) проблема оптического микроскопа-автомата для ядерной фотоэмульсии; 2) проблема топологического съема информации с фотографий событий в трековых камерах, вытекающая из "картинного" характера наблюдаемых объектов; 3) проблема совершенствования теневых приборов в оптике с целью повышения чувствительности и упрощения конструкции этих приборов; 4) проблема повышения информативности детекторов частиц высоких энергий в условиях, когда физико-технические параметры детекторов достигли своих предельных значений.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ. Теоретическое обоснование новых методов решения проблемы повышения эффективности научных исследований на основе

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

приема, сущность которого состоит в том, что наблюдаемые величины подвергаются интегральному преобразованию на стадии измерений, причем адекватное для каждой задачи интегральное преобразование производят и заканчивают раньше, чем результаты измерений поступят в блок записи данных.

Экспериментальное подтверждение и моделирование на ЭВМ эффективности каждого из разработанных автором методов.

Постановка и принципиальное решение перечисленных выше актуальных проблем экспериментальной физики на основе метода интегрального преобразования наблюдаемых величин.

Выводы о практической значимости результатов исследований.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ. Теоретические и экспериментальные исследования и разработки нетрадиционных методов повышения эффективности научных исследований путем использования интегральных преобразований наблюдаемых величин на стадии измерений. Подтверждение правильности исходных положений разработанных методов экспериментальной физики путем проведения экспериментов и моделирования на ЭВМ.

Постановка и принципиально новое решение актуальных проблем экспериментальной физики путем коренной перестройки логики измерений, принципиальных изменений в конструкциях соответствующих приборов и в алгоритмах обработки результатов измерений.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Практическая значимость проведенных исследований состоит в том, что были найдены новые резервы существенного повышения эффективности научных исследований. Разработанные методы могут быть рекомендованы для внедрения в технику эксперимента, как соответствующие современному уровню развития лазерной техники, когерентной оптики, вычислительной техники, полупроводниковых приборов с зарядовой связью, методов изготовления дифракционных решеток и техники физического эксперимента с пучками заряженных частиц.

Практические преимущества разработанных методов повышения эффективности научных исследований характеризуются следующими параметрами. Принципиально новое оптическое устройство, фурье-микроскоп для ядерной фотоэмульсии, позволяет автоматизировать процесс просмотра ядерной фотоэмульсии и процесс измерения геометрических характеристик событий и повысить скорость их обработки в 300-500 раз. Принципиально новые топологические алгоритмы считывания, картинной информации, основанные на нетрадиционном использовании дискретных функций Уолша, позволяют повысить скорость обработки и достичь сжатия объема картинной информации в 50 - 100 раз. Принципиально новая конструкция полупроводникового прибора с зарядовой связью, которая реализует топо-

гический алгоритм считывания прямых треков, позволяет повысить скорость обработки в 50 раз и во столько же раз сжать объем информации о прямых треках. Разработанные и изготовленные новые элементы гильберт-оптики сохраняют чувствительность традиционных приборов и позволяют в несколько раз сократить время, идущее на калибровку теневого прибора. Разработанные и промоделированные на ЭВМ мультиплексные детекторы частиц и мультиплексный измеритель эмиттанса пучка ионов дают выигрыш во времени в 10 - 30 раз.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 154 страницы машинописного текста и 126 иллюстраций. Во введении дан краткий обзор методов, основанных на интегральных преобразованиях наблюдаемых величин, сформулированы актуальные проблемы экспериментальной физики, решенные автором в диссертации, и дана общая характеристика диссертации. В первой главе представлены новые разработки в области фурье-оптики, включающие семейство фурье-микроскопов для ядерной фотоэмульсии. Вторая глава освещает разработки, основанные на пространственном преобразовании Уолша. В третьей главе описаны новые разработки в области гильберт-оптики. Мультиплексные детекторы частиц и мультиплексный измеритель эмиттанса пучка ионов рассмотрены в четвертой главе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Во введении дана краткая история методов и приборов экспериментальной физики, основанных на интегральных преобразованиях наблюдаемых величин. Отмечено, что позже всего разработки подобных методов были начаты в области ядерной фотоэмульсии, систем обработки फिल्मовой информации, детекторов частиц высоких энергий, а также в системах контроля физических и геометрических характеристик пучков ионов. Причиной такого запаздывания является то, что точка роста во всех указанных методиках лежит на стыке многих направлений: современной математики, теории информации, фурье-оптики, голографии, полупроводниковой электроники, а также теории кодирования сигналов в технике связи.

Исследования по теме реферируемой диссертации были начаты автором в 1966 г. с предложения по использованию в технике трековых камер принципов фурье-оптики^{/39/}. В 1968 г. была сформулирована и начала реализовываться программа исследований в области гильберт-оптики^{/I/}. В 1970 г. были разработаны первые мультиплексные детекторы частиц, устройство и принцип действия которых существенным образом отличались от традиционных приборов^{/14/}. В 1974 г. автором были начаты исследования

по использованию функций Уолша для топологического считывания картинной информации^{/17/}. В 1978 г. была разработана основная схема оптического фурье-микроскопа для просмотра ядерной фотоэмульсии^{/49/}. К концу 1980 г. были завершены теоретические исследования и эксперименты на макете фурье-микроскопа^{/22, 23/}, по моделированию топологических алгоритмов считывания прямых треков, эксперименты и исследования по гильберт-оптике^{/38/}, а также разработки дважды мультиплексных систем измерения двумерной информации^{/12, 20/}.

Цель исследований, выполненных автором, состояла в том, чтобы продемонстрировать практическую значимость и перспективность новых методов существенного повышения эффективности научных исследований, основанных на принципе интегрального преобразования наблюдаемых величин в процессе их измерения.

Глава I. ФУРЬЕ-МИКРОСКОП ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

В гл. I поставлена и принципиально по-новому решена проблема оптического микроскопа-автомата для ядерной фотоэмульсии, которую безуспешно пытались решить в течение последних 25 лет во многих лабораториях мира. Автор нашел причину неудач всех предшествовавших разработок и предложил принципиально новую схему фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии, в которой отсутствует операция перефокусировки по глубине, а съем информации ведется без разбиения следа частицы на элементы. Были разработаны также фурье-микроскопы второго и третьего поколений, при помощи которых развертка событий по толщине слоя осуществляется статически и автоматизируется процесс обмера событий в ядерной фотоэмульсии^{/22, 23, 49/}.

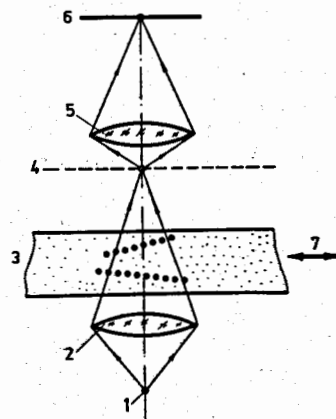


Рис. 1. Принципиальная схема фурье-микроскопа: 1 - точечный источник монохроматического света, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - плоскость пространственных частот, 5 - изображающая линза, 6 - плоскость считывания данных, 7 - направление движения слоя ядерной фотоэмульсии.

Схема фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии, разработанного автором, дана на рис. 1. Слой ядерной фотоэмульсии просвечивается сходящимся пучком когерентного света от лазера. Предметом наблюдения в фурье-микроскопе является фурье-образ прямого трека, который в силу принципа Бабинэ всегда имеет вид светлой линии на равномерном фоне. Фурье-микроскоп для ядерной фотоэмульсии обладает высокими скоростями просмотра благодаря тому, что в нем устранена операция наводки на фокус по глубине, съем информации ведется "картинно", а перемещение слоя ядерной фотоэмульсии осуществляется безостановочно.

Полная схема фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии дана на рис. 2. Новыми элементами его являются зеркальный конденсор, принцип действия которого был экспериментально исследован на модели, а также иммерсионные конденсоры в виде фигур вращения со сферической поверхностью и с поверхностью более сложной формы. Анализ форм таких конденсоров проведен на основе дифференциальных уравнений, которые были построены специально для иммерсионных систем фурье-микроскопа. Итогом этих исследований был иммерсионный конденсор, позволяющий фиксировать глубину залегания следа и вести таким образом статическую развертку событий по Z-координате.

Чтобы определить ориентацию следа в трехмерном пространстве, автор предложил просвечивать слой ядерной фотоэмульсии двумя сходящимися пучками света под разными углами и определять попеременно ори-

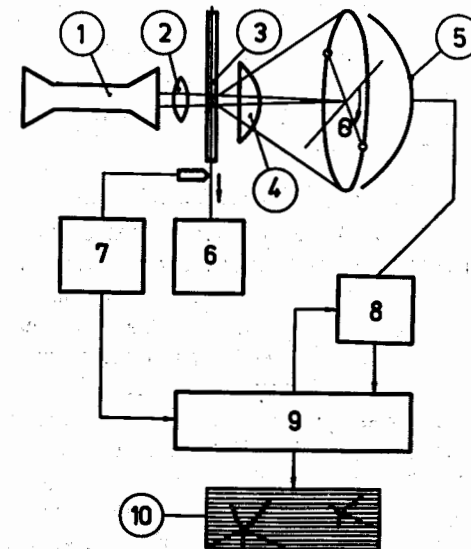
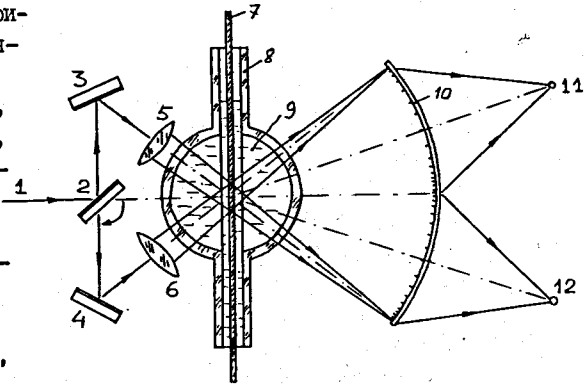


Рис. 2. Полная схема фурье-микроскопа:
1 - лазер, 2 - линза преобразования Фурье, 3 - слой ядерной фотоэмульсии, 4 - зеркальный конденсор, 5 - фотоприемник, 6 - система перемещения ядерной фотоэмульсии, 7 - датчик положения ядерной фотоэмульсии, 8 - блок записи данных, 9 - процессор, 10 - экран отображения.

Рис.3. Схема фурье-микроскопа для определения ориентации следа в пространстве: 1 - пучок света, 2 - вращающееся зеркало, 3 и 4 - плоские зеркала, 5 и 6 - линзы преобразования Фурье, 7 - слой ядерной фотозумульсии, 8 - иммерсионный конденсор, 9 - иммерсионная жидкость, 10 - система секторного сканирования, 11 и 12 - фотоприемники.



ентации проекций следа на две разные плоскости (рис. 3). Если в поле зрения имеется n следов, то для определения ориентации их в пространстве число ракурсов увеличивают до $2n$. Каждый след образует свою "мировую" линию, амплитуда и фаза которой однозначно связаны с углами ориентации каждого следа в пространстве.

В гл. I описаны эксперименты, которые подтверждают работоспособность фурье-микроскопа при наблюдении сплошных следов, а также результаты моделирующих расчетов на ЭВМ для следов релятивистских частиц с просветами между отдельными зернами /22,23/.

В гл. I также дан краткий обзор фурье-оптики. Потенциальные возможности фурье-оптики в ядерной физике продемонстрированы на примере одного прямого следа на плоской трековой фотографии, на примере устранения неоднозначностей, возникающих при расшифровке сложных событий, а также на примере оптического устройства измерения кривизны следа /2,30,35,36,39-44/.

Глава 2. ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ СЧИТЫВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В гл. 2 поставлена и принципиально по-новому решена проблема перехода от поэлементного считывания информации, получаемой с трековых камер, к топологическому считыванию. Автором были разработаны топологические алгоритмы считывания, основанные на дискретных функциях Уолша, быстрые алгоритмы считывания прямых треков, новая конструкция фотоприемного устройства для топологического считывания данных о прямых треках, а также быстрые алгоритмы секторного сканирования прямых треков, выходящих из одной точки /17,21,29,34/.

В алгоритмах считывания прямых треков при помощи двумерных масок Уолша процесс считывания сводится к быстрому алгоритму нахождения компонент двумерного уолш-образа, которые инвариантны относи-

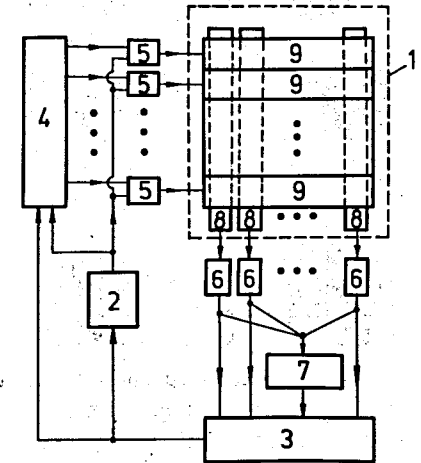
тельно трансляции прямого трека и которые расположены на последней строке или в последнем столбце двумерной матрицы уолш-образа трека. Поиск ведется минуя операцию поэлементного сканирования, а также известные ранее стандартные алгоритмы построения полного набора компонент уолш-образа исходных изображений треков в кадре.

Была построена последовательность модифицированных масок Уолша, при помощи которых были получены значения сумм на последовательных шагах считывания информации, минуя операцию нахождения всех компонент уолш-образа. Данный алгоритм быстрого считывания трековой фотографии с прямыми треками может быть реализован при помощи полупроводниковой фотоприемной матрицы с инжекцией заряда, работающей в режиме неразрушающего считывания. Путем моделирования на ЭВМ стадии считывания модифицированными масками Уолша были определены информационные признаки прямолинейного трека, найдены критерии прямолинейности трека, а также были проанализированы более сложные события. Было показано, что алгоритм допускает присутствие случайного фона с относительной интенсивностью не более 50% /28/.

Результаты этих исследований привели к важному открытию: двумерные функции Уолша, расположенные в порядке возрастания секвенты, представляют собой дискретные функции процесса секторного сканирования исходного кадра. С их помощью был построен быстрый алгоритм секторного сканирования фурье-образа, формируемого в фурье-микроскопе для ядерной фотозумульсии. Были опробованы алгоритмы дискретного секторного сканирования фурье-образа следов частиц в ядерной фотозумульсии и было продемонстрировано, что алгоритм секторного сканирования

Рис. 4. Схема топологической матрицы ПЭС: 1 - фотоэлектрический преобразователь изображения, 2 - генератор тактовых импульсов, 3 - блок управления, считывания, сброса и установки, 4 - генератор функций Уолша с числом выходных электродов, равным числу горизонтальных регистров, 5 - электронные ключи, 6 - блок нелинейного преобразования электрических сигналов, 7 - аналоговый сумматор.

Число горизонтальных регистров и число дополнительных электродов равно 2^n , где n - целое число.



позволяет работать при отношениях сигнала к шуму вплоть до $S/\pi \sim \frac{1}{2N}$, где N — число элементов кадра на одной из координатных осей.

Чтобы повысить эффективность использования блока памяти и уменьшить объем вычислений входных данных, автором была разработана принципиально новая конструкция матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС) топологического считывания, схема которой приведена на рис. 4/21,34/.

Изображение, перенесенное из светочувствительной матрицы в матрицу ПЗС топологического считывания прямых треков, подвергается топологической обработке. Прямой трек претерпевает последовательность дискретных поворотов как единое целое. На каждый горизонтальный регистр попадает вполне определенное число управляющих импульсов на одной и той же тактовой частоте, но с их пропусками. Число импульсов и их чередование зависят от номера такта и определяются дискретными функциями Уолша, а полное число тактовых импульсов, поданных на каждый горизон-

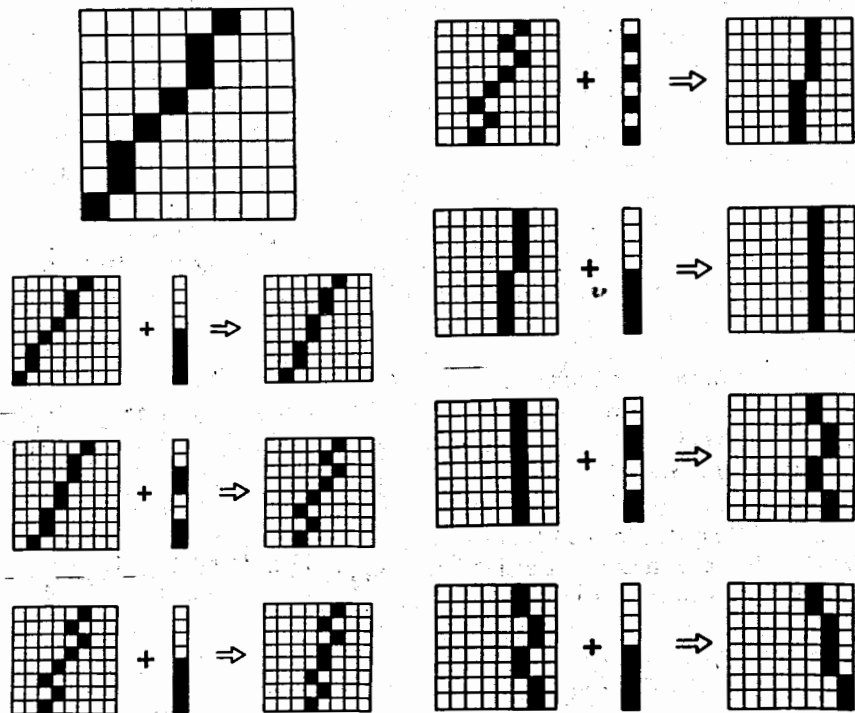


Рис. 5. Иллюстрация принципа действия ПЗС матрицы топологического считывания на примере одиночного трека, изображенного слева вверху в кадре размером 8 x 8. Векторы-столбцы указывают положения открытых электронных ключей.

тальный регистр, изменяется от строки к строке по ступенчато-линейному закону. На рис. 5 и 6 показан принцип работы ПЗС матрицы топологического считывания прямого трека.

Если кадр содержит 512×512 элементов изображения, то коэффициент сжатия информации, который дает топологическая матрица ПЗС, равен $512/2k$, где k — число треков в кадре, а скорость обработки дополнительно возрастает в $512/8 = 64$ раза для фрагментов размером 8 x 8. Сокращается до минимума объем вычислений на стадии обработки данных, поступающих с матрицы ПЗС.

На рис. 7 приведена последовательность масок секторного сканирования. На рис. 8 дана типичная функция размытия по углу, полученная для прямого трека в кадре размером 16 x 16. Чтобы использовать собственные функции секторного сканирования в ПЗС, в традиционную логику сканирования прямоугольной матрицы ПЗС были внесены принципиальные изменения. На рис. 9 показан пример, который демонстрирует степень помехоустойчивости алгоритма секторного сканирования в усло-

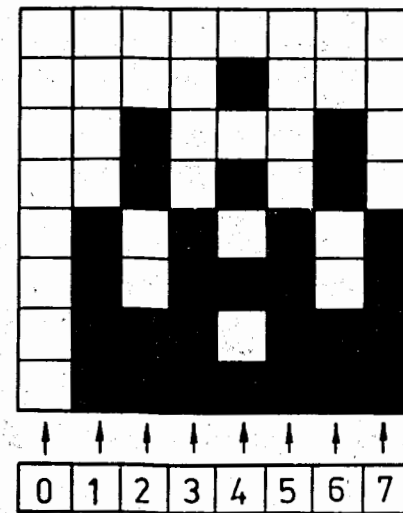


Рис. 6. Совокупность последовательных положений открытых электронных ключей для дискретных поворотов прямого трека как единого целого.

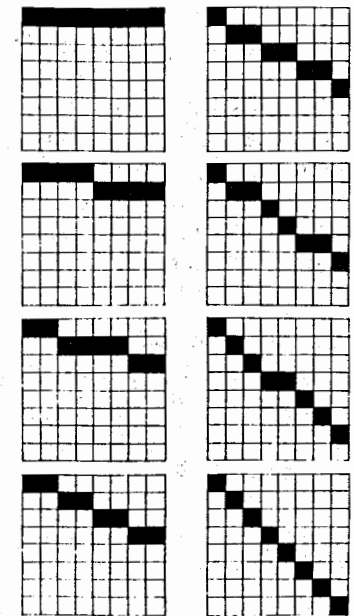


Рис. 7. Последовательность масок секторного сканирования для 8 x 8 матрицы при считывании прямых треков, проходящих через элемент (0,0).

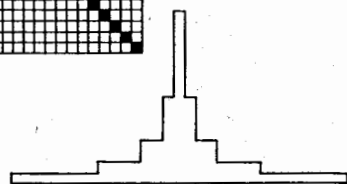
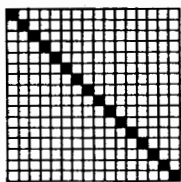


Рис. 8. Типичная функция углового размытия, характеризующая способность собственных функций секторного сканирования отбирать прямые треки по углу. Слева вверху - исходное изображение.

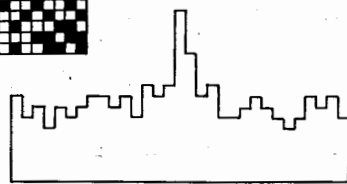
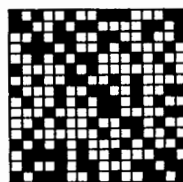


Рис. 9. Пример, иллюстрирующий помехоустойчивость алгоритма секторного сканирования в условиях, когда интенсивность фона в 6 раз больше интенсивности прямого трека. Слева вверху - исходное изображение.

виях, когда интенсивность фона в 6 раз больше интенсивности прямого трека.

В гл. 2 дано краткое изложение теории дискретных функций Уолша, дискретного преобразования Уолша, его основных свойств и вопроса об упорядоченности дискретных функций Уолша. В гл. 2 дан краткий обзор приборов с зарядовой связью, включая приборы с инжекцией заряда в подложку, при помощи которых можно реализовать алгоритмы быстрого сканирования прямого трека, разработанные в диссертации /34/.

Глава 3. ГИЛЬБЕРТ-ОПТИКА

Гильберт-оптикой называют раздел оптики, в котором используют преобразование Гильберта над функциями от двух пространственных координат на плоскости. При помощи преобразования Гильберта визуализируют оптические неоднородности с предельно высоким контрастом одновременно для всех пространственных частот, пропускаемых оптической системой. Для реализации преобразования Гильберта в оптике используют элементы, специфические для гильберт-оптики /3, 38/.

В гл. 3 описан новый оптический элемент гильберт-оптики в виде дифракционной решетки со сбоем, которая отличается от обычной дифракционной решетки тем, что два смежных штриха в центре разнесены на расстояние

$$a' = \frac{2m-1}{2} a, \quad (I)$$

где a - шаг дифракционной решетки, а m - целое число, обычно равное 1 или 2. На рис. 10 показана дифракционная решетка со сбоем, а на рис. 11 - схема теневого прибора, в котором дифракционная решетка со сбоем выполняет функцию фильтра пространственных частот /13, 14, 36, 38/.

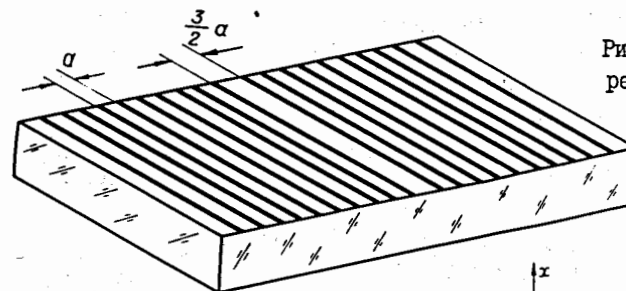


Рис. 10. Дифракционная решетка со сбоем.

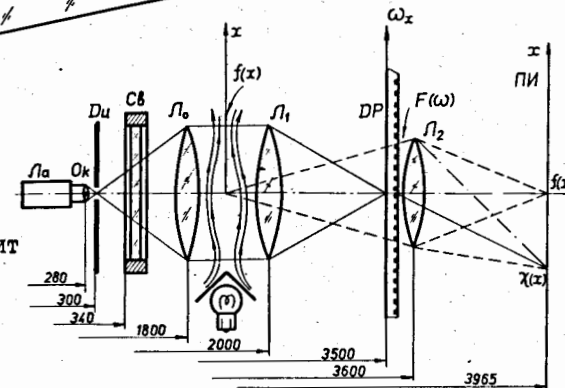


Рис. 11. Схема теневого прибора, который содержит дифракционную решетку со сбоем.

В гл. 3 дана разработанная автором теория дифракционной решетки со сбоем, приведено сравнение ее свойств с фазовым ножом и с ножом Фуко, а также описаны ее важные практические достоинства. Дан анализ эффектов, которые возникают, если шаг между смежными штрихами в центре дифракционной решетки со сбоем отличается от требуемого значения, рассмотрена особенность линейной комбинации исходного сигнала и его гильберт-образа. Проанализированы эффекты, возникающие в тех случаях, когда центр дифракционной решетки со сбоем не попадает на оптическую ось, а решетка находится при этом в плоскости пространственных частот. Описан макет теневого прибора, содержащего дифракционную решетку со сбоем, и даны результаты исследования эффектов, предсказанных теорией /15/.

Важным преимуществом обладает многоволновой теневой прибор (рис. 12), в котором расфокусированная диафрагма выполнена в виде дифракционной решетки со многими сбоем (рис. 13). В этом приборе отображение оптических неоднородностей происходит одновременно в двух и более спектральных линиях, достаточно широко разнесенных по спектру. В отли-

чие от всех известных его прототипов контраст изображения темных полос в данном приборе сохраняет высокое значение одновременно для всех спектральных линий /19,38,47/.

В гл. 3 описаны эксперименты по визуализации оптических неоднородностей в стеклянной шайбе. Локальная клиновидность вдоль горизонтальной оси определяется сдвигом темных полос, причем неопределенность в сдвиге фаз на угол, кратный 360° , полностью исключается в данном приборе, если наблюдать за положением одной или двух крайних линий сбоя. Сложенные вместе две дифракционные решетки со многими сбоями создадут в первом перекрестном порядке дифракции скрещенную систему темных полос.

Далее описан классификатор образов, в котором информационные признаки стандартных печатных букв и цифр формируются при помощи элементов гильберт-оптики и который позволяет увеличить размерность пространства информационных признаков с трех до восьми и тем самым повысить остроту и надежность отбора близких по начертанию образов. Классификатор образов содержит восемь одновременно действующих оптических каналов, в которых выполняется три пространственных преобразования Фурье, три преобразования Гильберта и два перекрестных преобразования Гильберта-Фурье, а на выходе каждого каскада производится нелинейное суммирование картины распределения интенсивности. Моделирующие эксперименты на ЭМ, выполненные для варианта классификатора образов с шестью ка-

Рис. 12. Схема многоволнового теневого прибора, содержащего дифракционную решетку со многими сбоями.

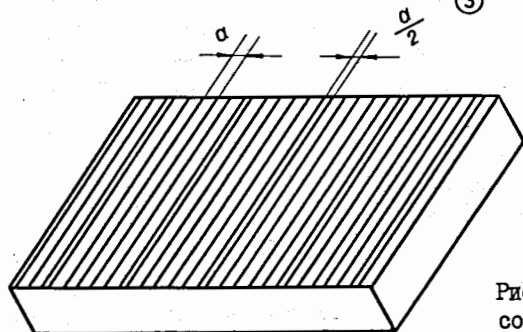
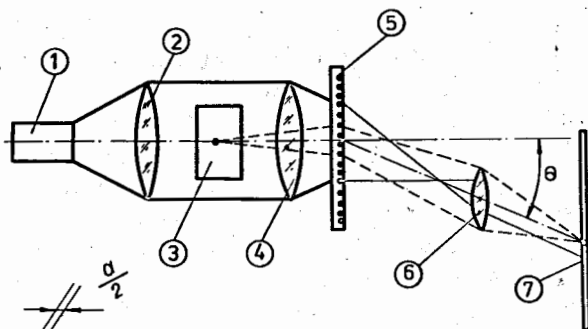


Рис. 13. Дифракционная решетка со многими сбоями.

налами, подтверждают отмеченные выше преимущества разработанной системы /16/.

Экспонат "Теневые приборы" демонстрировался на ВДНХ в павильоне "Физика" в 1978 г. и награжден серебряной медалью.

Глава 4. ДЕТЕКТОРЫ ЧАСТИЦ

При подготовке любого физического эксперимента перед исследователем возникает проблема выбора оптимального соотношения между факторами, которые взаимно исключают друг друга. Так, например, при увеличении размера детектора частиц скорость счета возрастает, но это дает ухудшение пространственного разрешения системы наблюдения. Иногда исследуемые процессы происходят настолько редко, что определяющими факторами становятся либо шум детектора частиц, либо постороннее излучение из окружающего пространства. В этих условиях повышение информативности опыта достигается путем увеличения продолжительности наблюдения, что понижает эффективность использования имеющихся ресурсов.

Проблему разрешают мультиплексные детекторы частиц, которые имеют более высокие информационные характеристики, чем любой традиционный детектор частиц при равных физико-технических параметрах. Мультиплексные детекторы частиц обладают свойством сглаживать и ослаблять действия многих неблагоприятных факторов опыта. В основе разработанных мультиплексных детекторов частиц лежит дискретное преобразование Адамара и матрицы типа Адамара с циклическими свойствами /4-12,20,33,37,48/.

Мультиплексный сцинтилляционный счетчик частиц отличается от обычного сцинтилляционного счетчика частиц тем, что его сцинтиллятор состоит из нескольких элементарных сцинтилляторов (рис. 14). Каждый из них оптически изолирован от соседних, а световые вспышки

попадают в световод через торец элементарного сцинтиллятора. Группу из нескольких сцинтилляторов располагают не сплошным массивом, а с просветами. Рабочие участки и просветы группируются так, чтобы их пространственное расположение описывалось псевдослучайной функцией, принимающей значения 0 или 1.

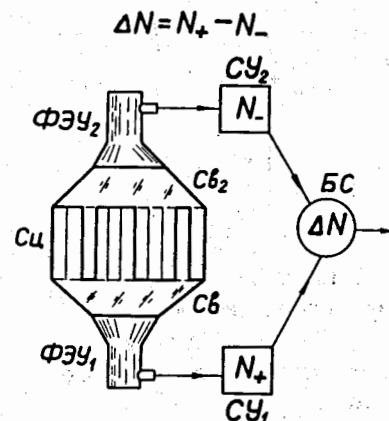


Рис. 14. Мультиплексный сцинтилляционный счетчик частиц.

В процессе измерения углового или пространственного распределения заряженных частиц световод и ФЭУ не меняют своего положения в пространстве. Изменяется только конфигурация расположений элементарных сцинтилляторов при переходе от одного измерения к другому. Число таких перестроек равно числу исследуемых угловых интервалов N . Если мультиплексный счетчик частиц содержит два ФЭУ, то составной сцинтиллятор состоит из двух групп элементарных сцинтилляторов, оптически изолированных друг от друга и перемещающихся одновременно в зазоре между двумя световодами. Две группы элементарных сцинтилляторов стыкуются друг с другом без просветов. Чередование направлений выхода света в один из двух световодов определяется псевдослучайной функцией, принимающей значения $+1$ или -1 . Мультиплексный сцинтилляционный счетчик дает выигрыш в отношении сигнала к шуму, который для счетчиков с двумя фотоумножителями равен \sqrt{N} , $N \gg 1/46,24/$.

В телескопе из мультиплексных счетчиков частиц (рис. 15) картина чередования направлений выхода света в сцинтилляторе первого счетчика представляет собой зеркальную картину чередований выхода света в сцинтилляторе второго счетчика. Электрические импульсы от четырех ФЭУ поступают на четыре схемы совпадений (рис. 16), которые регистрируют подгруппу одноименных совпадений C_{++} и C_{--} и подгруппу разноименных совпадений C_{+-} и C_{-+} . Двухчастичные события захватываются во

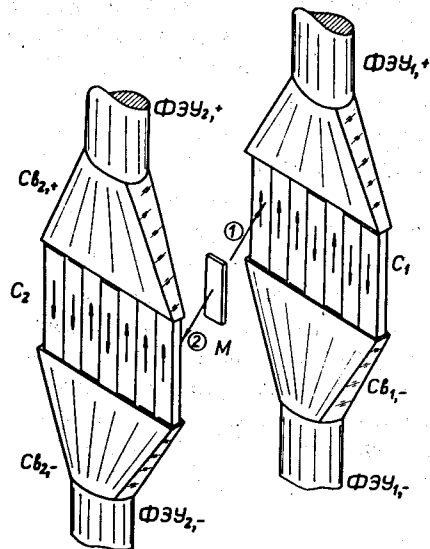


Рис. 15. Телескоп из двух мультиплексных счетчиков частиц.

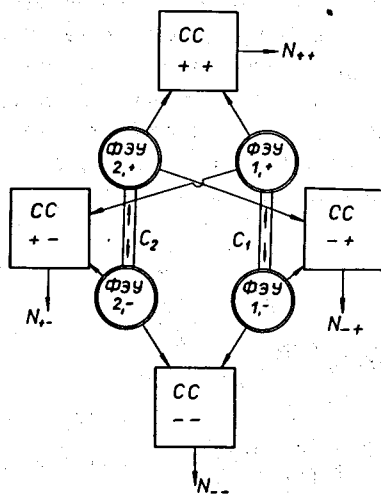


Рис. 16. Схема формирования четырех сигналов совпадений в телескопе из двух мультиплексных счетчиков частиц.

всем интервале углов, а острота отбора угловых корреляций определяется шириной одного элементарного сцинтиллятора. Если фоновые события распределены равномерно, то искомое число корреляций с углом разлета в 180° равно

$$n_{\text{корр}} = (C_{++} + C_{--}) - \frac{N^2 + 1}{N^2 - 1} (C_{+-} + C_{-+}), \quad (2)$$

а плотность фоновых событий

$$n_{\text{фон}} = 2(C_{+-} + C_{-+}) (N+1)^{-1} (N-1)^{-1}. \quad (3)$$

Магнитный спектрометр с однородным магнитным полем и кодирующими масками позволяет расширить возможности измерений энергетического спектра частиц, выпускаемых образцом с наведенной радиоактивностью. Для получения высокого разрешения по энергии толщину образца выбирают такой, чтобы заряженные частицы, идущие из глубины образца, теряли относительно малую энергию. Например, толщина источника α -частиц с энергией 5 МэВ и атомной массой $A > 100$ ограничена 10 мкг/см^2 при $\Delta E/E = 10^{-3}$. Требуемое разрешение по энергии и конечные линейные размеры самого магнитного спектрометра накладывают абсолютное ограничение на объем, из которого могут выходить частицы. Если образец имеет низкую объемную наведенную радиоактивность, то фон в спектрометре заглушает эффект от образца/9,26/.

Чтобы улучшить соотношение между эффектом и фоном, поглощающую диафрагму изготавливают из двух частей. Неподвижная часть имеет одно широкое окно, а вторая, подвижная, — два ряда вырезов, чередующихся с перемычками. Картина вырезов в первом ряду дополняет картину вырезов во втором. Вырезы и перемычки чередуются по закону псевдослучайного кодирования. В процессе измерения спектра подвижная часть совершает два вида движений: смену одного ряда вырезов на другой и перемещения подвижной части на ширину одного элемента. При переходе одного ряда вырезов к другому биполярный счетчик реверсирует.

Мультиплексная мишень позволяет ослабить эффект постороннего излучения в экспериментальном зале, которое не меняется при вводе в пучок или выводе из пучка мишени. Как и во всех рассмотренных выше случаях, ситуацию улучшает мультиплексная логика наблюдения. При этом мишень разрезают на элементарные части и располагают так, что мишень приобретает гребенчатую структуру с псевдослучайным чередованием элементов и просветов. Всего необходимо изготовить две гребенки, которые дополняют друг друга. В счетчики, регистрирующие вторичные частицы, попадают частицы, идущие в несколько угловых интервалов, а не в один угловой интервал, как это обычно имеет место. В процессе измерения углового распределения частиц элементарные части мишени перестраивают так, чтобы выполнялся закон псевдослучайного кодирования. При переходе от одной гребенки к другой биполярный счет-

чик реверсируют. Аналогичными свойствами обладает мультиплексный бифокальный черенковский счетчик частиц /8/.

В диссертации дан анализ мультипликативной помехи, которая является основным препятствием для наблюдения тонких особенностей исследуемого распределения с относительной величиной вариации $10^{-2} - 10^{-4}$.

Был разработан мультиплексный измеритель эмиттанса пучка ионов, который является дважды мультиплексной системой. Он содержит два экрана с неподвижными окнами и две подвижные шторки (рис. 17). Последние имеют вырезы и перемычки, расположенные псевдослучайно. В апертуре первого окна вмещается N элементов, а в апертуре второго окна $(2N - 1)$ элементов шторок. Цилиндр Фарадея регистрирует электрический ток, который создают ионы, прошедшие через вырезы в двух шторках. Моделирование на ЭВМ мультиплексного измерителя эмиттанса пучка ионов показало, что сокращение времени измерения равно $30 : 1$ для $N = 11$ и быстро увеличивается с возрастанием N .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований и разработок новых методов повышения эффективности научных исследований. Сущность этих новых методов состоит в использовании интегрального преобразования наблюдаемых величин на стадии измерений. Описаны эксперименты, которые подтверждают правильность исходных положений, а также приведены результаты моделирования на ЭВМ, позволяющие оценить количественные характеристики методов и ожидаемое повышение эффективности научных исследований.

На основе теоретических и экспериментальных исследований новых методов были поставлены и принципиально решены следующие актуальные

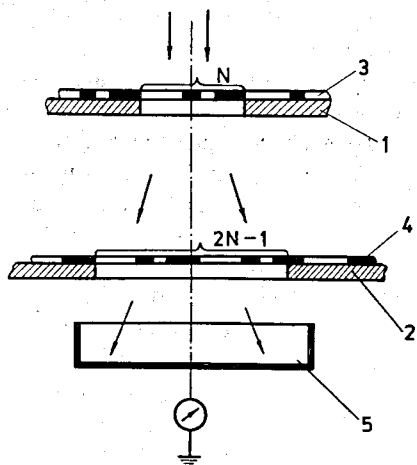


Рис. 17. Схема мультиплексного измерителя эмиттанса пучка ионов: 1 и 2 — неподвижные шторки, 3 и 4 — подвижные многочелевые шторки, 5 — цилиндр Фарадея.

проблемы экспериментальной физики: проблема создания оптического микроскопа-автомата для ядерной фотоэмульсии; проблема быстрой топологической обработки, картинной информации на фотографиях с трековых камер; проблема повышения чувствительности и надежности оптических теневых приборов, используемых для контроля оптических неоднородностей; проблема повышения информативности эксперимента в условиях, когда физико-технические параметры детекторов частиц достигли своих предельных значений или дают низкое отношение сигнала к шуму.

Научная новизна исследований заключается в том, что автор обосновал теоретически и экспериментально ряд нетрадиционных методов повышения эффективности научных исследований, а также разработал пути решения актуальных проблем экспериментальной физики.

Результаты выполненных автором исследований показали, что поставленные проблемы могут быть решены, если произвести коренную перестройку традиционной логики измерений и заменить ее логикой, в основе которой лежит интегральное преобразование наблюдаемых величин на стадии измерения или считывания информации, причем это преобразование необходимо произвести и закончить раньше, чем результаты измерений поступят в блок записи данных. Перестройка логики измерений влечет за собой изменение конструкций соответствующих приборов, а также алгоритмов обработки измеренных данных. Указанные принципиальные перестройки конструкций приборов приводят к существенному повышению информативности, быстродействия, стойкости к неблагоприятным условиям опыта, и, как следствие всего этого, — к повышению эффективности, в том числе экономической, научно-исследовательского процесса.

Практическая значимость проведенных исследований состоит в том, что автором указаны новые резервы существенного повышения эффективности научных исследований, непосредственно разработаны адекватные для каждой проблемы пути реализации нетрадиционных методов экспериментальной физики в конструкциях конкретных приборов и устройств и доказана эффективность этих методов.

Полученные в диссертации результаты свидетельствуют о перспективности разработанных методов, которые могут быть рекомендованы для внедрения их в технику физического эксперимента.

В ходе проведенных исследований были:

1) найдены принципиально новые схемы оптических фурье-микроскопов для ядерной фотоэмульсии, позволяющие ускорить просмотр ядерной фотоэмульсии и автоматизировать обмен событиями;

2) построены и исследованы алгоритмы топологического сканирования прямых треков при помощи преобразования Уолша, предложены новая конструкция прибора с зарядовой связью и новые алгоритмы секторного сканирования прямых треков;

3) разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы новые элементы и приборы гильберт-оптики;

4) исследованы путем моделирования на ЭМ различные конструкции мультиплексных детекторов частиц, мультиплексный измеритель эмиттанса пучка ионов, а также проанализированы свойства системы, которая содержит как традиционный, так и мультиплексный детекторы частиц.

На основании результатов работ, обобщенных в данной диссертации, автор приходит к выводу, что принципиально новое направление в экспериментальной физике, основанное на интегральных преобразованиях наблюдаемых величин, является перспективным и заслуживает дальнейшего развития.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на Первой всесоюзной конференции по проблемам передачи информации лазерным излучением (Киев, 1968 г.), Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий (Дубна, 1970 г.), Конференции по автоматизации научных исследований на основе ЭМ (Новосибирск, 1974 г.), Второй всесоюзной конференции по голографии (Киев, 1975 г.), Первом всесоюзном симпозиуме по оптическому приборостроению и голографии (Львов, 1976 г.), Всесоюзных школах по голографии (Долгопрудный, 1969 и 1970 гг., Новосибирск, 1973 г. и Ереван, 1974 г.), Международных симпозиумах по теории и применению функций Уолша (Вашингтон, США, 1972 и 1973 гг.), Международном симпозиуме по теории и применению функций Уолша (Хатфильд, Англия, 1975 г.), рабочих совещаниях по нейтринному детектору (Дубна, 1980 и 1981 гг.).

Представленные в диссертации исследования и разработки изложены в 29 научных публикациях (ссылки 1 - 29), 6 обзорах (ссылки 30 - 35) и обобщены в трех монографиях (ссылки 36 - 38). Приборы и методы, описанные в диссертации, защищены 11 авторскими свидетельствами СССР (ссылки 39 - 49). Экспонат "Теневые приборы" демонстрировался на ВДНХ в павильоне "Физика" в 1978 г. и награжден серебряной медалью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сороко Л.М. - В кн.: Проблемы передачи информации лазерным излучением. Унив. им. Т.Г. Шевченко, Киев, 1969, с. 176.
2. Сороко Л.М. - В кн.: Труды Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, ОИЯИ, Дубна, 1971, т. 2, с. 789.
3. Сороко Л.М. - В кн.: Вторая всесоюзная школа по голографии, ЛИЯФ, Л., 1971, с. 40.
4. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-5696, Дубна, 1971.

5. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-5699, Дубна, 1971.
6. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-5722, Дубна, 1971.
7. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-5896, Дубна, 1971.
8. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-6019, Дубна, 1971.
9. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-6032, Дубна, 1971.
10. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-6078, Дубна, 1971.
11. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-6378, Дубна, 1972.
12. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-6388, Дубна, 1972.
13. Сороко Л.М., Суетин В.А. ОИЯИ, П13-6565, Дубна, 1972.
14. Сороко Л.М., Стриж Т.А., Суетин В.А. ОИЯИ, П13-6607, Дубна, 1972.
15. Сороко Л.М., Суетин В.А. ОИЯИ, Б-1-13-7541, Дубна, 1973.
16. Сороко Л.М., Стриж Т.А. ОИЯИ, П10-7563, Дубна, 1974.
17. Кожевникова С.О., Сороко Л.М. ОИЯИ, П10-7757, Дубна, 1974.
18. Сороко Л.М. - В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭМ, Новосибирск, 1974, с. 81.
19. Сороко Л.М. ОИЯИ, П13-9831, Дубна, 1976.
20. Сороко Л.М. ОИЯИ, Р9-10975, Дубна, 1977.
21. Сороко Л.М. ОИЯИ, П10-11515, Дубна, 1978.
22. Сороко Л.М. ОИЯИ, Б1-13-81-229, Дубна, 1981.
23. Сороко Л.М., Лыков В.В. ОИЯИ, Б1-13-81-312, Дубна, 1981.
24. Soroko L.M. - In: Proc. 1972 Walsh Functions Symposium. - Washington, D.C., USA, 1972, p. 36.
25. Soroko L.M. - In: Proc. 1972 Walsh Functions Symposium. - Washington, D.C., USA, 1972, p. 42.
26. Soroko L.M. - In: Proc. 1972 Walsh Functions Symposium. - Washington, D.C., USA, 1972, p. 45.
27. Soroko L.M. - In: Proc. 1973 Walsh Functions Symposium. - Washington, D.C., USA, 1973, p. 294.
28. Soroko L.M. - In: Proc. Walsh Symposium, Hatfield, England, 1975, p. 101
29. Kozhevnikova S.O., Soroko L.M. CERN -Geneva, 1976.
30. Сороко Л.М. ЭЧАЯ, 1972, т.3, №3, с.688.
31. Сороко Л.М. - В кн.: Пятая всесоюзная школа по голографии, Л., ЛИЯФ, 1973, с. 40.
32. Сороко Л.М., Стриж Т.А. ОИЯИ, П10-6701, 1972.
33. Сороко Л.М. ПТЭ, №5, 1973, с. 7.
34. Сороко Л.М. ЭЧАЯ, 1979, т. 10, №5, с.1038.
35. Сороко Л.М. УФН, 1966, т. 90, №1, с. 1.
36. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики, "Наука", М., 1971 (translated into English: Soroko L.M., Holography and coherent optics, Plenum Press, N.Y. 1980).

37. Сороко Л.М. Мультиплексные системы измерений в физике, Атомиздат, М., 1980.
38. Сороко Л.М. Гильберт-оптика, "Наука", М., 1981.
39. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР №200023 от 11.04.66, Бюлл. ОИПОТЗ, 1967, №16, с. 58.
40. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №211682 от 01.10.65, Бюлл. ОИПОТЗ, 1968, №8, с. 66.
41. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №300849 от 06.09.69, Бюлл. ОИПОТЗ, 1971, №13, с. 196.
42. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №300850 от 06.09.69, Бюлл. ОИПОТЗ, 1971, №13, с. 197.
43. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №324598 от 29.01.70, Бюлл. ОИПОТЗ, 1972, №2, с. 148.
44. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №366430 от 27.04.70, Бюлл. ОИПОТЗ, 1973, №7, с. 88.
45. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №382985 от 14.04.71, Бюлл. ОИПОТЗ, 1973, №23, с. 128.
46. Сороко Л.М., Суетин В.А. Авторское свидетельство СССР, №398910 от 14.12.71, Бюлл. ОИПОТЗ, 1973, №38, с. 140.
47. Сороко Л.М., Суетин В.А. Авторское свидетельство СССР, №512412 от 08.02.74, Бюлл. ОИПОТЗ, 1976, №16, с. 123.
48. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №611319 от 04.10.76, Бюлл. ОИПОТЗ, 1978, №22, с. 187.
49. Сороко Л.М. Авторское свидетельство СССР, №708807 от 03.04.78, Бюлл. ОИПОТЗ, 1981, №11, с. 265.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июня 1981 года.