

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С. А. МОЛОДЯКОВ, С. И. ИВАНОВ, А. П. ЛАВРОВ

**ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ**

**(элементы, теория преобразований,
процессоры, моделирование)**

Санкт-Петербург
2012

УДК 004.386, 621.371

Молодяков С.А., Иванов С.И., Лавров А.П. Основы оптической обработки информации (элементы, теория преобразований, процессоры, моделирование): учебное пособие. СПб.: СПбГПУ, 2012.- 175 с.

В учебном пособии рассмотрены классические и современные методы и устройства оптической обработки информации. Изложены вопросы теории оптических преобразований, рассмотрены структурные схемы оптических процессоров и их элементов, описана технология моделирования.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Оптические процессоры», «Оптическая обработка информации» и др.

© Молодяков С. А., Иванов С. И., Лавров А. П., 2012
© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

Перечень основных условных сокращений

Условное сокращение	Значение
АО	Акустооптика
АОМ	Акустооптический модулятор
АОС	Акустооптический анализатор спектра
ВЗН	Временная задержка и накопление
ВКФ	Взаимно корреляционная функция
ВМП	Вектор-матричный перемножитель
ВШ	Волоконнооптическая шайба
ГМ	Гибридный микромодуль (микросхема)
ЖК	Жидкий кристалл
КМОП-ФД	КМОП-фотодетектор
ОТ	Оптический транспарант
ПЗС	Прибор с зарядовой связью
ПФ	Пространственный фильтр
СИД	Светоизлучающий диод
ФП	Фотоприемник
ФПЗС	ПЗС-фотоприемник

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Цифровые оптические элементы. Оптический компьютер.....	11
Бистабильные оптические логические элементы	13
Волноводные логические элементы	15
Оптический цифровой процессор. Метод управляющих операторов.....	16
Голографическая память.....	20
Глава 2. Основные понятия оптики. Законы геометрической оптики.	
Оптические элементы.	24
Основные понятия	24
Законы геометрической оптики.....	26
Единицы измерения	28
Оптические элементы	29
Построение изображения точки и предмета в собирающей линзе	32
Формула тонкой линзы (Формула Гаусса)	33
Матричное представление	34
Глава 3. Волновая оптика. Преобразование Фурье в оптике.....	37
Уравнение электрического поля световой волны	37
Дельта-функция Дирака.....	40
Двумерное преобразование Фурье в оптике.....	41
Физический смысл двумерного Фурье- преобразования	42
Основные свойства преобразования Фурье.....	44
Некоторые часто используемые функции и полезные пары преобразований Фурье	47
Импульсный отклик и передаточная функция	48
Интеграл суперпозиции	49
Пространственно-инвариантные системы.....	49
Глава 4. Распространение света.....	52
Плоская волна в декартовых координатах	52
Уравнение распределения света после распространения его в свободном пространстве	54
Параксиальное приближение.....	57
Дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера.....	57
Элементарный оптический процессор. Преобразование Фурье в линзе	59
Функция пропускания линзы.....	60
Простейшая когерентная оптическая система, выполняющая преобразование Фурье.....	61
Глава 5. Лазеры и особенности лазерного излучения.....	63
История создания лазеров и основные законы квантовой оптики	63
Ширина линии излучения	66
Активная среда.....	66
Схема лазера	69
Моды излучения лазера	70
Газовые лазеры.....	72
Полупроводниковые лазеры	75
Внешняя обратная связь	78
Лазерные модули на полупроводниковых лазерах	79
Волоконнооптические лазеры	80
Глава 6. Фотоприемники	82
ПЗС-фотоприемники.....	82
Фотодиоды и КМОП-фотоприемники.....	92
Цветные ПЗС-фотоприемники.....	97
Возможности по дополнительной обработке информации в ПЗС-фотоприемниках	97
Некоторые параметры ПЗС-фотоприемников	103
Глава 7. Оптические волноводы.....	107
Основы организации оптических волноводов.....	107
Классификация.....	108

Потери при распространении	111
Дисперсия при распространении	112
Спектральное мультиплексирование	113
Волоконно-оптические шайбы	114
Гибридная микросхема с использованием волоконно-оптических шайб	114
Глава 8. Транспаранты	118
Методы модуляции света	118
Электрооптические транспаранты	120
Двойное лучепреломление	120
Электрооптический модулятор	121
Магнитооптика	123
Жидкие кристаллы	124
ЖК-транспаранты	125
АО-транспаранты	126
Дифракция Рамана - Ната (Дебая-Сирса)	127
Дифракция Брэгга	128
Конструкция акустооптического модулятора	129
Глава 9. Когерентные и некогерентные оптические процессоры	132
Когерентный оптический процессор - схема пространственной фильтрации	132
Многоканальный оптический процессор с фильтрацией сигнала в области пространственных частот	137
Схема фильтрации сигналов в предметной области	138
Фильтры Вандер Люгта. Оптический процессор с фильтром Вандер Люгта	139
Некогерентные оптические процессоры	144
Глава 10. Акустооптические процессоры	147
Акустооптические анализаторы спектра	147
Акустооптические корреляторы и конвольверы	150
Глава 11. Моделирование в среде GLAD	160
Программные среды для моделирования и разработок оптических систем	160
Среда моделирования GLAD	162
Простой пример. Элементарный оптический процессор	163
Форматы вывода	165
Некоторые оптические компоненты	166
Команда установки линзы	166
Команды распространения излучения (Propagation)	167
Формат представления амплитудно-фазового распределения в световом пучке	167
Команды ввода/вывода данных амплитудно-фазового распределения	168
Пример формирования матрицы входного распределения и записи в файл	169
Пример записи в файл матрицы выходного распределения	169
Оптический процессор свертки (пространственной фильтрации)	170
Список некоторых команд GLAD	173
Библиографический список	175

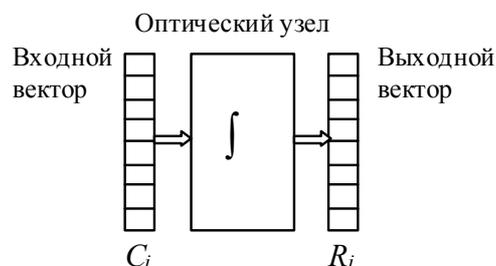
Введение

В последнее десятилетие стремительно развиваются все направления вычислительной техники, особенно те, которые связаны с повышением скорости вычислений. Ввиду технологических ограничений на рост тактовых частот электронных процессоров все больше внимания уделяют исследованию и созданию новых архитектур отдельных процессоров, построенных на новых физических принципах, а также мультипроцессорных (многоядерных) систем с разнородными процессорами. Особые надежды возлагаются на использование методов оптической обработки информации [1-5].

Перечислим основные возможности, которые предоставляет оптика:

1. Обработка информации в оптическом процессоре осуществляется в процессе переноса изображения через оптическую систему, реализующую вычислительную среду, работающую со скоростью света при естественной параллельности вычислений. Оптический процессор по классификации параллельных вычислительных систем Флинна можно рассматривать как векторный процессор класса SIMD, выполняющий интегральные векторные преобразования. Размер входного вектора оценивается для 1D процессора в 10^3 элементов, а для 2D процессора в 10^6 элементов. Производительность оптического процессора, осуществляющего преобразование Фурье, можно определить в 10^{17} элементарных операций в секунду при длине оптической системы порядка 3см (для быстрого Фурье-преобразования: $N \cdot \log N / 10^{-10}$).

2. Коммутация информационных каналов осуществляется с большой скоростью и отличается простотой реализации за счет того, что лучи света в свободном пространстве распространяются, не взаимодействуя друг с



другом. Возможности построения оптических коммутаторов особенно интересны при создании многопроцессорных систем. В частности такие возможности исследуются в фирме Intel.

3. Использование третьего измерения для обработки в 3D оптических процессорах и ввода/вывода информации в оптоэлектронных чипах создает дополнительные возможности, которых у электронных процессоров и соединений нет никаких аналогов.

4. За счет когерентной обработки, использования фазовых соотношений, появляются дополнительные возможности, в частности по работе с комплексными числами.

5. Низкое энергопотребление. В процессе распространения света информация, закодированная оптическим лучом, обрабатывается практически без затрат энергии.

6. Оптическая система нечувствительна к электромагнитным помехам, а также она ничего не излучает во внешнюю среду, обеспечивая защиту компьютера от перехвата информации.

С момента появления полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре (1970 год, И.Хаяси) наблюдался всплеск интереса к оптике. Появилось понятие оптическая вычислительная техника, в рамках которой выделяют следующие направления:

1. Цифровые оптические процессоры и их элементы.
2. Оптическая связь (межкристальная и глобальная, открытый и закрытый канал) и коммутация каналов.
3. Оптическая память, в том числе голографическая.
4. Специализированные оптические и оптоэлектронные процессоры.

По каждому из направлений достигнуты определенные успехи, но многолетних ожиданий, они явно не оправдывают. Всеобщий интерес к созданию универсальных оптических компьютеров 1970-80 годов

существенно ослаб, стало ясно, современная технология электронной техники существенно опережает оптическую технологию. Цифровые оптические элементы, такие как трансфазор, волноводный модулятор, жидкокристаллический оптический затвор или связка фотодиод-лазер, не могут заменить электронный транзистор. Перенос традиционной цифровой архитектуры на оптическую элементную базу вряд ли перспективен. Нужны иные архитектуры, которые бы использовали новые технологии. Интересны систолические конвейерные матричные архитектуры, в которых благодаря развитому параллелизму и регулярности продвижения данных эффективно обрабатывается потоковая информация.

Второе направление связано не только с использованием волоконнооптических линий связи, но и оптических коммутаторов. В объемных коммутаторах луч лазера может направляться на любой элемент фотоприемника. В плоских коммутаторах матрицы лазеров и фотоприемника соединены через волоконнооптическую шайбу, и коммутация каналов осуществляется путем их соединения/отсоединения (включения или нет лазера).

Оптические коммутаторы наиболее эффективно использовать при создании нейронных сетей. Мощность нейронных сетей определяется большим количеством связей; взятые отдельно элементы имеют относительно малые вычислительные возможности. Взаимное соединение нейронов с помощью световых лучей во многом снимает ограничения присущие электронным цепям. Сигнальные пути в сетях не требуют изоляции, могут быть расположены в трех измерениях, световые потоки могут проходить один через другой без взаимного влияния. Все сигнальные пути могут работать одновременно, тем самым, обеспечивая огромный темп передачи данных. Одним из первых нейронных процессоров является оптическая интегральная схема фирмы Mitsubishi.

Она представляет собой нейронную сеть Хопфилда с матрицей 32x32 межсоединений, играющих роль регулируемых синаптических связей.

Разработка оптической памяти после создания CD-дисков находится в центре внимания. Можно выделить два основных направления работ: разработка голографической памяти и создание ассоциативной памяти для цифровых процессоров. Проблема голографических дисков в настоящее время связана с созданием материалов, обеспечивающих неразрушающее хранение фазовой голограммы. Проблема использования оптической ассоциативной памяти связана с преодолением разнородности оптики и цифры, с созданием гибридных систем.

Большинство предлагаемых идей и архитектур, связанных с использованием оптических элементов, стали применять для построения не универсальных, а специализированных оптических процессоров, которые отличались тем, что выполняли одну базовую операцию и были окружены электронными устройствами для ввода и вывода данных. Такие процессоры в той или иной степени были оптоэлектронными [6]. Главная проблема оптического процессора – его статичность, трудность изменения алгоритма обработки, в более широком смысле - невозможность настройки (конфигурирования) на решение различных задач, преодолевались за счет элементов электронного и цифрового окружения. В оптоэлектронных (ОЭ) процессорах высокие скорости и параллельность оптических преобразований сочетаются с традиционными электронными и цифровыми методами обработки. В рамках мультипроцессорных систем такие гибридные ОЭ-процессоры особенно эффективно применять на этапе предварительной обработки данных. ОЭ-процессоры позволяют встраивать оптические вычислители в современные системы обработки информации, обеспечивая для них лучшие характеристики по производительности, габаритам и энергопотреблению.

Однако для эффективного использования возможностей ОЭ-процессоров необходимо постоянно внедрять современные технологические достижения, разрабатывать новые устройства и алгоритмы обработки сигналов.

Основная цель данного пособия – рассмотреть современные возможности оптических процессоров и особенности их применений, изложить вопросы теории оптических преобразований, показать направления и возможности расчета и моделирования оптических устройств.

Учебное пособие предназначено для студентов и специалистов, начинающих работать в области оптических и оптоэлектронных элементов и устройств и изучающих дисциплины «Оптические процессоры», «Оптическая обработка информации» и др.

Глава 1. Цифровые оптические элементы. Оптический компьютер

Оптический компьютер — компьютер, основанный на использовании оптических процессоров. В отличие от обычных компьютеров, основанных на электронных технологиях, в оптических компьютерах операции выполняются путём манипуляции потоками оптического излучения.

Бистабильный элемент — элемент обладает двумя стационарными состояниями, в каждом из которых он может находиться неограниченно долго. Переход из одного состояния в другое осуществляется в ответ на внешнее воздействие, интенсивность которого должна превысить некоторый пороговый уровень.

Быстродействие оптического процессора

Элементарный оптический процессор (рис.1.1) [9]. Если входная и выходная плоскости оптической системы совпадают с передней и задней фокальной плоскостями сферической линзы и на вход такой системы поступает оптический сигнал $U_1(x_1, y_1)$, то на выходе появляется сигнал, связанный со входным сигналом следующим соотношением:

$$U_2(x_2, y_2) = C \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) e^{\frac{j2\pi}{\lambda F}(x_1 x_2 + y_1 y_2)} dx_1 dy_1 = C \cdot U(\xi, \eta), \quad (1.1)$$

где F – фокусное расстояние оптической системы, λ - длина волны оптического сигнала, x_2, y_2 - координаты в выходной плоскости системы. Таким образом, выходной сигнал рассматриваемой простейшей оптической системы с точностью до постоянного множителя совпадает с фурье-образом входного сигнала. Следует отметить, что фурье-образ входного оптического сигнала существует в виде физически реального пространственного распределения комплексных амплитуд света.

Быстродействие описанного процессора при условии разрешения $10^3 \times 10^3$ точек и длине $F=15\text{cm}$ (задержка $t=1 \text{ ns}$) при выполнении быстрого

Фурье-преобразование составляет 2×10^{16} FLOPS $= (N \log N) / t$: $20 \times 10^6 / 10^{-9}$ sec. При выполнении интегрального преобразования - аналоговое умножение и суммирование, быстродействие - $(10^6)2 / 10^{-9}$ sec = 10^{21} . Имеются известные, традиционные ограничения скорости ввод - вывод информации. В результате эквивалентное быстродействие можно оценить на уровне 2 GFLOPS $= N \log N$: $10^6 \times 20 / 10^{-2}$.

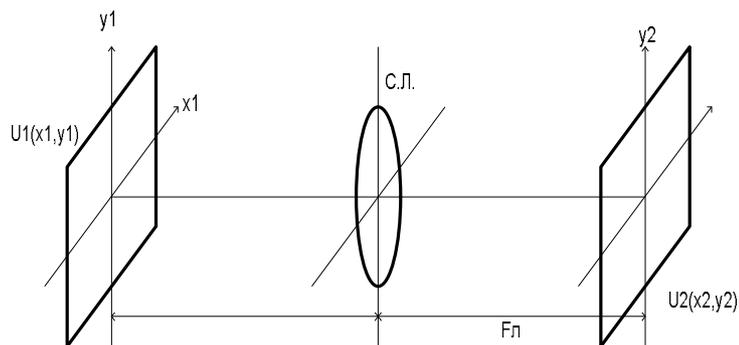


Рис. 1.1. Элементарный оптический процессор.

Нобелевские премии по оптике и оптоэлектронике

1964 г. Прохоров, Басов и Таунс получили Нобелевскую премию за работу по созданию квантовых генераторов и усилителей, основанных на лазерном принципе.

1953 г. Ф. Цернике - создание метода пространственной фильтрации изображений в когерентном свете.

1971 г. Д. Габор - получил премию за изобретение голографического метода.

1962 г. Юрий Николаевич Денисюк - ГОИ, ФТИ - изобретатель голографии, разработал метод регистрации голографических изображений.

2009 г. Лауреатами Нобелевской премии по физике за стали Чарльз Као за работы по волоконной оптике и американцы Уиллард Бойл и Джордж Смит за разработку ПЗС-фотоприемников.

Цифровые оптические процессоры

- В 80-е годы прошлого века интенсивно работали над созданием полностью оптических компьютеров нового поколения. Сердцем такого компьютера должен был стать оптический процессор, использующий элементы, в которых свет управляет светом, а логические операции осуществляются в процессе взаимодействия световых волн с веществом. Значительные усилия, направленные на создание оптического компьютера, привели к определенным успехам.

- В 1984 году Б. Дженкинс из Университета Южной Калифорнии продемонстрировал первый цифровой оптический компьютер, выполнявший достаточно сложную последовательность команд. Взаимодействие двух лучей осуществлялось элементом, состоящим из жидкого кристалла и фотопроводника. (такт. частота 1 МГц, 32 бита)

- В 1990 г. в лабораториях американской фирмы "Белл" был создан макет цифрового оптического устройства. Основу процессора составляли двумерные матрицы бистабильных элементов. (self-electro-optic-effect devices - SEED)

Бистабильные оптические логические элементы

На основе полупроводниковых лазеров (Н.Г.Басов ФИАН)

1. Связки инъекционных полупроводниковых лазеров - излучение одного гасит генерацию другого [1].

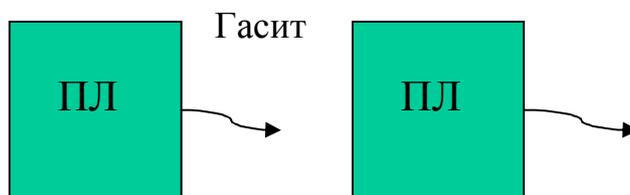


Рис. 1.2. Бистабильный элемент из двух лазеров.

2. Переключательный элемент - пара полупроводниковый лазер - фотодиод.

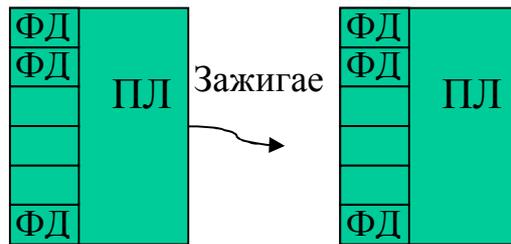


Рис. 1.3. Бистабильный элемент на основе фотодиода и лазера.

Трансфазор

Трансфазор представляет собой оптический аналог электронного транзистора и является оптически бистабильным прибором, способным переключаться в одно из двух четко различимых состояний за время, измеряемое пикосекундами. Он может иметь такие же малые размеры, как и электронный транзистор.



Рис. 1.4. Структурная схема трансфазора.

Коэффициент отражения зеркал 90%. Показатель преломления n зависит от интенсивности I по закону: $n = n_0 + n_2 I$.

Конструктивная интерференция - разность фаз прямого и обратного пучков кратна 2π . Оптическая длина резонатора $(L=l*n)$ $L=k*\lambda/2$.

Деструктивная интерференция - разность фаз прямого и обратного пучков кратна $(2n+1)\pi$. Оптическая длина резонатора $L=(k+0.5)*\lambda/2$.

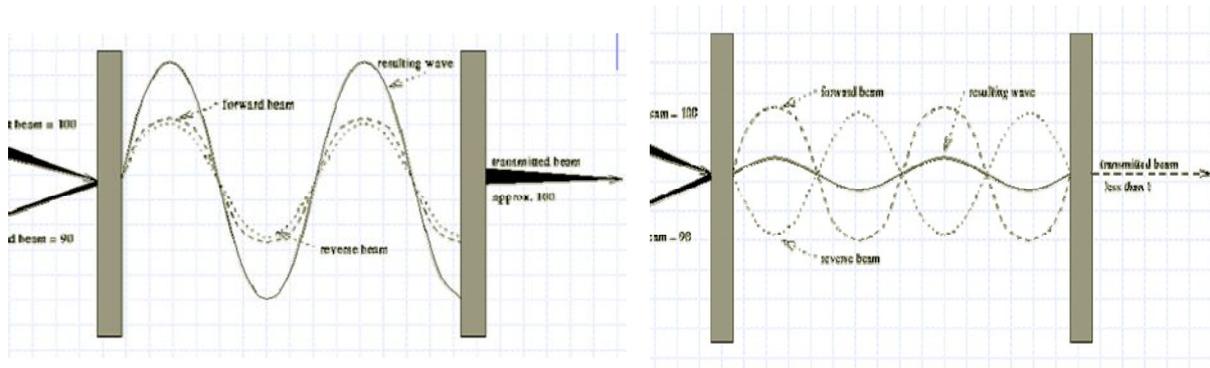


Рис. 1.5. Конструктивная и деструктивная интерференция.

Функция Эйри - зависимость пропускания интерферометра от длины резонатора. Проследивая за изменением положения рабочей точки при изменении входной мощности $I_{вх}$, можно построить зависимость (рис. 1.6.). Для оптического резонатора длины 10 мкм время переключения 0,1 пс.

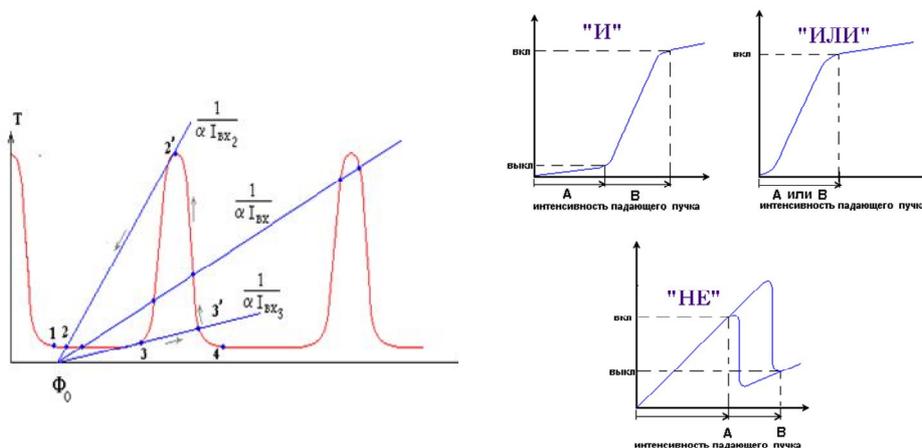


Рис. 1.6. Функция Эйри и реализации логических элементов.

Волноводные логические элементы

Волноводный модулятор представляет собой интерференционный прибор, осуществляющий амплитудную модуляцию входного оптического сигнала, представляющего собой линейно поляризованное световое излучение лазера. Входной волновод модулятора разветвляется на два параллельных канала, которые затем снова сливаются, образуя выходной волновод. Волновод изготавливается из материала, обладающего

электрооптическим эффектом. Обе ветви волновода симметричны, поэтому входной световой сигнал на разветвлении делится на две равные по амплитуде волны, которые далее распространяются по параллельным каналам с относительным сдвигом фаз. Разность фаз этих волн определяется электрическим напряжением, приложенным к управляющим электродам. Логическая "1" отождествляется со значением напряжения U_0 , а двоичный "0" - с нулевым потенциалом. Таким образом, если напряжение U_0 приложено к четному числу управляющих электродов, то волны, сходящиеся в выходном разветвлении усиливают друг друга, образуя выходной оптический сигнал с амплитудой, практически равной амплитуде входного сигнала, который принимается за единичный сигнал. В противном случае волны практически полностью гасят друг друга, образуя нулевой выходной сигнал.

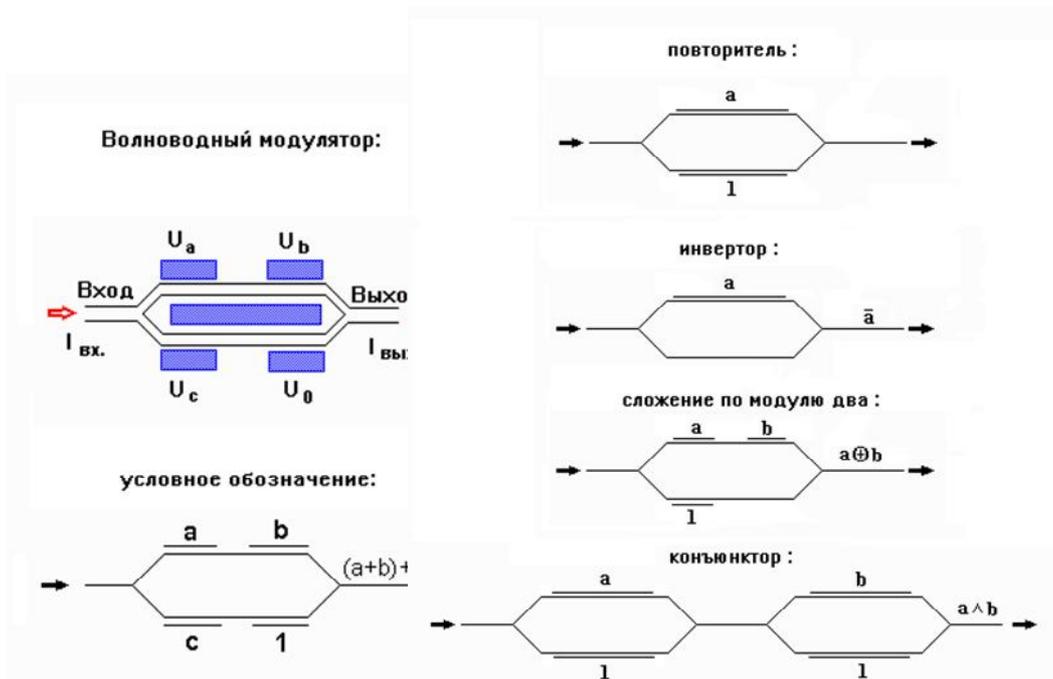


Рис. 1.7. Волноводные логические элементы.

Оптический цифровой процессор. Метод управляющих операторов

Рассмотрим подробнее метод управляющих операторов, в связи с тем,

что он с наибольшей вероятностью может быть реализован на уровне современной элементной базы. Сущность метода управляющих операторов заключается в том, что каждой логической или арифметической операции соответствует набор операторов, зависящий только от вида операции и не зависящий от набора переменных. В памяти хранятся только виды операций, а не их результаты [4].

Переменные и операторы представляются на транспарантах в виде прозрачных (отражающих) и непрозрачных (неотражающих) элементов. При этом используется метод парафазного кодирования, при котором единицы представляется как 10, а ноль как 01. В качестве примера рассмотрим выполнение логической операции «И» над четырьмя переменными $K = \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}$. Черточка означает отрицание. Оптическая схема выполнения этой операции представлена на рис.1.8. Отраженный свет может быть только в тех ячейках транспаранта, где присутствует свет как от операторного, так и числового полей. Цилиндрическая линза собирает свет в вертикальном направлении. Наличие света в фокальной плоскости линзы означает, что результатом логического умножения является 0, а его отсутствие - 1. Очевидно, что $K=1$ - только в наборе 1111. В фокальной плоскости линзы находится детектор, инвертирующий поступающий сигнал и преобразующий его в электрический. Таким образом единичный импульс появится на выходе детектора только в том случае, если на его входе не будет света вообще. При выполнении логических и арифметических операций важен порядок чередования светлых и темных полей. Так, если 1 представлена в виде 10, то в операторном поле для осуществления логического умножения порядок меняется на обратный. При введении отрицания также надо менять чередование. Аналогично могут выполняться операции "или", "или-не" и т.д.

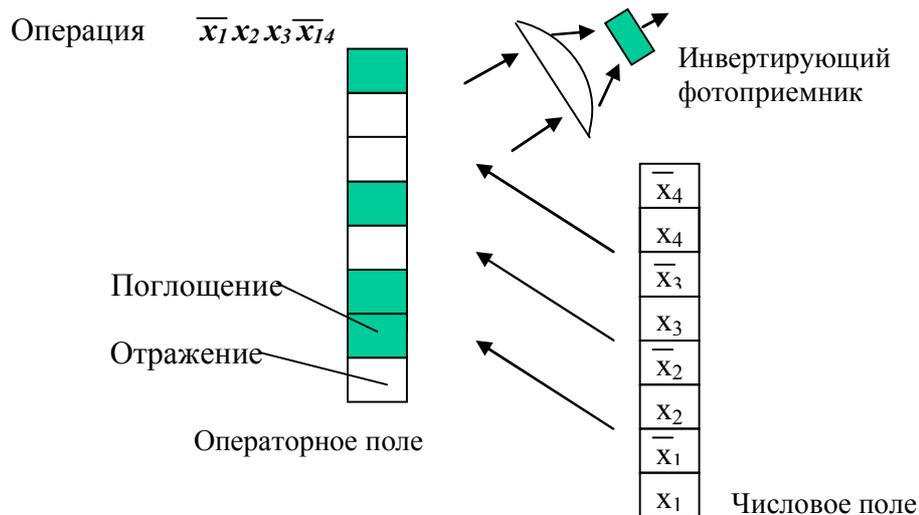


Рис. 1.8. Оптическая схема и вид операторного поля в методе управляющих операторов.

Метод управляющих операторов нашел свое наиболее яркое воплощение в работах П.Гилфойла по созданию универсального оптоэлектронного компьютера. В его основе лежит полностью цифровой ОЭ вектор-матричный перемножитель (ВМП), схема которого представлена на рис.1.9. Она включает линейку светоизлучающих диодов (СИД), матричный транспарант и линейный фотоприемник. Схема выполняет одновременно весь набор комбинаторных функций $\{f_i\}$. Отличительной особенностью данной схемы от обычных ВМП (классическая схема – стэнфордский перемножитель) является двоичный характер входного вектора (парафазное кодирование) и фотоприемника. Уравнение, описывающее работу схемы, имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \dots & \xi_{1N} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \dots & \xi_{2N} \\ \dots & & & \\ \xi_{M1} & \xi_{M2} & \dots & \xi_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \overline{x_1} \\ \dots \\ x_{N/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{f_1} \\ \overline{f_2} \\ \dots \\ \overline{f_M} \end{bmatrix}$$

При оценке быстродействия необходимо различать два режима работы: вычисления с постоянной матрицей транспаранта и с изменяемой матрицей. В первом случае результат перемножения может быть получен

на каждом такте введения входного вектора $\{x_i\}$, а во втором только после загрузки всех элементов транспаранта новыми значениями. Можно расширить возможности схемы (рис.1.9), задавая в качестве входного вектора $\{x_i\}$ не бинарный, а многоградационный сигнал цифровой или аналоговый. Выходной вектор в этом случае будет также многоградационным.

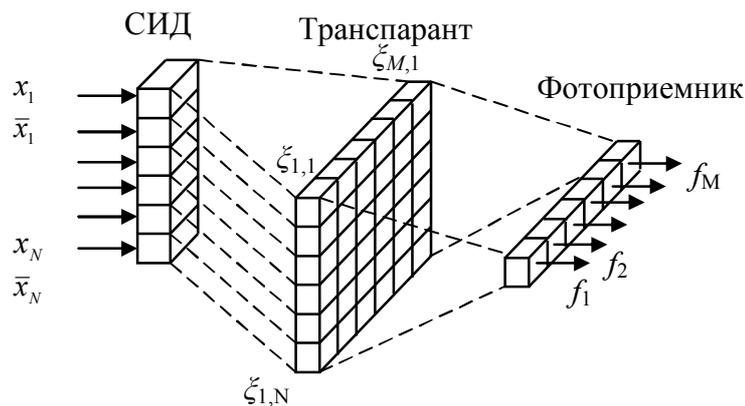


Рис. 1.9. Схема вектор-матричного перемножителя.

Известны исследования по созданию интегральных гибридных схем типа ВМП. Можно выделить два направления интегральной оптики – это гибридные схемы с распространением оптического сигнала по поверхности и схемы с распространением сигнала в оптической подложке. Структурная схема ВМП второго типа, предложенная М.Груббером и др. (Германия), представлена на рис. 1.10. Оптические сигналы распространяются в подложке, имеющей размеры около 6 мм. Снизу подложки расположено алюминиевое зеркало, а сверху на поверхности располагаются излучатели, транспарант, фотоприемник и фокусирующие элементы, выполненные в виде микролинз.

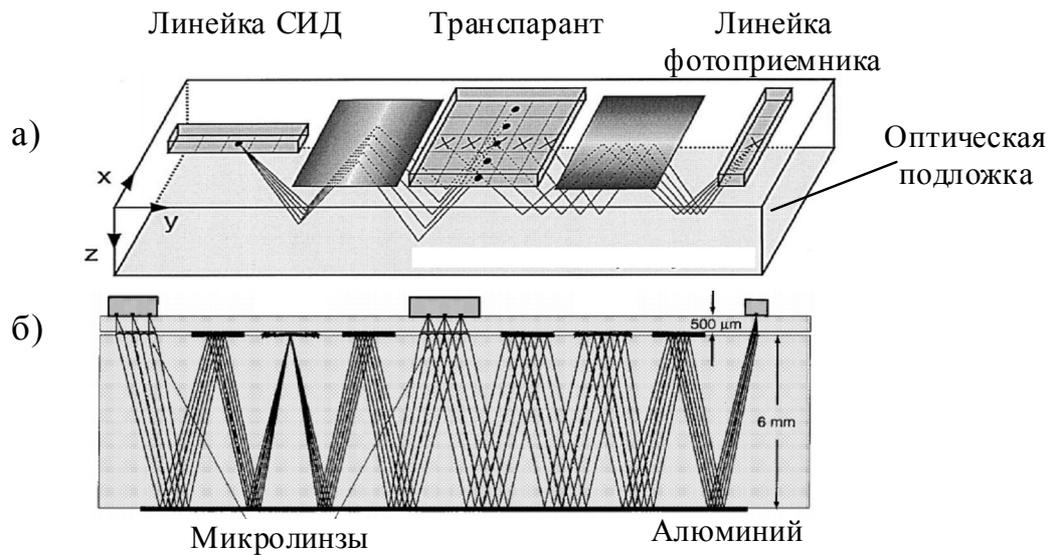


Рис. 1.10. Структурная схема (а) и сечение (б) интегрального ВМП.

Изготовление схемы ВМП представляет трудную технологическую задачу даже для современной MEMS-технологии. Представленный подход можно применить для создания и более сложных схем, в частности оптического ОЗУ. При использовании вместо излучателей линейки или матрицы оптических волокон можно получить оптический коммутатор.

Известен процессор EnLight-256, который выпускается компанией Lenslet, Израиль. Процессор выполнен по схеме ВМП, содержит линейку 256 лазеров, матричный транспарант размерностью 256x256 элементов. Он изготовлен на основе MEMS-технологии, работает на тактовых частотах 125 МГц (производительность - $64\text{К} \cdot 125 \text{ МГц} = 8000\text{ГГц}$). Процессор доведен до уровня использования его в качестве процессора обработки сигналов, оснащен всем комплексом технических средств отладки и разработки программ (отладочный модуль, среда разработки).

Голографическая память

Особый интерес представляют голографические устройства памяти. Такая память обладает рядом достоинств. Голограмма сохраняет

информацию не только об интенсивности, но и о фазе световой волны, что в оптике принципиально важно, а с утилитарной точки зрения – позволяет повысить объем записываемой информации. Кроме того, различные картинки можно записывать в одно и то же место, используя весь объем носителя, а не тонкий слой поверхности (как в случае обычной оптической или магнитной памяти). По оценкам специалистов, объемная плотность записи может превышать величину 10^{11} бит/см³, а скорость ввода информации с голограмм – несколько гигабит в секунду.

Кроме того, голограмма, сама может использоваться в качестве принципиального узла процессора, выступая одновременно в роли буферной памяти и обрабатывающего элемента.

Голографическая память развивается, начиная с работ Питера ван Хеердена (Pieter J. Van Heerden), сотрудника фирмы Polaroid. Он предложил идею хранения данных в трех измерениях еще в 1963 г., а сегодня некоторые производители уже приступили к коммерческому выпуску голографических ЗУ.

Информация в таких голограммах записывается путем изменения показателя преломления по всему объему носителя. Обычно для этого используются прозрачные материалы с ярко выраженными нелинейными оптическими характеристиками, например, кристаллы ниобата лития.

В силу того, что емкость голографической памяти огромна, а время выборки мало, кардинально меняется подход к организации вычислительного процесса. Например, можно вернуться к идее широкого использования поиска по справочникам и таблицам функций, схем принятия решений, таблиц умножения, наконец. Разумеется, алгоритмический подход к обработке информации в оптическом компьютере сохранится, но его основой будет язык более высокого уровня

организации, ориентированный на параллельную обработку сложных структур данных.

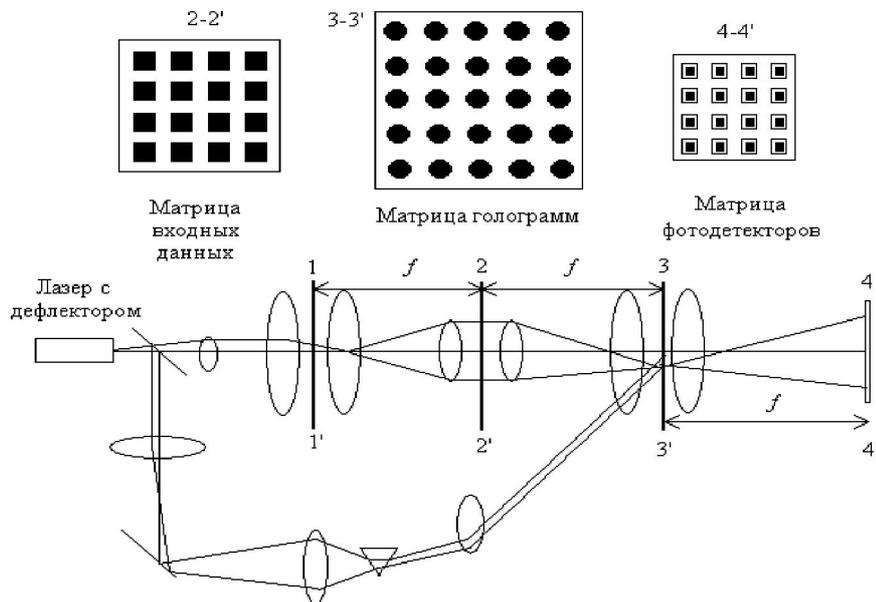


Рис. 1.11. Схема голографического ЗУ со страничным хранением информации в виде набора тонких голограмм

Пример организации голографической памяти представлен на рис. 1.11. В этой системе свет от лазера проходит через двухкоординатный дефлектор и расщепляется полупрозрачным зеркалом на объектный и опорный пучки. Опорный пучок с помощью системы линз, зеркала и призмы направляется в заданный участок среды хранения, где участвует в создании голограммы. Объектный пучок проецируется на одну из ячеек линзового растра 1-1'...

На рис. 1.12 показана схема многопроцессорной системы с оптической памятью.

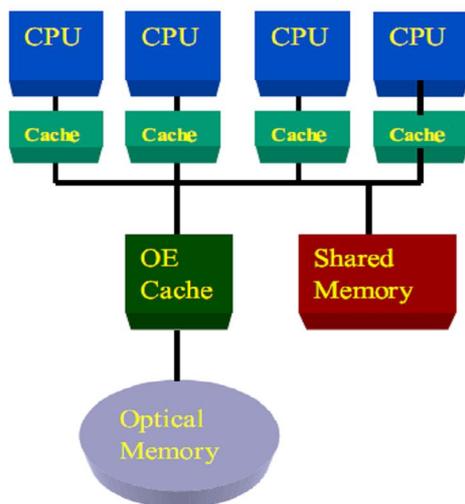


Рис. 1.12. Включение оптической памяти в ЭВМ.

Глава 2. Основные понятия оптики. Законы геометрической оптики. Оптические элементы.

Основные понятия

Оптика — наука о световых излучениях. Оптику делят на физическую или волновую и геометрическую. Из физической оптики известно, что распространение света представляет собой волновой процесс.

В *геометрической оптике* длину волны света принимают равной нулю, в этом приближении оптические законы можно сформулировать на языке геометрии. Следовательно, геометрическая оптика является предельным случаем волновой (физической) оптики. Геометрическая оптика изучает законы распространения света в прозрачных средах, основываясь на представлении о световых лучах.

Отдельные вопросы, касающиеся образования оптических изображений и их качества, могут быть правильно объяснены только на основе *физической оптики*. К ним относятся вопросы, связанные с явлениями интерференции, дифракции и поляризации, а также вопросы, связанные с разрешающей способностью оптических систем и распределением энергии в изображении, на которые ответы дает лишь волновая теория света.

Волновая поверхность - геометрическое место точек пространства, в которых колебания совершаются в одинаковой фазе.

Светящаяся точка - источник излучения света, не имеющий размеров.

Световой луч — геометрическая линия, не имеющая размеров в поперечном сечении. Очевидно, что светящаяся точка и световой луч геометрической оптики реально не существуют, а являются лишь удобной математической моделью.

Световой пучок - совокупность световых лучей.

Пучок, лучи которого пересекаются в одной точке, называется *гомоцентрическим пучком*, т. е. пучком, имеющим общий центр. Пучок, лучи которого расходятся из общего центра, называется *расходящимся* гомоцентрическим пучком, если же лучи идут по направлению к центру пучка, то пучок называется *сходящимся* гомоцентрическим пучком.

Гомоцентрический пучок лучей может распространяться и от светящейся точки, находящейся в бесконечности, в этом случае он будет *параллельным*.

Все пространство, в котором распространяются пучки лучей, делится на две части: пространство предметов и пространство изображений. Пространство, в котором находятся точки предметов, называется *пространством предметов*; пространство, в котором расположены изображения точек, называется *пространством изображений*. Пространства предметов и изображений *не имеют ограничений* .

Если после прохождения через оптическую систему пучки лучей сохраняют гомоцентричность, то каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения. Такие изображения называются *точечными* или *стигматическими*.

Изображение точки называется *действительным* в том случае, когда вышедшие из оптической системы лучи гомоцентрического пучка пересекаются в их геометрическом центре. Если в геометрическом центре пересекаются не сами лучи расходящегося пучка, вышедшего из оптической системы, а их продолжения, то такое изображение точки называется *мнимым*.

Две точки, одна из которых является изображением другой, называются *сопряженными* (точки A и A')

Пучок, лучи которого после выхода из оптической системы не пересекаются в одной точке, называется *астигматическим*.

Законы геометрической оптики.

Теория геометрической оптики основана на следующих установленных опытным путем законах:

- 1) прямолинейного распространения света;
- 2) независимости распространения световых пучков;
- 3) законе отражения света
- 4) законе преломления света.

Закон прямолинейного распространения света

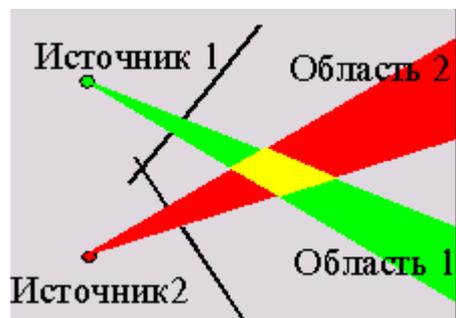
В однородной (изотропной) прозрачной среде свет между двумя точками распространяется по прямой линии, соединяющей эти точки.

Принцип **Ферма** (принцип наименьшего времени):

Луч света распространяется в пространстве между двумя точками по такому пути, вдоль которого время его прохождения *наименьшее*, чем вдоль другого.

Закон независимости распространения световых пучков

Если в пространстве встречаются отдельные пучки лучей, идущие в разных направлениях, то они *не влияют* друг на друга, и каждый из них распространяется так, как будто других пучков не существует.



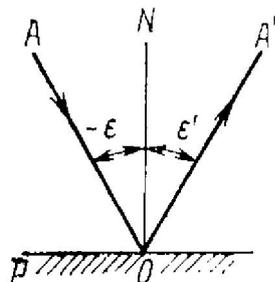
Если несколько пучков падают на одну и ту же площадку или сходятся в одной точке, то действия этих пучков *складываются*.

Закон отражения света

Падающий луч, нормаль к отражающей поверхности в точке падения луча и отраженный луч лежат в одной плоскости, а угол падающего и отраженного лучей с нормалью равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку.

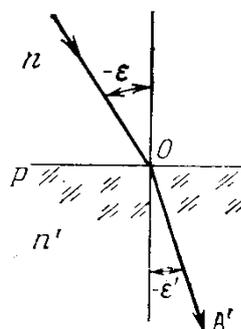
Закон отражения выражается формулой: $\epsilon = -\epsilon'$

Углы падения и отражения отсчитывают от нормали к поверхности, причем угол, образованный поворотом луча от нормали по ходу часовой стрелки, считается положительным, при обратном повороте — отрицательным.



Закон преломления света Закон Снеллиуса (1615 г.)

Падающий луч, нормаль к поверхности раздела в точке падения луча и преломленный луч лежат в одной плоскости, и произведение показателя преломления на синус угла, образованного лучом с нормалью, остается постоянным при переходе луча из одной среды в другую.



Математически закон преломления выражается в виде $n \sin \epsilon = n' \sin \epsilon'$.

Произведение *показателя* преломления среды на синус угла между лучом и нормалью называют *оптическим инвариантом*. Лучи падающий и преломленный *обратимы*. Отношение n'/n для заданной пары сред называется *относительным показателем преломления*. Гюйгенс нашел в 1690 г., что коэффициент преломления n равен отношению скоростей распространения света в обеих средах. Показатель преломления среды относительно вакуума называют *абсолютным показателем преломления*. Он определяется по формуле: $n = c/v$, где c - скорость света в вакууме, v - скорость света в данной среде.

При переходе луча из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную преломленный луч *приближается к нормали* ($n > n'$). *Оптически менее плотной* называется среда, в которой свет распространяется быстрее. При переходе из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную луч *отклоняется от нормали* ($n < n'$). Все лучи, идущие из среды оптически более плотной в среду менее плотную, могут испытывать полное внутреннее отражение.

Угол падения, которому соответствует угол преломления, равный 90° , называется *предельным углом* полного внутреннего отражения. Значение угла полного внутреннего отражения определяется по формуле: $\sin \varepsilon = n'/n$.

Единицы измерения

Световой поток Φ - количество света, излученное точечным источником в одну секунду. Единицей светового потока является люмен (1 лм).

Силой света I называется световой поток, посылаемый равномерно излучающим во все стороны источником света, в единицу телесного угла. $I = \Phi/\omega$. Единицей силы света является свеча 1 (св).

Освещенность E выражается световым потоком, приходящимся на единицу поверхности. За единицу освещенности принимается 1 люкс (лк).
 $1 \text{ люкс} = 1 \text{ люмен/м}^2$

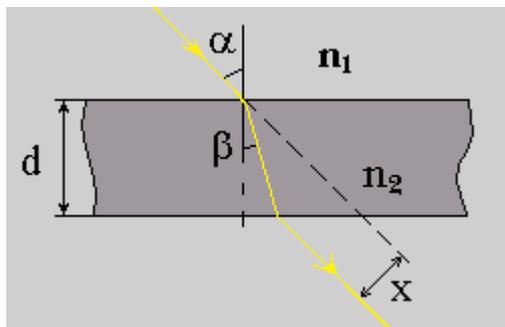
Закон Ламберта (1750 г). Освещенность какой-либо поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности и прямо пропорциональна косинусу углу падения $E = (I \cos \alpha) / r^2$.

Оптические элементы

- ▲ Плоские зеркала.
- ▲ Плоскопараллельная пластинка.
- ▲ Призма и клин.
- ▲ Тонкие линзы.

Плоским зеркалом называется оптическая деталь с плоской отражающей поверхностью. Зеркала служат для изменения направления оптической оси системы, кроме того, путем комбинации нескольких зеркал обеспечивают оборачивание изображения. Следовательно, плоское зеркало не нарушает гомоцентричности в отраженном пучке лучей.

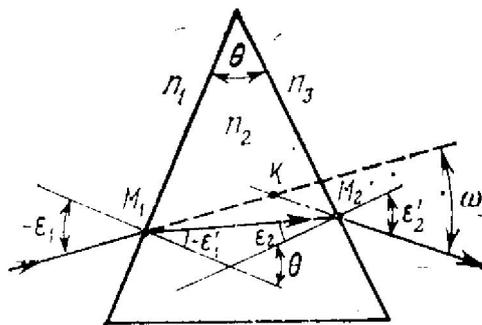
Плоскопараллельной пластинкой называется оптическая деталь, ограниченная с двух сторон полированными плоскими поверхностями, параллельными друг другу.



При прохождении света через плоскопараллельную пластину свет дважды на своем пути претерпевает преломление, в результате чего луч

падающий на пластину и луч выходящий из нее оказываются параллельными. Смещение луча можно вычислить по формуле: $X = d (\sin a - \text{tg} b \cos a)$. Гомоцентрический пучок лучей становится астигматическим.

Преломляющей призмой называется оптическая деталь, ограниченная двумя плоскими полированными непараллельными между собой плоскостями. Линия пересечения преломляющих плоскостей (ребро двугранного угла) называется *преломляющим ребром призмы*, а плоскость, перпендикулярная преломляющему ребру, — *главным сечением призмы*. Преломляющая призма характеризуется преломляющим углом θ , т. е. углом между преломляющими плоскостями призмы в ее главном сечении, и показателем преломления n материала, из которого она изготовлена.



1. Происходит отклонение на угол ω
2. Гомоцентрический пучок лучей становится астигматическим.

Преломляющая призма с малым преломляющим углом называется оптическим клином. Если угол падения на клин мал, то после прохождения пучка через клин угол отклонения пучка составит $\omega = (n-1)\theta$. Смещение различно для разных длин волн.

Линзы

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя криволинейными (чаще всего сферическими) или криволинейной и плоской поверхностями. Линзы делятся на *выпуклые* и *вогнутые*.

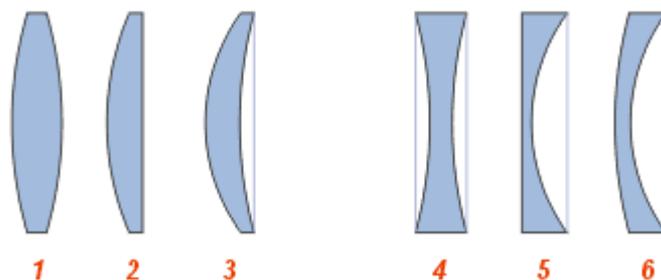


Рис. 2.1. Виды линз:

Собирающие: 1—двояковыпуклая, 2—плоско-выпуклая, 3—вогнуто-выпуклая (положительный (выпуклый) мениск)

Рассеивающие: 4—двояковогнутая, 5—плосковогнутая, 6—выпукло-вогнутая (отрицательный (вогнутый) мениск)

Линзы (рис. 2.1), у которых середина толще, чем края, называются выпуклыми. Линзы, у которых середина тоньше, чем края, называются вогнутыми.

Если показатель преломления линзы больше, чем показатель преломления окружающей среды, то в выпуклой линзе параллельный пучок лучей после преломления преобразуется в сходящийся пучок. Такие линзы называются *собирающими*. Если в линзе параллельный пучок преобразуется в расходящийся пучок, то эти линзы называются *рассеивающими*. Вогнутые линзы, у которых внешней средой служит воздух, являются *рассеивающими*.

Если на собирающую линзу падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после преломления в линзе они собираются в одной точке F , которая называется *главным фокусом линзы*. Из обратимости хода лучей следует, что каждая линза имеет два фокуса, которые находятся на одинаковых расстояниях от плоскости линзы.

Оптическая сила линзы - отношение показателя преломления среды к соответственному фокусному расстоянию. Если линза находится в воздухе, то оптическая сила — величина, обратная фокусному расстоянию. Чем

короче фокусное расстояние линзы, тем она сильнее преломляет лучи; отсюда и название сила линзы.

За единицу оптической силы линзы в СИ принимают диоптрию. *Диоптрия* - оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.

Оптическая сила собирающей линзы положительная, рассеивающей - отрицательная.

Плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси, называется *фокальной*. Пучок лучей, падающих на линзу параллельно какой-либо побочной оптической оси, собирается в точке пересечения этой оси с фокальной плоскостью.

Построение изображения точки и предмета в собирающей линзе

Для построения изображения в линзе достаточно взять по два луча от каждой точки предмета и найти их точку пересечения после преломления в линзе. Удобно пользоваться лучами, ход которых после преломления в линзе известен.

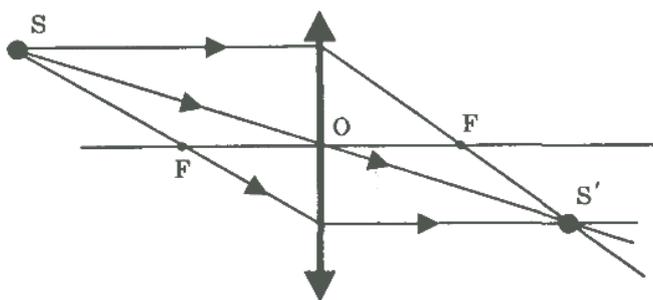


Рис. 2.2. Построение изображения точки и предмета в собирающей линзе.

Луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси, после преломления в линзе проходит через главный фокус; луч, проходящий через оптический центр линзы, не преломляется; луч, проходящий через главный фокус линзы, после преломления идет параллельно главной

оптической оси; луч, падающий на линзу параллельно побочной оптической оси, после преломления в линзе проходит через точку пересечения оси с фокальной плоскостью.

- Если предмет расположен за точкой двойного фокуса, то изображение получится действительным, обратным, уменьшенным .

- Если предмет расположен в точке двойного фокуса, то изображение получится действительным, обратным, равным предмету.

- Если предмет расположен между фокусом и точкой двойного фокуса, то изображение получится действительным, обратным, увеличенным.

- Если предмет расположен в фокусе, то изображение будет в бесконечности.

- Если предмет расположен между фокусом и оптическим центром линзы, то изображение будет мнимым, прямым, увеличенным (лупа).

Формула тонкой линзы (Формула Гаусса)

Тонкой линзой (иногда ее называют бесконечно тонкой) называется такая линза, толщина которой мала по сравнению с радиусами кривизны преломляющих поверхностей. Главные плоскости тонкой линзы совпадают.

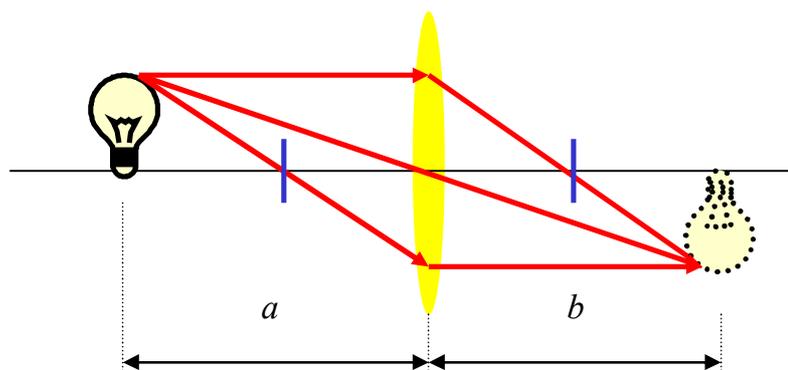


Рис. 2.3. Построение изображения в тонкой линзе.

Формула тонкой линзы связывает a (расстояние от предмета до оптического центра линзы), b (расстояние от оптического центра до изображения) с фокусным расстоянием F $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}$.

Отношение размера изображения к линейному размеру предмета называют линейным увеличением линзы.

В идеальной оптической системе все лучи, исходящие из точки, пересекаются в сопряженной с ней точке. После прохождения реальной оптической системы либо нарушается гомоцентричность пучка и лучи не имеют общей точки пересечения, либо гомоцентричность сохраняется, но лучи пересекаются в некоторой точке, которая не совпадает с точкой идеального изображения. Это является следствием aberrаций. Основная задача расчета оптических систем – устранение aberrаций. Для вычисления aberrаций необходимо определить точку референтного (идеального) изображения, в которой должно находиться изображение по законам гауссовой оптики. Относительно этой точки и определяют aberrации.

Матричное представление

Математически луч может быть описан двумя координатами: положением X и углом θ .

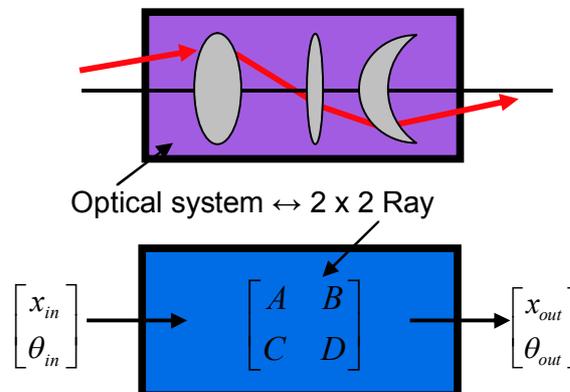


Рис. 2.4. Матрица преобразования.

Матрица Гаусса (матрица преобразования) - матрица размером 2x2, описывающая преобразование координат нулевого луча оптической системой.

Определитель матрицы преобразования $\begin{pmatrix} X_{out} \\ \Theta_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{inp} \\ \Theta_{inp} \end{pmatrix}$ любой

системы равен 1: $AD-BC=1$

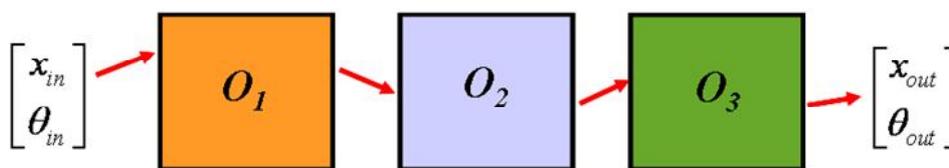
Считая смещения углов и координат малыми, получаем:

$$X_{out} = \frac{\partial X_{out}}{\partial X_{inp}} \cdot X_{inp} + \frac{\partial X_{out}}{\partial \Theta_{inp}} \cdot \Theta_{inp}$$

$$\Theta_{out} = \frac{\partial \Theta_{out}}{\partial X_{inp}} \cdot X_{inp} + \frac{\partial \Theta_{out}}{\partial \Theta_{inp}} \cdot \Theta_{inp}$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial X_{out}}{\partial X_{inp}} & \frac{\partial X_{out}}{\partial \Theta_{inp}} \\ \frac{\partial \Theta_{out}}{\partial X_{inp}} & \frac{\partial \Theta_{out}}{\partial \Theta_{inp}} \end{pmatrix}$$

Для каскадных систем действие всей системы можно вычислить путём перемножения матриц Гаусса.



$$\begin{bmatrix} x_{out} \\ \theta_{out} \end{bmatrix} = O_3 \left\{ O_2 \left(O_1 \begin{bmatrix} x_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix} \right) \right\} = O_3 O_2 O_1 \begin{bmatrix} x_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix}$$

Рис. 2.4. Каскадная схема включения оптических элементов.

Примеры:

Для прямолинейного распространения света: $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

Для границы сред:
$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$$

Для тонкой линзы:
$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/f & 1 \end{pmatrix}$$

Глава 3. Волновая оптика. Преобразование Фурье в оптике

Волновая оптика – раздел оптики, который описывает распространение света с учётом его волновой природы. Явления волновой оптики - интерференция, дифракция, поляризация и т. п.

Квантовой оптикой называют раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света.

Уравнение электрического поля световой волны

Электромагнитная волна - изменение во времени в каждой точке пространства электрического и магнитного полей, которые связаны по закону индукции. Она характеризуется взаимно перпендикулярными векторами напряженностей электрического E и магнитного H полей, которые изменяются по одному и тому же гармоническому закону.

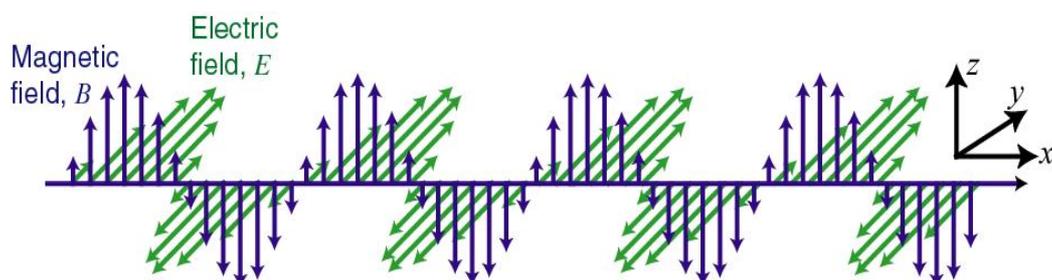


Рис. 3.1. Распространение электромагнитной волны.

Считаем, что уравнение описывает электрическое поле.

$$u(x, y, z, t) = P(x, y, z) * U(x, y, z, t)$$

где $U(x, y, z, t)$ - скалярная функция; $P(x, y, z)$ - единичный вектор, характеризующий плоскость поляризации (определяет прямую, вдоль которой совершается колебание электрического поля с координатами (x, y, z)).

Различают *поперечные* и *продольные* волны. Продольные волны (волны сжатия) — волна распространяется параллельно колебаниям частиц среды; поперечные волны (волны сдвига) — частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны;

Если в поперечной волне нарушается симметрия распределения возмущений относительно направления её распространения, то мы имеем дело с *поляризованной* волной. В продольной волне поляризация возникнуть не может, т. к. распространение возмущения всегда совпадает с направлением распространения волны.

Световые волны, распространяющиеся в однородной изотропной среде, являются поперечными. Колебания электрического и магнитного полей происходят в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны: так, если волна распространяется вдоль оси z то колебания векторов и происходят в плоскости $xу$, перпендикулярной оси z , во взаимно перпендикулярных направлениях.

Выделяют два вида поляризации:

- *линейная* — колебания возмущения происходят в какой-то одной плоскости. В таком случае говорят о «плоско поляризованной волне»;
- *круговая* — конец вектора амплитуды описывает окружность в плоскости колебаний. В зависимости от направления вращения вектора может быть правой или левой.

Линейная и круговая поляризации являются частными случаями *эллиптической поляризации* волн. Простейшую структуру имеет линейно-поляризованная (или плоско-поляризованная) волна.

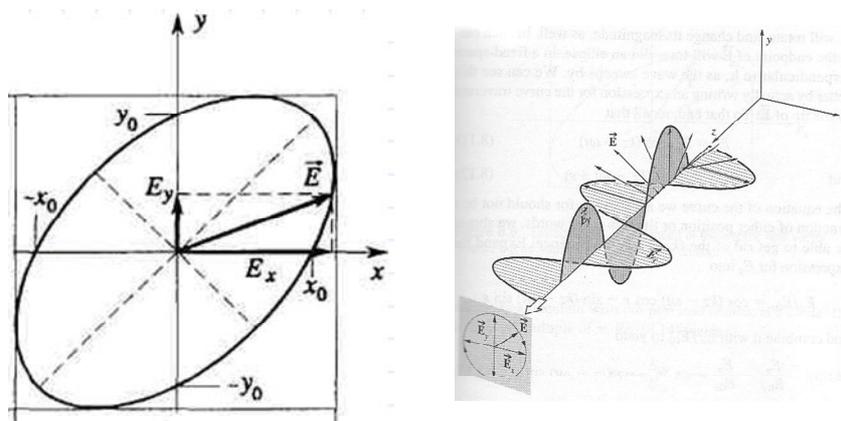


Рис. 3.2. Вид эллипса поляризации и пример круговой поляризации.

Причины возникновения поляризации волн:

- несимметричная генерация волн в источнике возмущения;
- анизотропность среды распространения волн;
- преломление и отражение на границе двух сред.

Уравнение электрического поля световой волны

Скалярная запись:

$$u(x, y, z, t) = P(x, y, z) * U(x, y, z, t) = P(x, y, z) * A(x, y, z) \cos[2\pi\nu t + \varphi(x, y, z)]$$

$$u(x, y, z, t) = A(x, y, z) \cos[2\pi\nu t + \varphi(x, y, z)]$$

где $A()$ - амплитуда, $\varphi()$ – фаза, ν - частота.

Это скалярная функция координат пространства и времени, численно равная значению модуля вектора напряженности электрического поля. Такая запись возможна, если рассматриваем только *когерентные волны, одной поляризации, а модуляция осуществляется по пространственной координате.*

Начальную фазу можно считать нулевой в любой точке пространства, тогда $\varphi()$ это разность времени распространения волны в этой точке и в точке (x, y, z) .

Плоская волна - напряженность электрического поля для каждого момента времени для всех точек любой плоскости ($x = \text{const.}$) имеет одинаковое значение.

$$u(x, t) = A \cos[2\pi\nu t - kx + \varphi]$$

где A - амплитуда; k - волновое число $2\pi/\lambda$.

Комплексная запись:

$$U(x, y, z, t) = A(x, y, z) \exp j[2\pi\nu t + \varphi(x, y, z)] = U(x, y, z) \exp(j2\pi\nu t)$$

Временной множитель, являющийся для монохроматического сигнала гармонической функцией времени, обычно опускают. Поэтому в

дальнейшем оптический сигнал будем представлять в виде комплексной амплитуды:

$$U(x, y, z) = A(x, y, z) \exp j[\varphi(x, y, z)]$$

Физический смысл имеет действительная часть выражения. Комплексная амплитуда описывает пространственное распределение амплитуд $A(x, y, z)$ и фаз световой волны.

Комплексная запись в обобщенных координатах

$$U(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}) \exp[i \varphi(\mathbf{r})] \exp(i2\pi\nu t)$$

Интенсивность света $I(\mathbf{r}, t)$ равна квадрату модуля комплексной амплитуды поля: $I(\mathbf{r}, t) = 2\langle u^2(\mathbf{r}, t) \rangle$, где $u(\mathbf{r}, t) = \text{Re}[U(\mathbf{r}, t)]$.

Дельта-функция Дирака

При анализе линейных систем удобно использовать математическую конструкцию $\delta(x)$, называемую δ -функцией. Эта конструкция была введена в употребление в 1927г. Полем Дираком.

δ -функция принимает значение 0 при любом ненулевом аргументе, и неограниченно возрастает в нуле:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}, \quad \delta(x - \tau) = \begin{cases} \infty, & x = \tau \\ 0, & x \neq \tau \end{cases}.$$

При этом интеграл $\delta(x)$ по любой ε -окрестности нуля равен единице:

$$\int_{-\varepsilon}^{+\varepsilon} \delta(x) dx = 1, \quad \varepsilon > 0$$

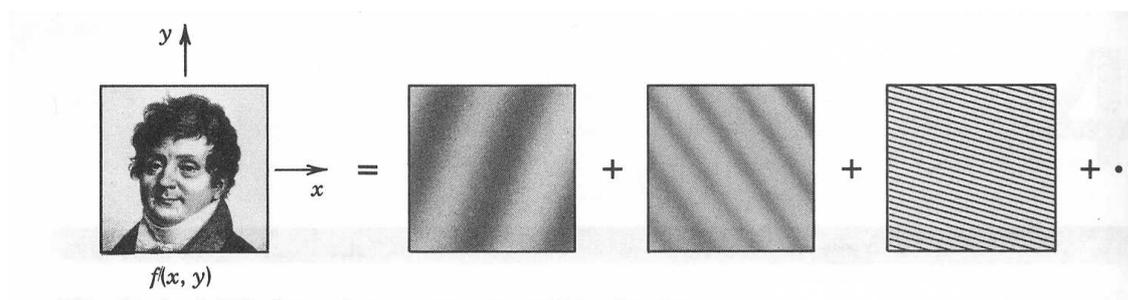
Из выполнения этого соотношения при $\varepsilon \rightarrow 0$ следует наиболее важное свойство δ -функции - способность выносить непрерывную функцию $A(x)$ из-под знака интеграла:

$$\int_{x-\varepsilon}^{x+\varepsilon} A(\tau) \delta(x - \tau) d\tau = A(x), \quad \int_{-\infty}^{\infty} A(\tau) \delta(x - \tau) d\tau = A(x)$$

Сама δ -функция является интегрируемой и дифференцируемой. Но обычно подчеркивают, что она не должна входить в окончательные выражения для реальных значений каких-либо физических величин, а все выражения, содержащие δ -функцию, либо должны стоять под знаком интеграла, либо должны быть проинтегрированы в дальнейшем.

Двумерное преобразование Фурье в оптике

Жан Батист Жозеф Фурье. Дата рождения: 21 марта 1768, Франция.
 Научный руководитель: Жозеф Луи Лагранж. Знаменитые ученики: Дирихле.



Преобразованием Фурье комплексной двумерной функции $g(x, y)$, определенной на плоскости (x, y) , называется интегральное преобразование вида:

$$G(\xi, \eta) = F\{g(x, y)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp[j2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy,$$

где x и y - координаты пространства; ξ и η - пространственные частоты.

Другие эквивалентные названия для $G(\xi, \eta)$: спектр Фурье, Фурье-образ. Функция G является функцией двух переменных ξ и η , которые называются пространственными частотами.

Обратным преобразованием Фурье функции $G(\xi, \eta)$ называется величина $F^{-1}\{G(\xi, \eta)\}$, получаемая при обратном интегральном преобразовании

$$F^{-1}\{G(\xi, \eta)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\xi, \eta) \exp[-j2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta$$

Преобразование Фурье имеет большое значение в оптике, в оптических процессорах, поскольку, как мы увидим далее, при использовании когерентного освещения (когерентных источников света, лазеров) распределение амплитуды света в передней и задней фокальных плоскостях линзы связаны двумерным преобразованием Фурье.

Последовательное применение прямого и обратного преобразования Фурье к некоторой функции $g(x, y)$ даст снова эту функцию во всех точках, где она непрерывна.

$$F^{-1}\{F\{g(x, y)\}\} = g(x, y)$$

В точках разрыва получаем среднее значение функции g в окрестностях этой точки.

Достаточные условия существования преобразования Фурье:

1. Функция g абсолютно интегрируема на плоскости

$$(x, y), \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x, y)| dx dy < \infty$$

2. Функция g имеет конечное число разрывов 1-го рода и конечное число максимумов и минимумов в любом конечном прямоугольнике на плоскости.
3. Функция g не имеет разрывов 2-го рода.

Физический смысл двумерного Фурье- преобразования

Двумерное Фурье-преобразование $G(\xi, \eta)$ - это разложение двумерной функции $g(x, y)$ по «элементарным волнам» на плоскости, имеющим различный пространственный период и различную ориентацию (направление) [3].

Действительно, обратное преобразование Фурье

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\xi, \eta) \exp[-j2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta$$

есть сумма волн вида $G(\xi, \eta)d\xi d\eta \cdot \exp[-j2\pi(\xi x + \eta y)]$, они имеют амплитуду $G(\xi, \eta)d\xi d\eta$ и фазовый множитель $\exp[-j2\pi(\xi x + \eta y)]$. Для любой пары частот (ξ, η) фаза волны равна нулю вдоль прямых $2\pi(\xi x + \eta y) = 2\pi \cdot n$, где n – целое число: $\pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Отсюда $y = -\frac{\xi}{\eta}x + \frac{n}{\eta}$. Эти прямые изображены на рис.3.3.

Прямые отсекают по осям отрезки: $\frac{1}{\xi}, \frac{2}{\xi}, \dots, \frac{n}{\xi}$ (когда $y=0$) и $\frac{1}{\eta}, \frac{2}{\eta}, \dots, \frac{n}{\eta}$ (когда $x=0$). Эти отрезки и определяют пространственный период волны, измеряемый вдоль выбранных направлений; т.е. измеряемый вдоль оси x – пространственный период $\frac{1}{\xi}$ (в оптике измеряется в миллиметрах) и вдоль оси y – пространственный период $\frac{1}{\eta}$ (измеряется в миллиметрах). Соответственно, пространственные частоты ξ и η имеют размерность $\left[\frac{1}{\text{мм}} \right]$.

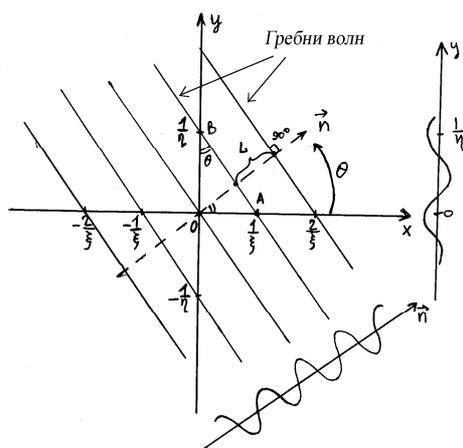


Рис. 3.3. Линии нулевой фазы для одной волны с пространственными частотами ξ и η [3].

Каждая из волн характеризуется своим периодом L и направлением (ориентацией), т.е. углом θ относительно оси x .

Ориентация волны θ (относительно оси x):

$$\text{из } \triangle OAB \text{ — } \operatorname{tg} \theta = \frac{1/\xi}{1/\eta} = \frac{\eta}{\xi} \longrightarrow \boxed{\theta = \operatorname{arctg} \frac{\eta}{\xi}}$$

Период волны вдоль направления \vec{n} :

$$L = \cos \theta \cdot \frac{1}{\xi}; \quad L = \frac{1}{\eta} \cdot \sin \theta \rightarrow \sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 = L^2 \xi^2 + L^2 \eta^2 \Rightarrow L = \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}$$

Разложение сложной функции координат по элементарным волнам на плоскости дает возможность свести анализ преобразований, осуществляемых в оптических системах, к анализу влияний, оказываемых простейшей элементарной волной. Как мы увидим далее, такой анализ сведется к анализу прохождения через систему элементарных плоских волн.

Основные свойства преобразования Фурье

1. Теорема линейности

$$F\{\alpha g(x, y) + \beta h(x, y)\} = \alpha \cdot G + \beta \cdot H, \text{ где } \alpha, \beta - \text{любые числа}$$

Фурье-образ суммы (двух) функций равен сумме их Фурье-образов

2. Теорема подобия

$$F\{g(ax, by)\} = \frac{1}{|ab|} \cdot G\left(\frac{\xi}{a}, \frac{\eta}{b}\right), \text{ где } a, b - \text{действительные числа}$$

«Растяжение» координат в пространственной области (x, y) приводит к «сжатию» координат в области пространственных частот (ξ, η) и к изменению общей амплитуды спектра.

$$\left. \begin{array}{l} \text{В частном случае } a = -1, b = -1 \text{ (инверсия координат)} \\ F\{g(-x, -y)\} = G(-\xi, -\eta) - \text{сопровождается инверсией спектра} \end{array} \right\}$$

3. Теорема смещения (сдвига)

$$F\{g(x-a, y-b)\} = G(\xi, \eta) \cdot \exp[j2\pi(\xi a + \eta b)]$$

Смещение функции как целого в пространственной области вызывает появление в спектре фазового множителя, фаза которого линейно зависит от частоты (т.е от ξ или η).

Обратная теорема смещения

$$G\{\xi-a, \eta-d\} = F\{g(x, y) \cdot \exp[j2\pi(ax+dy)]\}$$

Смещение Фурье-образа соответствует умножению исходной функции $g(x, y)$ на фазовый множитель, являющийся линейной функцией координат (x, y) .

4. Фурье-образ комплексно-сопряженной функции

$g(x, y)$; $g^*(x, y)$ – комплексно-сопряженная функция

$$F\{g^*(x, y)\} = G^*(-\xi, -\eta)$$

Следствие 1. Если $g(x, y)$ - действительная и четная, то $G(\xi, \eta)$ - тоже действительная и четная.

Следствие 2. Если $g(x, y)$ - действительная и нечетная, то $G(\xi, \eta)$ - чисто мнимая и нечетная.

5. Теорема свертки

Свертка двух функций g_1 и h - это интегральное преобразование вида

$$g_2(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x', y') h(x-x', y-y') dx' dy' = g_1 \otimes h, \quad \otimes\text{-знак операции свертки}$$

$$F\{g_2(x, y)\} = G_2(\xi, \eta) = G_1(\xi, \eta) \cdot H(\xi, \eta)$$

Свертка коммутативна: $g_1 \otimes h = h \otimes g_1$

Одна из функций в подынтегральном выражении, у нас функция h , зеркально отражена относительно начала координат и смещена на величину (x, y) относительно этого начала координат.

Т.о. свертка двух функций в пространственной области соответствует произведению их Фурье-спектров в области пространственных частот.

Обратная теорема свертки $F\{g_1(x, y) \cdot h(x, y)\} = G_1(\xi, \eta) \otimes H(\xi, \eta)$

Фурье-образ произведения равен свертке Фурье-образов сомножителей.

6. Теорема корреляции

Операция кросс-корреляции двух функций – это интегральное преобразование вида

$$g_{12}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x', y') \cdot g_2^*(x+x', y+y') dx' dy' = g_1 * g_2, \quad * \text{-знак операции корреляции}$$

или

$$g_{21}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_2(x', y') \cdot g_1^*(x+x', y+y') dx' dy' = g_2 * g_1$$

Операция кросс-корреляции не коммутативна относительно перестановки функций g_1 и g_2 .

$$F\{g_1 * g_2\} = G_1 \cdot G_2^*; \quad F\{g_2 * g_1\} = G_2 \cdot G_1^*;$$

Если $g_1(x, y) = g_2(x, y)$, то интегральная операция называется автокорреляцией. Для этого случая:

$$F\{g(x, y) * g(x, y)\} = G(\xi, \eta) \cdot G^*(\xi, \eta) = |G(\xi, \eta)|^2$$

Это соотношение называется теоремой Винера-Хинчина.

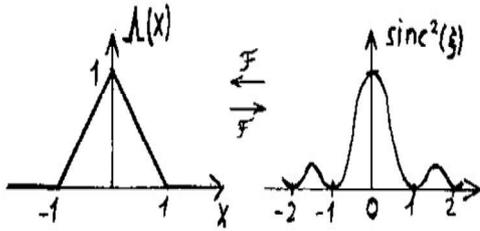
7. Теорема Парсеваля

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |g(x, y)|^2 dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |G(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta$$

Это выражение интерпретируется как «закон сохранения энергии», при переходах «пространство ↔ частота»

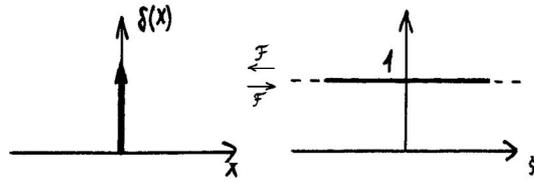
Приведенные теоремы дают основные правила проведения преобразования Фурье, при решении задач, связанных с использованием анализа Фурье (при анализе когерентных оптических систем).

Некоторые часто используемые функции и полезные пары преобразований Фурье



Треугольная функция

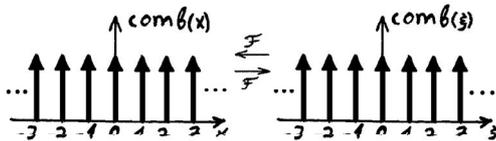
$$\Lambda(x) = \begin{cases} 1 - |x|, & |x| \leq 1 \\ 0, & |x| > 1 \end{cases}$$



Дельта-функция Дирака

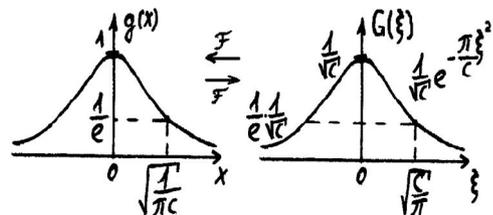
$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1$$



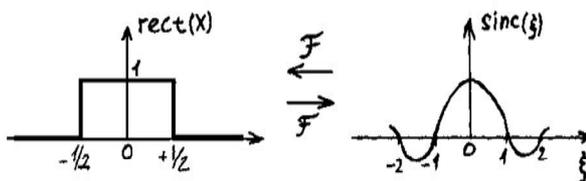
Гребенчатая функция

$$comb(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - n)$$

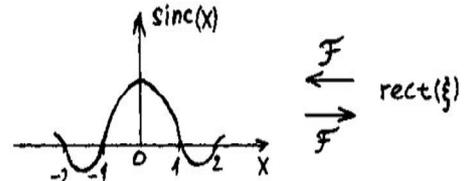


Функция Гаусса

$$g(x) = \exp(-\pi c x^2)$$

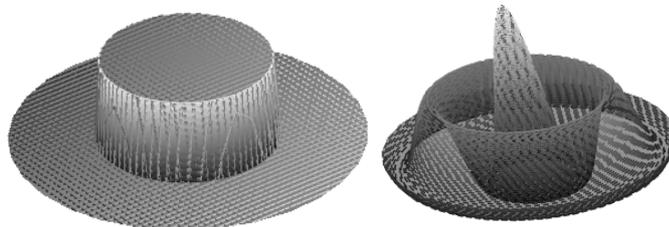


Прямоугольная функция



Функция sinc

Функция круговой апертуры



Импульсный отклик и передаточная функция

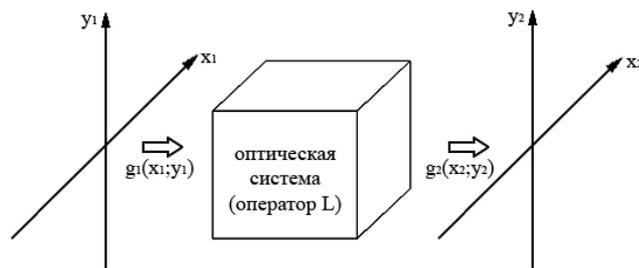
Импульсный отклик и передаточная функция устанавливают соотношения между входным и выходным сигналом в линейных системах.

Определение линейной системы. Линейная система – система, для которой справедлив принцип суперпозиции:

$$L\{a \cdot u_1(x_1, y_1) + b \cdot g_1(x_1, y_1)\} = a \cdot L\{u_1(x_1, y_1)\} + b \cdot L\{g_1(x_1, y_1)\},$$

где L – линейный оператор, характеризующий преобразования, осуществляемые системой.

Входной сигнал можно разложить на элементарные сигналы. Зная отклик системы на элементарные сигналы, можно найти и итоговый выходной сигнал как суперпозицию откликов.



$$g_2(x_2, y_2) = \{g_1(x_1, y_1)\}; \text{отклик} = L\{\text{воздействие}\}$$

Разложение входного сигнала по элементарным функциям – δ -функциям:

$$g_1(x_1, y_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x'_1, y'_1) \cdot \delta(x_1 - x'_1, y_1 - y'_1) dx'_1 dy'_1$$

$$g_2(x_2, y_2) = L\left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x'_1, y'_1) \cdot \delta(x_1 - x'_1, y_1 - y'_1) dx'_1 dy'_1 \right\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x'_1, y'_1) \cdot L\{\delta(x_1 - x'_1, y_1 - y'_1)\} dx'_1 dy'_1$$

Можно считать, что $g_1(x'_1, y'_1)$ – амплитуды δ -функций.

Отклик системы на элементарный входной сигнал, описываемый δ -функцией, называют *импульсным откликом системы*. Импульсный отклик системы характеризует распределение комплексной амплитуды света в ее

выходной плоскости, соответствующее точечному источнику света во входной плоскости.

$$L\{\delta(x_1 - x'_1, y_1 - y'_1)\} = h(x_2, y_2; x'_1, y'_1),$$

где $h(x_2, y_2; x'_1, y'_1)$ – это отклик, как функция x_2, y_2 , когда δ находится в точке (x'_1, y'_1) .

Другой термин: *Функция Рассеяния Точки*, поскольку в схеме формирования изображения представляет собой изображение точечного источника.

Интеграл суперпозиции

Входной и выходной сигналы системы теперь можно связать простым соотношением:

$$g_2(x_2, y_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x_1, y_1) \cdot h(x_2, y_2; x_1, y_1) dx_1 dy_1.$$

Данное фундаментальное соотношение, известное под названием *интеграл суперпозиции*, является основным, связывающим вход и выход линейной системы. Линейная система полностью характеризуется ее откликом на входной импульсный сигнал, то есть, зная импульсный отклик системы, можно определить отклик системы на любой входной сигнал.

Пространственно-инвариантные системы

Рассмотрим важный подкласс линейных систем, которые называются инвариантными. Линейную систему называют инвариантной, если сдвиг входного сигнала вызывает аналогичный сдвиг выходного сигнала без изменения его структуры. Следовательно, импульсный отклик линейной инвариантной системы должен быть инвариантным к сдвигу координат. Применительно к линейной оптической системе это означает, что

$$h(x_2, y_2; x_1, y_1) = h(x_2 - x_1, y_2 - y_1)$$

Другое название: «Изотропная Система». Реальные оптические системы, как правило, инвариантны лишь в пределах ограниченных областей входной и выходной плоскостей, окружающих оптическую ось системы.

Для линейной пространственно-инвариантной оптической системы интеграл суперпозиции принимает простой вид

$$g_2(x_2, y_2) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x_1, y_1) \cdot h(x_2 - x_1, y_2 - y_1) dx_1 dy_1 = g_1 * h$$

Таким образом, выходной сигнал линейной пространственно-инвариантной системы представляет собой свертку входного сигнала и импульсного отклика системы $g_2 = g_1 * h$.

Ограничимся рассмотрением линейных пространственно-инвариантных оптических систем. Зависимость выходного сигнала от входного такой системы проще всего определяется в пространственно-частотной области. Применив Фурье-преобразование, получим

$$G_2(\xi, \eta) = G_1(\xi, \eta) \cdot H(\xi, \eta).$$

Фурье-образ $H(\xi, \eta)$ от импульсной характеристики $h(x, y)$ называется *Передаточной Функцией Системы*.

Здесь использована теорема свертки, согласно которой Фурье-образ свертки равен произведению Фурье-образов свертываемых функций. В соответствии с полученным соотношением Фурье-образ выходного сигнала линейной пространственно-инвариантной оптической системы равен произведению Фурье-образов входного сигнала и передаточной функции системы.

Вместе с тем соотношения показывают, что для линейных инвариантных систем входной сигнал можно разлагать на элементарные функции, более удобные, чем δ -функции. Такими элементарными функциями являются, очевидно, комплексные экспоненциальные функции.

Преобразуя g_1 , мы просто разлагаем входной сигнал на комплексные экспоненциальные функции разных пространственных частот. Разложение входного сигнала на комплексные экспоненциальные функции физически можно интерпретировать как представление сложной входной световой волны в виде суммы плоских волн, распространяющихся в различных направлениях. Умножая затем спектр входного сигнала G_1 на передаточную функцию H , мы учитываем воздействие системы на каждую элементарную функцию. Эти воздействия приводят только к изменению амплитуды и сдвигу фазы. Об этом свидетельствует тот факт, что для каждой пары частот мы просто умножаем спектр входного сигнала на комплексное число. Обратное преобразование спектра выходного сигнала G_2 восстанавливает выходной сигнал g_2 путем сложения всех видоизмененных элементарных функций. Однако следует особо отметить, что использование теории передаточной функции позволяет упростить рассмотрение только в случае инвариантных линейных систем.

Глава 4. Распространение света.

Пространственно-когерентное излучение - относительная разность фаз для любых двух точек предмета сохраняется во времени. т.е. изменения амплитуды и фазы света во всех точках предмета происходят одновременно. При пространственно-когерентном излучении система формирования изображения оказывается линейной в отношении комплексной амплитуды сигнала.

- Если свет исходит из одной точки, то он всегда когерентный.
- Если освещение предмета когерентно, то различные импульсные отклики в плоскости изображения меняются одновременно и их комплексные амплитуды складываются.

Пространственно-некогерентное излучение амплитуды и фазы света в любых двух точек предмета изменяются статистически независимо.

Плоская волна в декартовых координатах

Пусть монохроматическая волна распространяется вдоль оси z . Рассчитаем поле в точке x, y, z (рис. 4.1.).

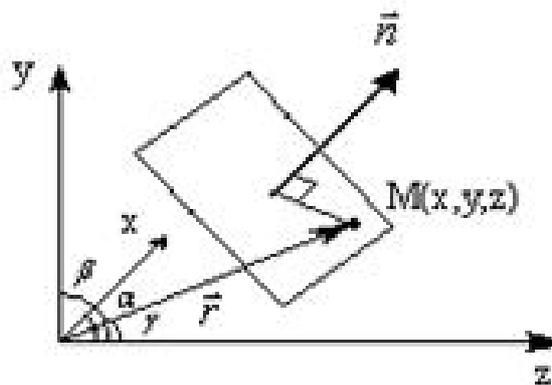


Рис. 4.1. Плоская волна в декартовых координатах; α, β, γ - углы, образованные нормалью с осями x, y, z .

Одно из наиболее простых решений этого уравнения – это плоская волна вида
$$U(x, y, z) = A_0 \cdot e^{-j \cdot k \cdot \vec{n} \cdot \vec{r}} = A_0 \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (\cos \alpha \cdot x + \cos \beta \cdot y + \cos \gamma \cdot z)\right].$$

Здесь A_0 - константа (x, y, z) – амплитуда волны. Поверхность равных фаз $\vec{n} \cdot \vec{r} = const$ - плоскость, а \vec{r} - радиус вектор текущей точки M на плоскости. $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ - направляющие косинусы единичного вектора нормали \vec{n} : $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 = |\vec{n}|^2$

Плоскую волну можно записать в следующем виде

$$K.A. \rightarrow \dot{U}(x, y, z) = A_0 \cdot \exp[-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot (\xi \cdot x + \eta \cdot y + \zeta \cdot z)],$$

где $\xi = \frac{\cos \alpha}{\lambda}, \eta = \frac{\cos \beta}{\lambda}, \zeta = \frac{\cos \gamma}{\lambda}$ - пространственные частоты плоской волны, измеряемы по осям x, y и z соответственно; λ - кратчайшее расстояние между двумя плоскостями с равной фазой.

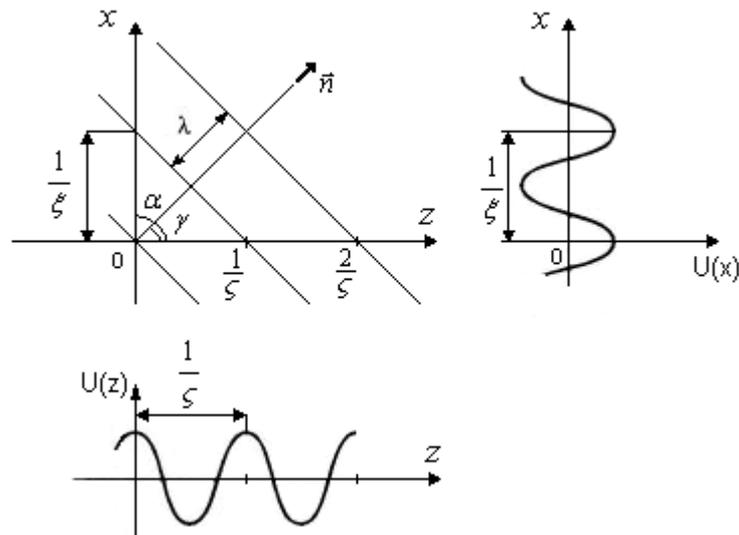


Рис. 4.2. Плоская волна, распространяющаяся в плоскости xoz ($\beta = 90^\circ$).

$\frac{1}{\xi} = \frac{\lambda}{\cos \alpha}, \frac{1}{\varsigma} = \frac{\lambda}{\cos \gamma}$ - пространственные частоты, измеряемые вдоль осей x и z .

Вдоль направления нормали пространственный период волны равен λ и минимален.

Уравнение распределения света после распространения его в свободном пространстве

Распространение ЭМ волн определяется уравнениями Максвелла, которые связывают электрическое и магнитное поле.

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho / \varepsilon & \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

Волновое уравнение для электрического поля определяет взаимное влияние изменений поля во времени и в пространстве.

Скалярное волновое уравнение:

$$\nabla^2 U(x, y, z, t) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2 H(x, y, z, t)}{dt^2}$$

где $\frac{1}{c^2} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mu_0$, ε_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость

свободного пространства, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\Phi}{M} \right]$; ε_r - относительная

диэлектрическая проницаемость среды; μ_0 - абсолютная магнитная

проницаемость свободного пространства, $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Гн}{M} \right]$;

$c = 2,998 \cdot 10^8 \left[\frac{M}{c} \right]$ - скорость света в свободном пространстве;

$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$ - оператор Лапласа.

Для поля, меняющегося с известной частотой ν :

$\dot{U}(x, y, z, t) = \dot{U}(x, y, z) \cdot e^{j \cdot 2\pi \nu t}$, получаем уравнение Гельмгольца для комплексных амплитуд:

$$\nabla^2 \dot{U}(x, y, z) + k^2 \cdot \dot{U}(x, y, z) = 0$$

где $k = \frac{2\pi \cdot \nu}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число.

Приведенное волновое уравнение Гельмгольца - волновое уравнение для монохроматического поля, в которое входит только комплексная амплитуда

Монохроматическое поле можно определить:

$$U(x, y, z, t) = U(x, y, z) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot \nu \cdot t}.$$

Угловой спектр поля в плоскости, параллельной плоскости z (двумерное Фурье преобразование):

$$\dot{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z\right) = \iint u(x, y, z) \cdot \exp\left[2\pi j \left(\frac{\alpha}{\lambda} x + \frac{\beta}{\lambda} y\right)\right] dx dy$$

Дифференциальное уравнение для спектральной функции (после подстановки выражения для углового спектра в волновое уравнение Гельмгольца):

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dz^2} + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \alpha^2 - \beta^2) \cdot \dot{U} = 0$$

Решение волнового уравнения:

$$\dot{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z\right) = \dot{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \cdot \exp(-j \cdot kz \cdot \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}) \quad (4.1)$$

Комплексная амплитуда плоской волны на произвольном расстоянии, равна произведению комплексной амплитуды волны в плоскости 0 и экспоненты с фазой, убывающей при увеличении z .

Анализ решения волнового уравнения:

$\alpha^2 + \beta^2 \leq 1$ - не меняются амплитуды составляющих углового спектра, меняются относительные фазы. Фазовые сдвиги возникают, т.к. плоские волны распространяются под разными углами и проходят разные расстояния;

$\alpha^2 + \beta^2 > 1$ - под корнем мнимая величина, в этом случае амплитуды компонентов углового спектра затухают с расстоянием z по экспоненте. Практически, это означает, что мелкая структура транспаранта с длиной

волны λ и менее не передается световой волной. $\xi = \frac{\alpha}{\lambda}, \eta = \frac{\beta}{\lambda}, \zeta = \frac{\gamma}{\lambda}$. В этом случае волновое уравнение можно записать:

$$\dot{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, z\right) = \dot{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}, 0\right) \cdot \exp(-\mu z), \mu = k \cdot \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - 1}$$

Уравнение (4.1) соответствует определению линейной инвариантной системы. Выходной спектр равен входному, умноженному на комплексную функцию пространственных частот.

$$G_2(v_x, v_y) = H(v_x, v_y) G_1(v_x, v_y)$$

$H(v_x, v_y)$ - передаточная функция, описывающая распространение света в свободном пространстве.

Поле выходной волны через угловой спектр:

$$u(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_0 e^{-j \cdot k \cdot z \cdot \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}} \cdot e^{-j \cdot k(\alpha \cdot x + \beta \cdot y)} \cdot d \frac{\alpha}{\lambda} d \frac{\beta}{\lambda}$$

Отсюда следует, что распространение света в свободном пространстве на расстояние d , эквивалентно действию фильтра пространственных частот с передаточной функцией:

$$H(\xi, \eta, d) = \begin{cases} \exp(j \cdot k \cdot d \cdot \sqrt{1 - \xi^2 \cdot \lambda^2 - \eta^2 \cdot \lambda^2}), & \xi^2 + \eta^2 \leq \frac{1}{\lambda^2} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$H(\xi, \eta, d)$ - это фазовый фильтр, $|H(\xi, \eta)| = 1$

Свойства пространства распространения света как фильтра пространственных частот:

1. Пропускание фильтра равно нулю вне круга радиусом $1/\lambda$ (если z больше нескольких длин волн).

2. Внутри этого круга модуль передаточной функции равен 1, но имеют место фазовые сдвиги, зависящие от частот. Фазовая дисперсия тем больше, чем выше пространственная частота.

3. Детали изображения, меньшие длины волны используемого излучения, теряются при передаче изображения.

Параксиальное приближение

Несущие пучки света имеют малую расходимость: $\alpha^2, \beta^2 \ll 1$. Если волны распространяются под малыми углами к оси, тогда корень квадратный можно разложить в ряд:

$$\sqrt{1 - \xi^2 \cdot \lambda^2 - \eta^2 \cdot \lambda^2} \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot (\xi^2 \cdot \lambda^2 + \eta^2 \cdot \lambda^2) + \frac{1}{8} \cdot (\xi^2 \cdot \lambda^2 + \eta^2 \cdot \lambda^2)^2 + \dots$$

$$k \cdot d \sqrt{1 - \xi^2 \cdot \lambda^2 - \eta^2 \cdot \lambda^2} \approx k \cdot d - \pi \cdot \lambda \cdot d (\xi^2 + \eta^2)$$

В параксиальном приближении передаточная функция свободного пространства:

$$H(\alpha, \beta, z) = \exp(-j \cdot k \cdot z) \cdot \exp[j \cdot kz \cdot (\alpha^2 + \beta^2) / 2]$$

Первый сомножитель - фазовая задержка, одинаковая для всех спектральных составляющих. Второй - фазовая дисперсия. Границы параксиального приближения определяются фазовыми ошибками, вызываемыми отбрасываемыми членами разложения корня.

Дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера

Подставим в уравнение для свободного пространства Фурье-образ исходного распределения (при $z=0$)

$$\dot{U}_0(v_x, v_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} u_0(x, y) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot (v_x \cdot x + v_y \cdot y)} dx dy$$

Проведем интегрирование по направляющим косинусам. Учитываем параксиальное приближение, при котором передаточная функция свободного пространства

$$H(\alpha, \beta, z) = \exp(-j \cdot k \cdot z) \cdot \exp[j \cdot kz \cdot (\alpha^2 + \beta^2) / 2]$$

Получим выражение:

$$u(x, y, z) = \frac{\exp(-j \cdot k \cdot z)}{j \cdot k \cdot z} \bullet$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} u_0(x_0, y_0) \cdot \exp\left\{-j \cdot \frac{k}{2z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 = \quad (4.2)$$

$$= \iint_{-\infty}^{\infty} u_0(x_0, y_0) \cdot h(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0$$

где импульсный отклик свободного пространства (отклик на точечный источник):

$$h(x, y, x_0, y_0) = \frac{\exp(-j \cdot k \cdot z)}{j \cdot k \cdot z} \exp\left\{-j \cdot \frac{k}{2z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\}$$

Выражение (4.2) позволяет по известному распределению в некоторой плоскости z рассчитать амплитуду световой волны в произвольной точке. Это выражение носит название **формулы дифракции Френеля (формула Френеля-Кирхгофа)**.

Приближение Фраунгофера.

В формуле Френеля разложим квадратичные члены

$$u(x, y, z) = \frac{\exp(-j \cdot k \cdot z)}{j \cdot k \cdot z} \bullet \exp\left[-j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right] \bullet$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} u_0(x_0, y_0) \cdot \exp\left\{-j \cdot \frac{k}{2z} [(x_0)^2 + (y_0)^2]\right\} \exp\left[j \cdot \frac{k}{z} (xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0$$

На больших расстояниях, когда $z \gg \frac{x_0^2 + y_0^2}{\lambda}$ (при этом x_0, y_0 - в пределах входной апертуры), формулу можно упростить, используя приближение $\exp\left\{-j \cdot \frac{k}{2z} [(x_0)^2 + (y_0)^2]\right\} \approx 1$:

$$u(x, y, z) = \frac{\exp(-j \cdot k \cdot z)}{j \cdot k \cdot z} \bullet \exp\left\{-j \cdot \frac{k}{2z} [(x)^2 + (y)^2]\right\}$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} u_0(x_0, y_0) \cdot \exp\left\{-j \cdot \frac{k}{z} [(xx_0) + (yy_0)]\right\} dx_0 dy_0$$

$$u(x, y, z) = \underbrace{A_0 \cdot \frac{j}{\lambda \cdot z}}_{\text{константа}} \cdot \underbrace{e^{-j \cdot k \cdot z} \cdot \exp\left[\frac{-j \cdot k}{2z} \cdot (x^2 + y^2)\right]}_{\text{квадратичный фазовый множитель}} \cdot \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x_0, y_0) \cdot \exp\left[\frac{j \cdot 2\pi}{\lambda \cdot z} (xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0}_{\text{преобразование Фурье}}$$

Полученное выражение с точностью до известного коэффициента совпадает с преобразованием Фурье от поля по входной плоскости.

Если же еще и область наблюдения ограничена в размерах, лежит вблизи оси z (параксиальное приближение), так что $\frac{x^2 + y^2}{\lambda} \leq \frac{\rho^2}{\lambda} \ll z$. Тогда

$$\exp\left[\frac{-j \cdot k}{2 \cdot z} (x_0 + y_0)^2\right] \approx 1 \text{ и}$$

$$u(x, y, z) = A_0 \cdot \frac{j}{\lambda \cdot z} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d} \cdot \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x_0, y_0) \cdot \exp\left[\frac{j \cdot 2\pi}{\lambda \cdot z} (xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0}_{\text{преобразование Фурье от поля в исходной плоскости}},$$

Этот интеграл можно рассматривать как преобразование Фурье функции $u_0(x_0, y_0)$. Пространственные координаты (x, y) в плоскости наблюдения дают информацию о пространственных частотах $\xi = \frac{x}{\lambda \cdot d}$ и $\eta = \frac{y}{\lambda \cdot d}$ в исходном распределении.

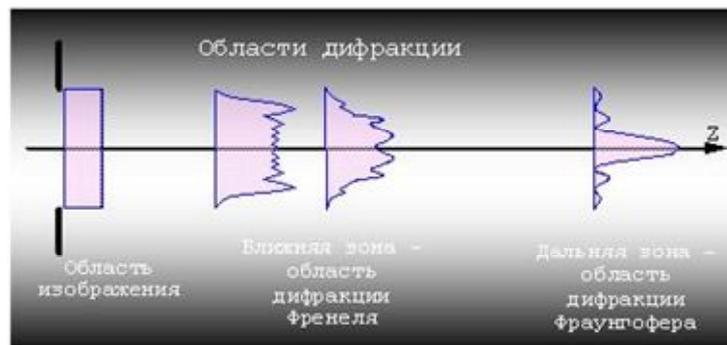


Рис. 4.3. Распределение света на разных расстояниях от прямоугольного отверстия

Элементарный оптический процессор. Преобразование Фурье в линзе

При распространении оптической сигнала в свободном пространстве происходит его Фурье-преобразование: на больших расстояниях от

входной плоскости распределение амплитуды светового поля представляет собой спектр сигнала. Подобными фурье-преобразующими свойствами обладают также тонкие линзы.

Линза считается *тонкой*, если можно пренебречь поперечным смещением светового луча внутри нее, т. е. если координаты X_l ; Y_l точек входа и выхода луча на поверхностях линзы совпадают. Такая линза вызывает лишь искривление волнового фронта проходящей световой волны, но не влияет на ее амплитуду. Поэтому тонкую линзу можно рассматривать как фазовый транспарант с функцией пропускания

$$t(x_l, y_l) = \exp[j\Phi(x_l, y_l)]$$

Функция пропускания линзы

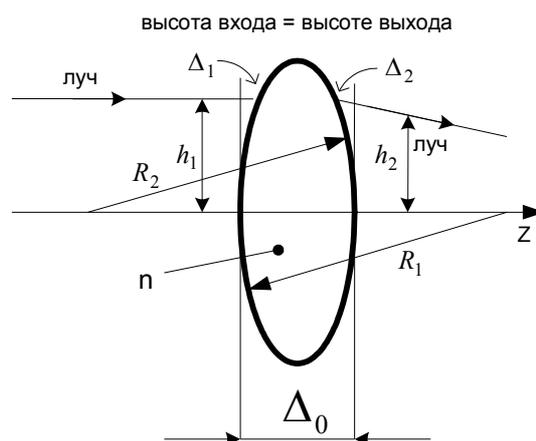


Рис. 4.4. Линза, образованная 2-мя сферическими поверхностями с радиусами R_1 и R_2 . n – показатель преломления.

Сферическая поверхность описывается следующей формулой:

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2; \quad z^2 = R^2 - (x^2 + y^2) \rightarrow z \approx R \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot R}$$

$$\Delta_1 \approx \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot R_1}, \quad \Delta_2 \approx \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot R_2}, \quad \text{где } (x, y) \text{ – координаты в плоскости линзы.}$$

$$\Delta(x, y) = \Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2 \text{ - толщина линзы в точке } (x, y).$$

$$\text{Фазовый набег луча с координатами } (x, y): \quad \varphi(x, y) = [\Delta(x, y) \cdot n + (\Delta_1 + \Delta_2)] \cdot \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$\varphi(x, y) = [\Delta_0 \cdot n - (n-1)(\Delta_1 + \Delta_2)] \cdot \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \text{здесь } \Delta_0 \cdot n - \text{ несущественная}$$

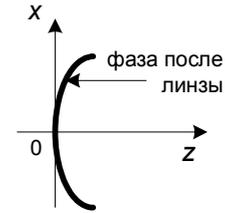
постоянная величина и для рассмотрения в дальнейшем не учитываем.

$$(n-1)(\Delta_1 + \Delta_2) = (n-1) \cdot \frac{x^2 + y^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{F_n},$$

где F_n - фокусное расстояние линзы.

Функция пропускания тонкой линзы

$$t_n(x, y) = e^{-j\varphi(x, y)} = \exp\left(j \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot F_n} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \right)$$



Простейшая когерентная оптическая система, выполняющая преобразование Фурье

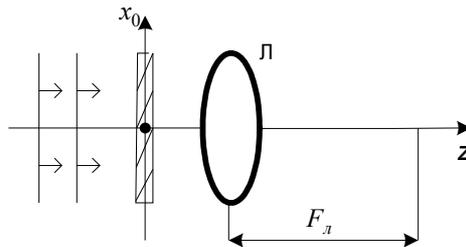


Рис. 4.5. Оптическая система с тонкой линзой, перед ней транспарант $t(x_0, y_0)$

Слева- плоская волна с амплитудой A_0 . Перед линзой $A_0 \cdot t(x_0, y_0)$

$$\text{После линзы } A_0 \cdot t(x_0, y_0) \cdot \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda \cdot F_n} \cdot (x_0^2 + y_0^2) \right]$$

На произвольном расстоянии " d " за линзой – интеграл свертки:

$$\begin{aligned} \dot{U}(x, y, d) = & A_0 \cdot \frac{j}{\lambda \cdot d} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d} \cdot \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} t(x_0, y_0) \cdot \exp\left[\frac{\pi}{\lambda \cdot F_n} \cdot (x_0^2 + y_0^2) \right] \cdot \\ & \exp\left[\frac{\pi}{\lambda \cdot F_n} \cdot ((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2) \right] dx_0 dy_0 \end{aligned}$$

Если $d = F_n$, то получим (опуская несущественный множитель

$$\exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot F_n \right)$$

$$\dot{U}(x, y, F_l) = A_0 \cdot \frac{j}{\lambda \cdot F_l} \cdot \underbrace{e^{-j \frac{2\pi}{\lambda \cdot F_l} (x^2 + y^2)}}_{\text{квадратичный фазовый множитель}} \cdot \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x_0, y_0) \cdot \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda \cdot F_l} \cdot (x \cdot x_0 + y \cdot y_0) \right] dx_0 dy_0}_{\text{это преобразование Фурье } = T(\xi, \eta)}$$

Вывод: линза позволяет получить результат – Фурье-образ транспаранта на малом расстоянии F_l (малом по сравнению со случаем дифракции Фраунгофера).

Квадратичный множитель перед интегралом несущественен, если мы интересуемся только амплитудным спектром входного сигнала (транспаранта). Кроме того, его можно скомпенсировать, поставив в плоскость $z = F_l$ тонкую линзу Л2, с таким же фокусным расстоянием F_l ,

Можно показать, что Фурье-преобразование при использовании когерентного освещения получается в любой оптической системе, в которой происходит фокусировка светового пучка (транспарант удаляется из схемы при этом определении положения фокальной плоскости). Именно в этой плоскости формируется пространственный спектр транспаранта t , а его масштаб и квадратичный фазовый множитель зависят от положения транспаранта на оптической оси.

Глава 5. Лазеры и особенности лазерного излучения

Слово «лазер» – «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» – усиление света вынужденным излучением.

ЛАЗЕР (оптический квантовый генератор) – устройство, генерирующее когерентные и монохроматические электромагнитные волны.

Светоизлучающий диод – СИД; Light-Emitting Diode - LED

История создания лазеров и основные законы квантовой оптики

1940 – В.А.Фабрикант – усиление света с помощью атомных систем

1951 – Ч. Таунс, А. Шавлов – обоснование возможности создания

1954 – Н.Г. Басов и А.М. Прохоров

Первые мазеры были сделаны в 1953—1954 гг. Н. Г. Басовым и А.М. Прохоровым, а также независимо от них американцем Ч. Таунсом и его сотрудниками. Мазеры принципиально похожи на лазеры но работают в микроволновом диапазоне. В 1964 году Басов, Прохоров и Таунс получили Нобелевскую премию по физике «За основополагающую работу в области квантовой электроники, позволившую создать генераторы и усилители, основанные на принципе мазера и лазера».

1960 – Т. Мейман (рубин), Е. Снитцер (Nd:glass)

Мейман использовал рубиновый стержень с импульсной накачкой, который давал красное излучение с длиной волны 694 нанометра.

1961 – А. Джаван (He-Ne)

1962 – Р. Холл (GaAs)

1968 – Ж.И. Алферов (гетероструктуры)

Постулаты Бора

1. Существуют стационарные состояния атомов, в которых они не излучают и не поглощают свет. В этих состояниях атомы обладают энергиями, образующими дискретный ряд.

2. Излучение, испускаемое или поглощаемое атомом при переходе с уровня на уровень, монохроматично

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

где $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, ν – частота излучения.

Энергия атома может принимать только вполне определенные значения $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$, которые называются энергетическими уровнями. Самый низкий уровень E_1 называется **основным**. Остальные уровни, начиная с E_2 , называются **возбужденными** и соответствуют более высокой энергии атома. Атом переходит с одного из низких уровней на более высокий поглощая энергию, например, при взаимодействии с фотоном – квантом электромагнитного излучения. А при переходе с высокого уровня на низкий атом отдает энергию в виде фотона.

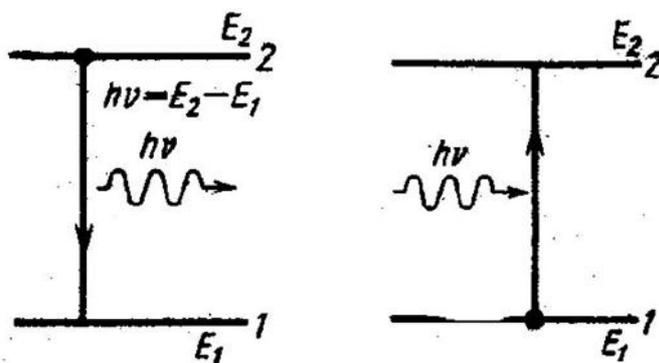
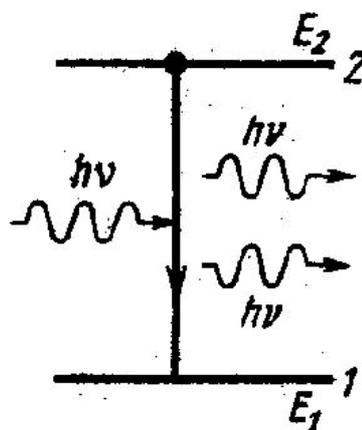


Рис. 5.1. Спонтанное излучение и поглощение кванта.

Спонтанное излучение. Атом в возбужденном состоянии неустойчив. Рано или поздно (в среднем за 10^{-8} секунды), в случайный момент времени он самостоятельно (спонтанно) вернется в основное состояние, излучив электромагнитную волну – фотон. Случайный характер

переходов приводит к тому, что все атомы вещества излучают одновременно и независимо, фазы и направление движения излученных ими электромагнитных волн не согласованы. Именно так работают обычные источники света – лампы накаливания, газоразрядные трубки, таким же источником света является и Солнце. Их **спонтанное излучение некогерентно**.

Вынужденное излучение - Гипотеза Эйнштейна. Резонансная волна как бы «раскачивает» атом и «стряхивает» его с верхнего энергетического уровня на нижний. Происходит вынужденный переход, при котором излученная атомом волна имеет ту же частоту, фазу и направление распространения, что и волна первичная. Эти волны когерентны, при их сложении происходит увеличение интенсивности суммарного излучения, или числа фотонов.



Понятие вынужденного излучения было введено, а его особое свойство – когерентность – теоретически предсказано А.Эйнштейном в 1916 и строго обосновано П.Дираком с точки зрения квантовой механики в 1927–1930.

$$A_1 + h\nu = A_2 + h\nu$$

Родившиеся кванты тождественны квантам стимулировавшим излучение по направлению, фазе и поляризации.

В состоянии равновесия вероятности процессов удовлетворяют условию: $P_{2,1}^{спонт} + P_{2,1}^{вын} = P_{1,2}^{вын}$

Ширина линии излучения

Энергии возбужденных состояний не фиксированы.

Неопределенность возбужденного состояния согласно принципу

неопределенности составляет: $\Delta E = \frac{h}{2\pi \cdot \tau_0}$.

τ_0 - время нахождения атома в возбужденном состоянии.

Отсюда появляется неопределенность частоты излучаемого кванта:

$$\Delta \nu = \frac{1}{2\pi} \nu_0$$

Это естественная ширина линии. Она минимально возможная и незначительна. Другие факторы, увеличивающие ширину линии:

1. Релаксационный (безрекомбинационный) процесс, связанный с взаимодействием частиц с кристаллической решеткой, приводит к безизлучательным процессам. Он влечет уменьшение времени частиц в возбужденном состоянии.

2. Столкновительное уширение.

3. Внутризонное поглощение.

4. Доплеровское уширение.

5. Разогрев.

Активная среда

Обычно в веществе количество атомов в основном состоянии гораздо больше, чем атомов возбужденных. Поэтому световая волна, проходя по веществу, расходует свою энергию на возбуждение атомов. Интенсивность излучения при этом падает, подчиняясь **закону Бугера**:

$$I_1 = I_0 e^{-kl}$$

где I_0 – исходная интенсивность, I_1 – интенсивность излучения, прошедшего расстояние l в веществе с коэффициентом поглощения k . Из

уравнения видно, что среда поглощает свет очень сильно – по экспоненциальному закону.

Вещество, в котором возбужденных атомов гораздо больше, чем атомов в основном состоянии, называется **активным**. Число атомов на определенном уровне E_n называется заселенностью этого уровня, а ситуация, когда $E_2 > E_1$ – **инверсной заселенностью**. Пусть по активному веществу проходит электромагнитная волна. Тогда за счет излучения при вынужденных переходах $E_2 - E_1$ (которых значительно больше, чем актов поглощения $E_1 - E_2$) будет происходить ее усиление. А с точки зрения квантовой механики это означает, что каждый пролетевший сквозь вещество фотон вызывает появление точно такого же фотона. Вместе они порождают еще два фотона, эти четыре – восемь и так далее – в активном веществе возникает фотонная лавина. Такое явление приводит к **экспоненциальному закону нарастания** интенсивности излучения, который записывается аналогично закону Бугера

Методы получения инверсной заселенности.

Инверсную заселенность можно осуществлять и поддерживать при помощи отдельного источника энергии, который как бы «**накачивает**» его активное вещество. Таким источником может быть мощная лампа, электрический разряд, химическая реакция и т.п. Кроме того нужно, чтобы атомы на одном из верхних энергетических уровней оставались достаточно долго (в масштабах квантовых процессов, разумеется) чтобы их там накопилось **порядка 50%** от общего количества атомов вещества. А для этого необходимо иметь как минимум три уровня энергии рабочих частиц (атомов или ионов). Инверсия может быть достигнута не только **за счет преимущественного заселения верхнего лазерного уровня, но и за счет высокой скорости очистки нижнего**

Трехуровневая схема генерации излучения работает следующим образом. Накачка переводит атомы с нижнего энергетического уровня E_1 на самый верхний E_3 . Оттуда они спускаются на уровень E_2 , где могут находиться



достаточно долго без спонтанного испускания фотонов (такой уровень называется метастабильным). И только под воздействием проходящей электромагнитной волны атом возвращается на основной уровень E_1 , испуская вынужденное излучение частотой $\nu=(E_2 - E_1)/h$, когерентное исходной волне.

Заселение уровней в лазерах может осуществляться:

- за счет поглощения света (**оптическая накачка**). Подбирая источник света с соответствующим спектром, можно обеспечить высокую селективность накачки.

- в неупругих **столкновениях атомов и молекул со свободными электронами**, при которых часть энергии электрона идет на возбуждение атома или молекулы. Свободные электроны могут создаваться или в **газовом разряде**, или вводиться в газ в виде пучка, сформированного в ускорителе.

- за счет неупругих столкновений атомов рабочего вещества с возбужденными атомами или ионами **вспомогательного газа** с передачей энергии возбуждения от них рабочему веществу.

- в процессе специально подобранных химических реакций (**химическая накачка**); при этом возбуждаются колебательные уровни молекул, причем возбуждение может быть селективным.

- за счет нагрева (**тепловая накачка**). Этот метод используется для накачки колебательных уровней в молекулах, инверсия на переходах

между которыми осуществляется за счет различных времен релаксации для верхнего и нижнего лазерных уровней при быстром адиабатическом расширении газа. На этом принципе основана работа газодинамических лазеров.

Очистка возбужденных состояний осуществляется: спонтанным излучением; в столкновениях с электронами или атомами примесного газа, при которых энергия возбуждения передается от рабочего вещества электронам или атомам примеси; при адиабатическом расширении газа; в специально подобранных химических реакциях.

Схема лазера

Чтобы превратить усилитель в генератор, необходимо организовать обратную связь. В лазерах она достигается при помещении активного вещества между отражающими поверхностями (зеркалами), образующими так называемый "открытый резонатор" за счет того, что часть излученной активным веществом энергии отражается от зеркал и опять возвращается в активное вещество

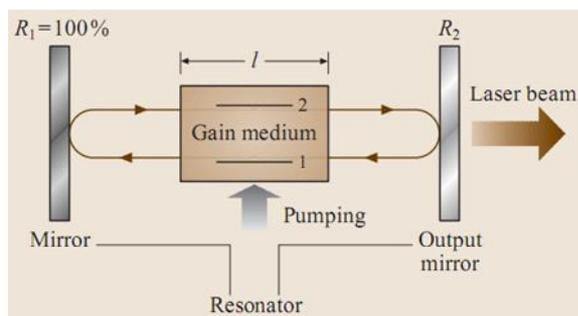


Рис. 5.2. Структурная схема лазера.

Резонатор в лазере не только обеспечивает обратную связь за счет возврата отраженного от зеркал излучения в активное вещество, но и определяет спектр излучения лазера, его энергетические характеристики, направленность излучения.

Резонатор представляет собой пару зеркал, параллельных друг другу, между которыми помещена активная среда. Одно зеркало («глухое») отражает весь падающий на него свет; второе, полупрозрачное, часть излучения возвращает в среду для осуществления вынужденного излучения, а часть выводится наружу в виде лазерного луча. В качестве «глухого» зеркала нередко используют призму полного внутреннего отражения, в качестве полупрозрачного – стопу стеклянных пластин. Кроме того, подбирая расстояние между зеркалами, резонатор можно настроить так, что лазер станет генерировать излучение только одного, строго определенного типа (так называемую моду)

Активная среда – вещество, в котором создается инверсная заселенность, – может быть:

- твердой (кристаллы рубина или алюмоиттриевого граната, стекло с примесью неодима в виде стержней различного размера и формы),
- жидкой (растворы анилиновых красителей или растворы солей неодима в кюветах),
- газообразной (смесь гелия с неоном, аргон, углекислый газ, водяной пар низкого давления в стеклянных трубках).

Полупроводниковые материалы и холодная плазма, продукты химической реакции тоже дают лазерное излучение.

Моды излучения лазера

Мода - выделенный вид ЭМ колебаний, соответствующий устойчивому распределению поля в резонаторе. В простейшем приближении плоской волны условие резонанса в резонаторе с плоскими зеркалами заключается в том, что на длине резонатора укладывается целое

число полувольт: $L = q \frac{\lambda}{2}$ (q – целое число), что приводит к выражению для

частоты типа колебаний с индексом q : $\nu_q = q \frac{c}{2L}$ и расстоянию по частоте

между соседними (q отличается на 1) модами: $\Delta\nu_q = \frac{c}{2L}$. В контур усиления попадает несколько типов колебаний резонатора.

Продольные моды излучения лазера.

Продольные моды определяются наличием узлов поля на зеркалах. Они имеют разную частоту и одинаковое сечение.

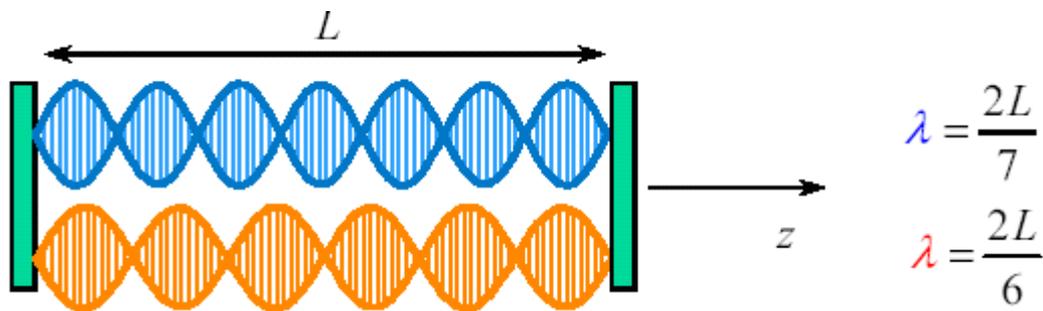


Рис. 5.3. Продольные моды излучения лазера.

Поперечные моды излучения лазера.

Поперечные моды - определяют пространственную структуру поля. Символ TEM указывает на то, что волны близки к поперечным (не имеют оставяющие поля вдоль распространения). Цифры – число изменений направлений поля по углу и вдоль радиуса.

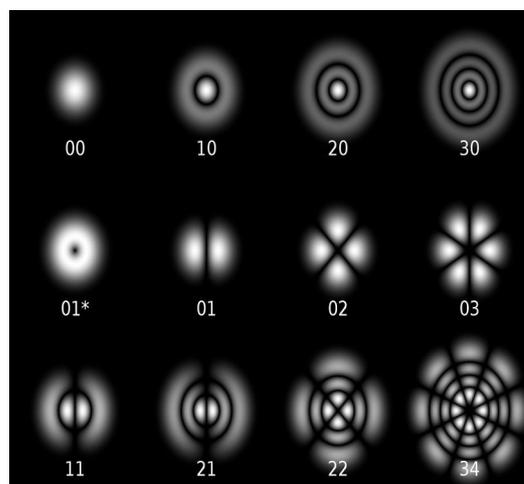


Рис. 5.4. Типы поперечных мод излучения лазера.

Газовые лазеры

Семейство газовых лазеров многочисленно. Они охватывают диапазон длин волн от УФ области спектра до субмиллиметровых волн. Большинство газовых лазеров работают в непрерывном, а также и в импульсном режимах и позволяют получать большие выходные мощности при высокой направленности излучения и стабильности его частоты.

Специфика газов проявляется в разнообразии типов частиц, уровни которых используются для возбуждения генерации (нейтр. атомы, ионы, неустойчивые молекулы). Поэтому процессы, используемые для создания инверсии населённостей, в газовых лазерах весьма многообразны. К их числу относятся электрический разряд, химическое возбуждение, фотодиссоциация, газодинамические процессы, возбуждение электронным пучком и т. д. Оптическая накачка с помощью газоразрядных ламп, применяемая в жидкостных и твёрдотельных лазерах, мало эффективна для большинства газовых лазеров, т. к. газы обладают узкими линиями поглощения.

В подавляющем большинстве газовых лазерах инверсия населённостей создаётся в электрическом разряде (газоразрядные лазеры). Электроны, образующиеся в разряде при столкновениях с частицами газа (электронный удар), возбуждают их, т. е. переводят на более высокие уровни энергии. Возбуждение электронным ударом обычно сочетается в газовых лазерах с другим механизмом возбуждения - резонансной передачей энергии частицам одного сорта (рабочим частицам) от добавляемых частиц другого сорта (вспомогательных) при неупругих соударениях.

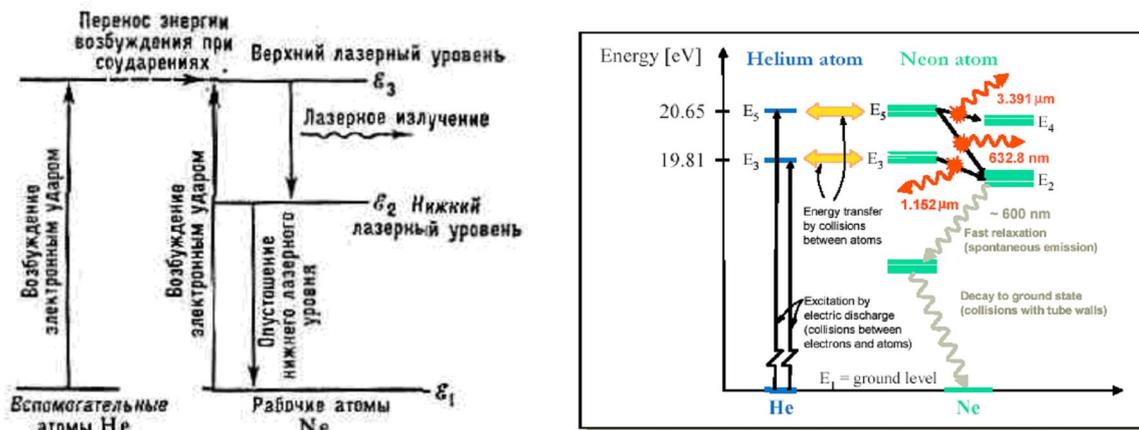


Рис. 5.5. Схема уровней энергии рабочих атомов Ne и вспомогательных атомов He, используемых в гелий-неоновом лазере.

Исторически первым газовым лазером, появившимся в 1961 (амер. физик А. Джаван), был гелий-неоновый лазер. В гелий-неоновом лазере рабочим волновым является нейтральные атомы неона Ne. В электрическом разряде часть атомов Ne переходит с основного уровня 1 на возбуждённый верх. уровень энергии 3 (рис. 5.5). Но в чистом Ne время жизни на уровне мало, атомы быстро «соскакивают» с него на уровни 1 и 2, что препятствует созданию достаточно высокой инверсии населённостей (превышающей порог генерации) для пары уровней 2 и 3. Примесь He существенно меняет ситуацию. Первый возбуждённый уровень атома He совпадает с верхним уровнем 3 неона. Поэтому при столкновении возбуждённых электронным ударом атомов He, с невозбуждёнными атомами Ne (с энергией 1) происходит передача возбуждения, в результате которой атомы Ne будут возбуждены на уровень 3, а атомы He возвращаются в основное состояние.

При достаточно большом числе атомов He в газовой смеси можно добиться преимущественного заселения уровня 3 неона. Этому же способствует опустошение уровня 2 неона, происходящее при соударениях атомов со стенками газоразрядной трубки (рис. 5.6). Возбуждение атомов

производится электрическим током, проходящим через газовую смесь. Для He-Ne лазера это слаботочковый, тлеющий разряд (типичные токи разряда – 20-50 мА). Для эффективного опустошения уровня 2 диаметр трубки должен быть достаточно мал. Однако малый диаметр трубки ограничивает число атомов Ne и, следовательно, мощность генерации. Оптимальным с точки зрения макс. мощности генерации является диаметр трубки около 7 мм при давлении 1 мм рт. ст. и определенном соотношении Ne и He (1 : 10).

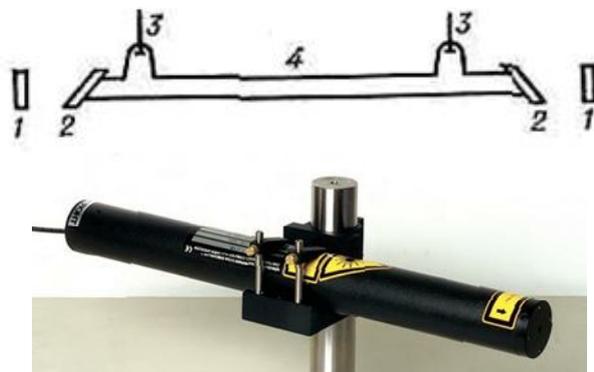


Рис. 5.6. Схема и фотография гелий-неонового лазера: 1 - зеркала оптического резонатора; 2 - окна газоразрядной трубки; 3 - электроды; 4 - газоразрядная трубка.

Уровни неона 2 и 3 обладают сложной структурой, т. е. состоят из множества подуровней. В результате гелий-неоновый лазер может работать на 30 длинах волн в области видимого света и ИК излучения (рис.5.7). Зеркала оптического резонатора имеют многослойные диэлектрические покрытия. Это позволяет создать необходимый коэфф. отражения для заданной длины волны и возбудить тем самым в газовом лазере генерацию на требуемой частоте.

Helium neon wavelengths and power levels		
Wavelength (nm)	Maximum power (mW)	Gain (relative to 632.8 nm)
543.5	1.5	1/17
594.1	7.0	1/15
604	2.5	1/10
611.9	7.0	1/5
629	-	1/5
632.8	75	1
635	-	1/8
640.1	1.5	1/5
730.5	0.3	1/8
1152.6	17.5	4/5
1523.5	1.5	-
2396	0.5	-
3392.0	24	44/1

Рис. 5.7. Длины волн и мощность излучения гелий-неонового лазера.

Мощность генерации гелий-неонового лазера достигает всего десятых долей Вт при КПД 0,1%. Тем не менее высокие монохроматичность и направленность излучения, а также простота устройства обусловили широкое применение гелий-неоновых лазеров. Красный гелий-неоновый лазер ($\lambda=0,6328$ мкм) используется при юстировочных и нивелировочных работах. Гелий-неоновые лазеры применяются при наладочных работах в голографии, в квантовых гироскопах и оптических стандартах частоты.

Со времени появления гелий-неонового лазера генерация получена более чем на 450 различных переходах между уровнями нейтр. атомов 34 хим. элементов. Возбуждение непрерывной генерации происходит в положительн. столбе тлеющего разряда при плотности тока $j=100\text{—}200$ А/см². Для импульсной генерации используется импульсный разряд с послесвечением. Плотность тока в импульсном разряде может достигать 300 А/см², а в случае импульса с крутым фронтом — сотен и тысяч А/см², что создаёт высокую пиковую мощность генерации.

Полупроводниковые лазеры

Хотя полупроводниковые лазеры и являются твердотельными, их принято выделять в особую группу. В этих лазерах когерентное излучение

получается вследствие перехода электронов с нижнего края зоны проводимости на верхний край валентной зоны.

Первый полупроводниковый лазер был получен в 1962 году, при комнатной температуре непрерывного режима в 1970 году ("Бэлл лаборатриз" Н.Хаяси и М.Б.Паниш).

В отличии от всех других активных сред, уровни энергии в которых дискретны и поэтому генерируют монохроматичное излучение, полупроводники имеют довольно широкие энергетические зоны; их излучение происходит в широком диапазоне длин волн и обладает малой когерентностью.

Существует два типа полупроводниковых лазеров. Первый имеет пластину беспримесного полупроводника, в котором накачка производится пучком быстрых электронов с энергией 50-100 кэВ. Возможна также оптическая накачка. В качестве полупроводников используются арсенид галлия GaAs, сульфид кадмия CdS или селенид кадмия CdSe. Накачка электронным пучком вызывает сильный нагрев полупроводника, отчего лазерное излучение ухудшается. Поэтому такие лазеры нуждаются в хорошем охлаждении. Например, лазер на арсениде галлия принято охлаждать до температуры 80 К.

Накачка электронным пучком может быть поперечной (рис. 8) или продольной (рис. 9). При поперечной накачке две противоположные грани полупроводникового кристалла отполированы и играют роль зеркал оптического резонатора. В случае продольной накачки применяются внешние зеркала. При продольной накачке значительно улучшается охлаждение полупроводника. Пример такого лазера - лазер на сульфиде кадмия, генерирующий излучение с длиной волны 0,49 мкм и имеющий КПД около 25%.



Рис. 5.8. Поперечная и продольная накачка электронным пучком.

Второй тип полупроводникового лазера - так называемый инжекционный лазер. В нем имеется р-п-переход (рис. 5.9.), образованный двумя вырожденными примесными полупроводниками. Грани, перпендикулярные плоскости р-п-перехода, отполированы и служат в качестве зеркал оптического резонатора. На такой лазер подается прямое напряжение, под действием которого понижается потенциальный барьер в р-п-переходе и происходит инжекция электронов и дырок. В области перехода начинается интенсивная рекомбинация носителей заряда, при которой электроны переходят из зоны проводимости в валентную зону и возникает лазерное излучение. Для инжекционных лазеров применяют главным образом арсенид галлия. Излучение имеет длину волны 0,8-0,9 мкм, КПД довольно высок - 50-60%.

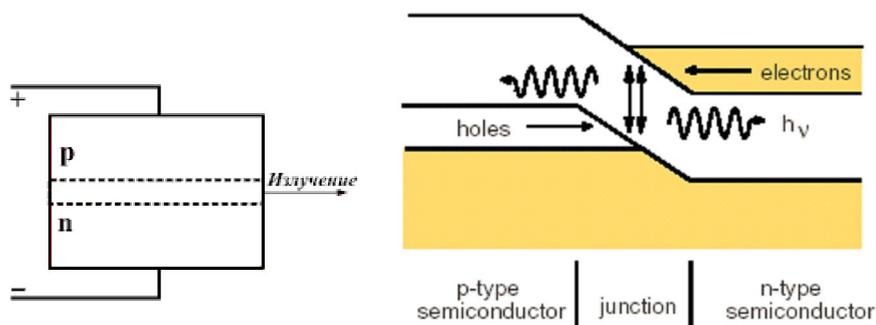


Рис. 5.9. Принцип устройства инжекционного лазера.

Миниатюрные инжекционные лазеры с линейными размерами полупроводников около 1 мм дают мощность излучения в непрерывном режиме до 10 мВт, а в импульсном режиме могут иметь мощность до 100 Вт. Получение больших мощностей требует сильного охлаждения.

Для инжекционных лазеров наибольшее распространение получили гетеро структуры двух типов: AlGaAs/GaAs и GaInPAs/InP. Активным элементом этих лазеров является многослойная гетеро структура, изготавливаемая на монокристаллических подложках GaAs и InP соответственно.

Следует отметить, что в устройстве лазеров имеется много различных особенностей. Оптический резонатор лишь в простейшем случае составлен из двух плоскопараллельных зеркал. Применяются и более сложные конструкции резонаторов, с другой формой зеркал.

При импульсном излучении лазеров длительность импульсов бывает в пределах от 10^{-3} до 10^{-12} с. Импульсы могут быть одиночными или следовать с частотой повторения до нескольких гигагерц. Достижимая мощность составляет 10^9 Вт для наносекундных импульсов и 10^{12} Вт для сверхкоротких пикосекундных импульсов.

Внешняя обратная связь

Обратная связь обусловлена тем, что часть излучения, вышедшего из лазера, после отражений от внешних элементов возвращается в лазерный резонатор. Образуется составной резонатор рис.5.10. ($L+L_{\text{вн}}$). Из-за чего меняются характеристики излучения. Меняются: выходная оптическая мощность, число генерируемых (продольных) мод, ширина спектра излучения.

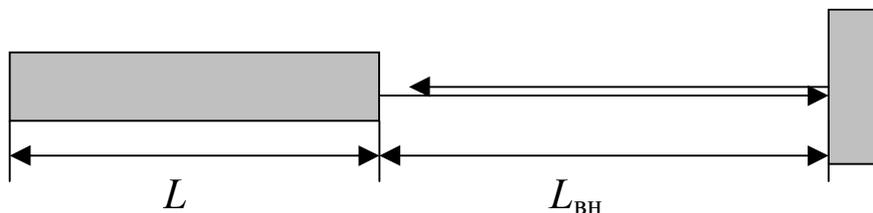


Рис. 5.10. Внешняя обратная связь - составной резонатор.

Для исключения внешнего влияния на лазерное излучение используются следующие методы:

1. Стабилизация мод - распределенная обратная связь.
2. Подавление интерференционных эффектов - пульсация мощности лазера.
3. Увеличение коэффициента отражения резонатора лазера, неотражающие покрытия.
4. Оптические развязки - использование поляризации.

Составной резонатор часто используют для перестройки длины волны излучения лазера в широком диапазоне. В качестве внешнего резонатора можно использовать одномодовое волокно с дифракционной решеткой Брэгга. Перестройка длины волны происходит согласно формулы Брэгга: $\Lambda = m\lambda_v / (2n_{эфф})$, где Λ - период решетки; λ_v - длина волны лазера; $n_{эфф}$ - эффективный показатель преломления; m - порядок волновой моды.

Перестраиваемый лазер – лазер, длина волны излучения которого может изменяться в спектральном диапазоне, ширина которого существенно больше ширины линии излучения лазера.

Лазерные модули на полупроводниковых лазерах

Для использования в оптических процессорах широко используются лазерные модули на полупроводниковых лазерах. Схема одного из таких модулей приведена на рис. 5.11.

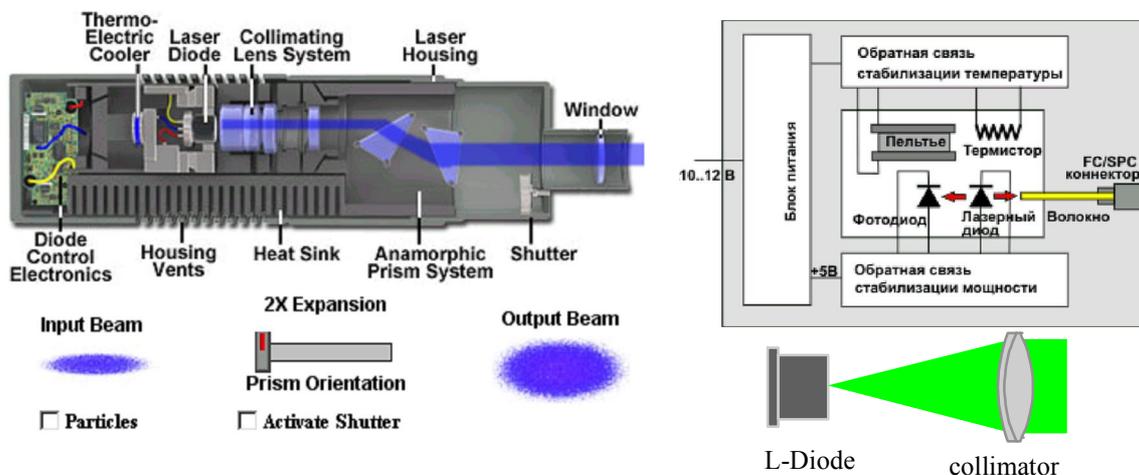


Рис. 5.11. Схема лазерного модуля.

Технические характеристики лазерного модуля:

Длина волны излучения: 1550 нм

Ширина линии излучения (FWHM): < 5 нм

Выходная оптическая мощность: 0.35 мВт

Напряжение питания: ±10..12 В

Максимальная потребляемая мощность: 5 Вт

Оптический коннектор: одномодовый FC/Super PC

Электрический коннектор BNC: не используется

Габаритные размеры, ДхШхВ: 160x88x40 мм

Типовой спектр излучения лазерного модуля и его спекловая картина приведены на рис. 5.12.

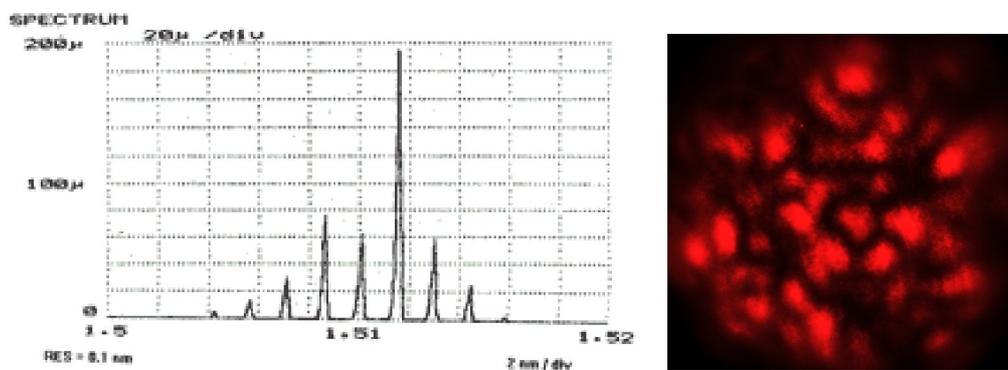


Рис. 5.12. Типовой спектр излучения лазерного модуля и спекловая картина.

Волоконнооптические лазеры

Волоконный лазер - лазер, активная среда и, возможно, резонатор которого являются элементами оптического волокна. При полностью волоконной реализации такой лазер называется цельноволоконным, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным. Во всех волоконных лазерах применяются специальные типы оптических волокон, в которые встроены один или несколько волноводов для осуществления оптической накачки (рис. 5.13).

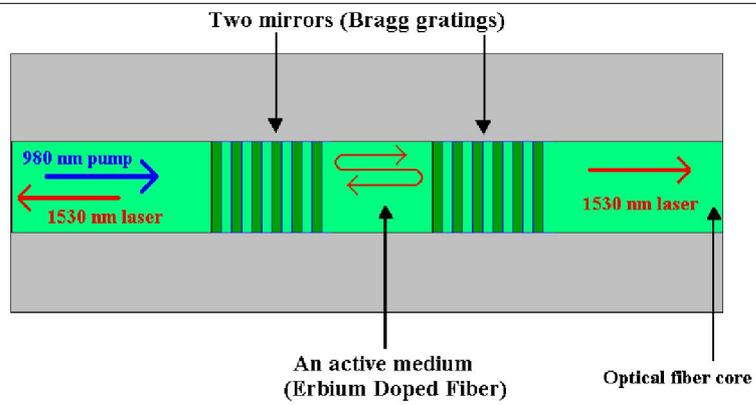
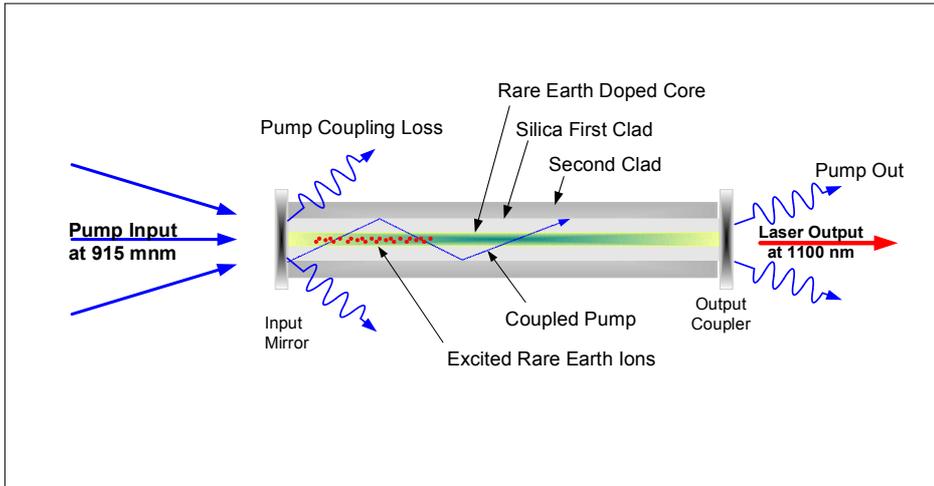


Рис. 5.13. Схема волоконнооптического лазера.

Глава 6. Фотоприемники

CCD - charge-coupled device (ПЗС- прибор с зарядовой связью);

CMOS - complementary metal–oxide–semiconductor (КМОП К-МОП - комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник).

ПЗС-фотоприемники

В 1969 г. сотрудники фирмы Bell Laboratories У. Бойл и Дж. Смит в поисках электрического аналога схем на цилиндрических магнитных доменах предложили - и продемонстрировали экспериментально - принцип зарядовой связи. Сегодня массовое производство фотоприемников на приборах с зарядовой связью (ФПЗС), линеек и матриц осуществляется многими фирмами: «Sony», «Texas Instruments», «Sharp», «Samsung», «Hitachi», «Toshiba», «Kodak» и др. В России ПЗС-матрицы выпускаются в ЦНИИ «Электрон», (Санкт-Петербург) и в НПО «Пульсар».

Основной элемент приборов с зарядовой связью МОП-конденсатор состоит из электрода, который может быть выполнен из металла или сильно легированного поликремния, диэлектрика и полупроводниковой подложки (рис. 6.1.). Если к электроду Φ_2 приложено постоянное отрицательное напряжение U_G , то у поверхности раздела кремния и окисла или в глубине подложки образуется обедненная область. Она соответствует потенциальной яме в распределении потенциала между полупроводником и окислом. Под действием поглощенного кванта света появляется электронно-дырочная пара. Дырки попадают в обедненную область. Глубина потенциальной ямы уменьшается. Этот процесс соответствует первому этапу преобразования сигналов на ФПЗС – этапу детектирования фотонного потока. Детектирующим элементом может служить и *p-n* переход.

Процесс накопления электронов (рис. 6.2.) или дырок может

происходить в потенциальной яме или на емкости конденсатора, связанного с элементом детектирования. Заряд, который может удерживаться в яме, определяется зарядовой емкостью ячейки (Q_{SMAX}); $Q_{SMAX} = C_0 A |\Delta U_{нов}|$, где C_0 - удельная ёмкость; A - площадь затвора; $\Delta U_{нов}$ - поверхностный потенциал. В потенциальную яму помещается $10^5 - 10^7$ дырок или электронов.

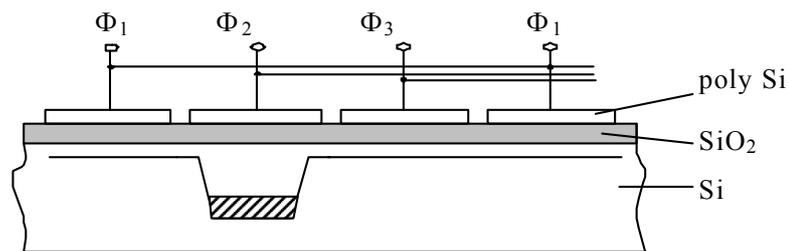


Рис. 6.1. Схема ПЗС-структуры.

Источником паразитных зарядов в потенциальной яме является процесс термогенерации. С течением времени устанавливается равновесие зарядов, и яма полностью заполняется электронами или дырками. Темновой ток налагает три ограничения на работу ФПЗС: ограничивает время накопления сигнала, вносит временной и пространственный шум. При охлаждении ФПЗС можно существенно снизить темновой ток. Темновой ток уменьшается примерно в 2 раза на каждые десять градусов. В современных ФПЗС камерах для астрономии темновой ток составляет менее 5 электронов в секунду (табл. 6.1.). Глубокое охлаждение (до температуры жидкого азота) влечет и отрицательные эффекты. При охлаждении на 50 и более градусов освобождаются зарядовые ловушки, при прохождении через которые значительно искажается зарядовый рельеф.

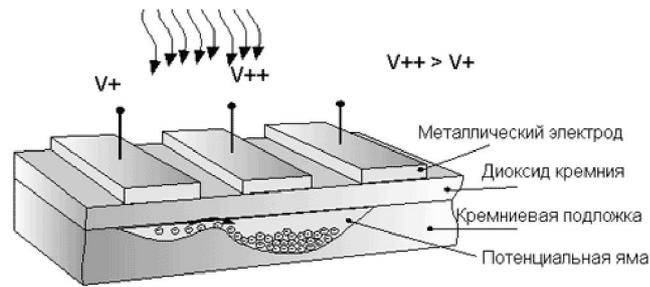


Рис. 6.2. Механизм накопления зарядов в ФПЗС.

Ввод зарядов в ПЗС-структуры может осуществляться не только оптическим способом, но и электрическим. Наличие узла электрического ввода зарядов в ФПЗС значительно расширяет их возможности по обработке сигналов.

После окончания процесса накопления сформированные зарядовые пакеты с помощью регистров сдвига на основе ПЗС перемещаются к выходному устройству, где происходит поочередное преобразование зарядовых пакетов в пропорциональный сигнал напряжения. Причем происходит одновременный перенос всех зарядовых пакетов ПЗС-линейки одновременно в одну и ту же сторону. В ПЗС, где все электроды образуют простые (однородные) МОП-структуры, минимальное число фаз, необходимое для направленной передачи зарядовых пакетов, равно трем. В этом смысле трехфазный прибор является простейшим. В нем в каждой трехэлектродной ячейке при переносе один электрод является передающим, другой – принимающим, третий – барьерным, препятствующим перемешиванию соседних зарядовых пакетов. На полную или почти полную передачу заряда из одной ямы в другую требуется время. Отсюда ограничения на частоты передачи, которые в настоящее время достигают 60 МГц. Но всегда часть заряда теряется. Эти потери характеризуются "интегральным" параметром – неэффективностью переноса ϵ , включающим все процессы, приводящие к искажениям передаваемого заряда.

Работа ФПЗС на всех этапах преобразования протекает под управлением генератора тактовых сигналов (ПЗС-контроллера). Величина, форма, временные соотношения между управляющими импульсными сигналами в значительной степени влияют на характеристики ФПЗС.

ПЗС-фотоприемники являются сложными приборам, имеющими разное количество узлов ввода-вывода зарядов и ПЗС-регистров [5]. Однако по расположению пикселей традиционно их разделяют на две группы: приемники с линейным расположением фоточувствительных элементов – линейные ФПЗС и приемники с двумерным расположением фоточувствительных элементов – двумерные или матричные ФПЗС.

На рис. 6.3 приведены типовые структуры линейных ФПЗС. Они имеют один регистр накопления и отличаются набором отдельных узлов обеспечивающими считывание информации. Широко распространено совмещение детектирующих и накопительных свойств МОП-конденсаторов. В этом случае и детектирующие функции, и накопительные функции, и функции переноса осуществляются ПЗС-регистром сдвига с прозрачными поликремниевыми электродами (рис. 6.3.а). Такую структуру имеет отечественный фотоприемник типа ФППЗ-1Л (Электрон).

Применение двух регистров для считывания зарядов из ФПЗС (рис.6.3.в) позволяет повысить в два раза плотность размещения фоточувствительных элементов при заданном шаге элементов регистра сдвига, снизить влияние неэффективности переноса, уменьшить время считывания сигналов и соответственно увеличить временное разрешение прибора. Два регистра считывания используются достаточно часто как в отечественных приборах (1200ЦЛ5, 1200ЦЛ7), так и зарубежных TCD1304AP (TOSHIBA), ILX 703 (Sony), CCD133 (Fairchild Imaging), TH7804A (Atmel) и др. Кроме того, для сокращения времени считывания в ФПЗС могут иметься несколько параллельно работающих выходных

устройств, см. рис. 6.3.г, д. Так линейный ФПЗС RETICON RL1282D имеет 16 выходов.

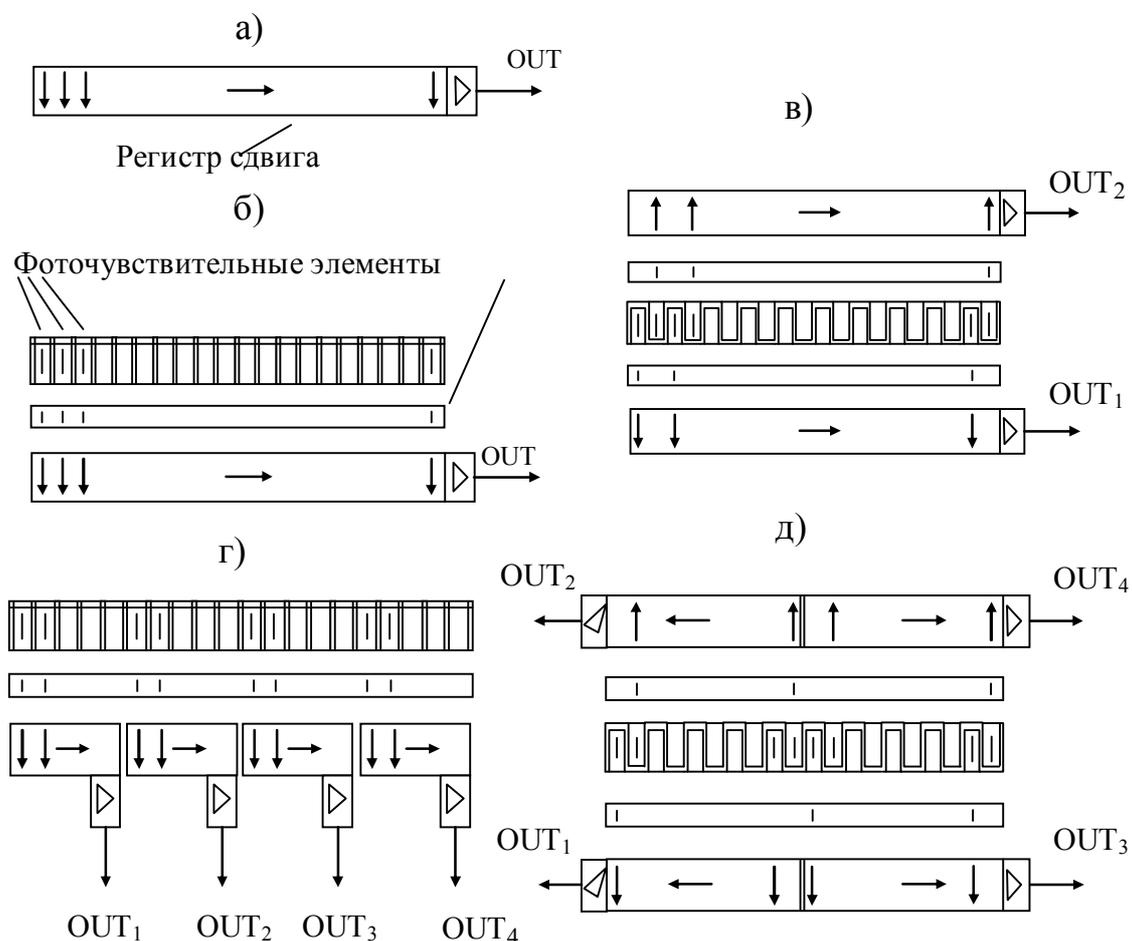


Рис. 6.3. Типовые структуры линейных ФПЗС.

Одна из наиболее распространенных структур - это схема линейного ФПЗС с выделенным фотодиодным регистром накопления и затвором антиблуминга. Здесь каждому этапу преобразования соответствует свой функциональный элемент. Элементом, осуществляющим детектирование, является в этой структуре $p-n$ переход. Элементом накопления служит МОП-конденсатор, в который стекают носители, генерируемые в области $p-n$ перехода. Считывание зарядовых пакетов производится с использованием ПЗС-регистра. Регистры сдвига часто имеют дополнительно и входной узел для электрической инжекции зарядов в

регистр, расширяющий возможности приборов. Защита от блюминга – важный элемент ФПЗС. Блюминг – это диффузионное растекание носителей из переполненной потенциальной ямы в соседние ямы. Степень (область) растекания носителей пропорциональна величине оптической "перегрузки". При блюминге локальная перегрузка приводит к потере информации в значительной части соседних ячеек. Основная задача при создании антиблюминговой защиты – это перехват растекающихся из переполненной ямы носителей. Линейные ФПЗС с защитой от блюминга имеют специальную диффузионную область стока, расположенную рядом с регистром накопительным, в которую стекают лишние заряды.

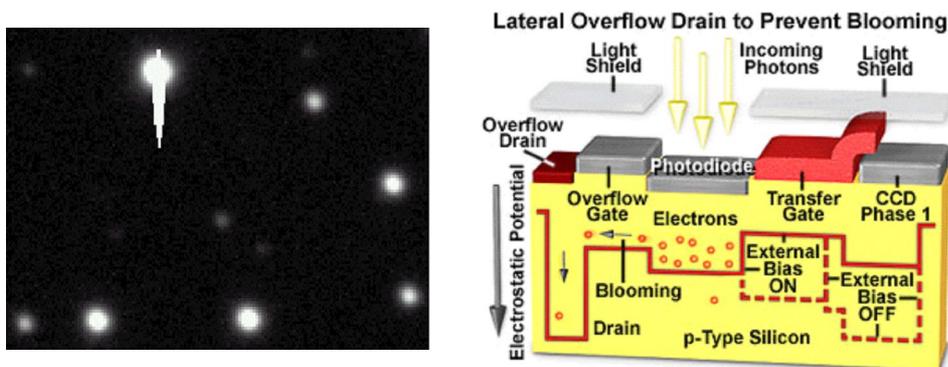


Рис. 6.4. Растекание заряда и сечение ФПЗС с механизмом антиблюминга.

Опишем структуру и сигналы управления ФПЗС Sony ILX703 (рис. 6.5). ФПЗС позволяет проводить различные способы обработки сигналов, в том числе и антиблюминговую обработку. Он имеет регистр накопления из 2048 светочувствительных элементов, каждый из которых включает в себя $p-n$ переход (фотодиод) и МОП-конденсатор. Фотодиоды разделены с помощью стоп-канальных диффузионных областей. С верхней стороны регистра накопления имеется механизм антиблюминга, с нижней стороны располагается ПЗС-регистр вывода с выходным устройством. Между стоком антиблюминга и регистром накопления находится затвор антиблюминга. При подаче сигнала SHUT заряд из регистра накопления

сбрасывается в сток. Кроме того, затвор антиблуминга позволяет регулировать высоту потенциального барьера для стока растекающихся из переполненных элементов носителей. В этом случае напряжение на затвор подается постоянно в течение всего времени накопления. Между ПЗС-регистром и регистром накопления находится фотозатвор. При подаче сигнала Φ_{ROG} заряд из регистра накопления переносится в ВР. Считывание зарядовых пакетов из ВР через ВУ происходит по тактовым импульсам Φ_{CLK} .

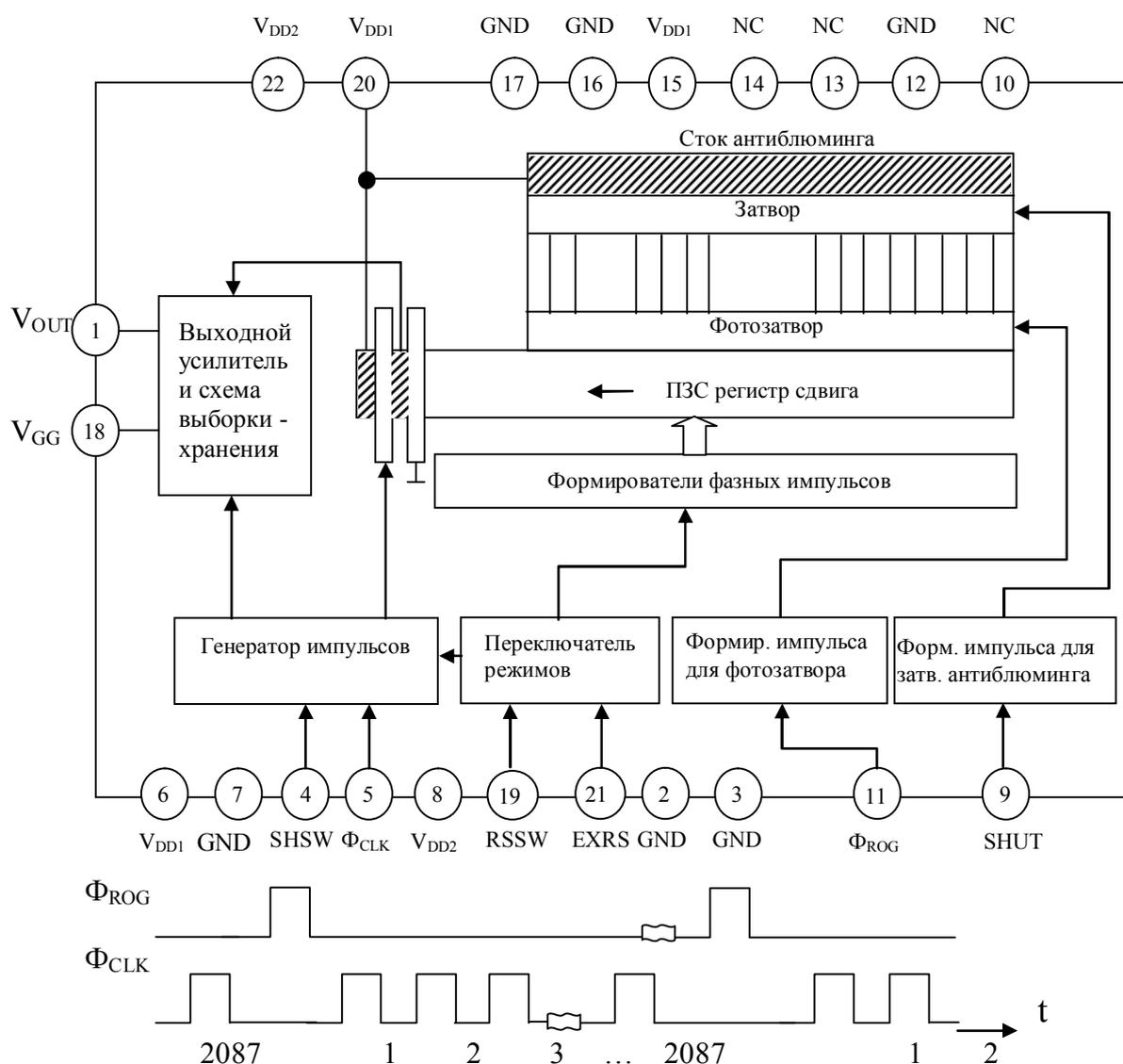


Рис. 6.5. Структурная схема линейного ФПЗС типа ILX703A фирмы SONY и его управляющие сигналы.

На рис. 6.5 приведена временная диаграмма управляющих сигналов,

которые позволяют осуществлять работу фотоприемника в стандартном кадровом режиме. После окончания выделенного интервала накопления T_H по импульсу напряжения ROG осуществляется одновременный параллельный перенос всех накопленных зарядовых пакетов в защищенные от света ПЗС-регистр считывания. Затем начинается новый цикл детектирования и накопления, а ранее накопленные зарядовые пакеты непрерывной цепочкой по тактовым импульсам CLK передаются ПЗС-регистром в выходное устройство. Время считывания T_L всех пакетов определяется частотой фаз F_Φ : $T_L = NT_\Phi = N/F_\Phi$. Оно должно быть меньше, чем T_H .

Двумерные ФПЗС были разработаны, прежде всего, для телевизионных применений, однако многие фирмы выпускают и специальные матричные ФПЗС для научных целей .

ПЗС-матрицы для телевизионных применений состоят из двух областей - секции накопления и секции хранения, а также включают выходной ПЗС-регистр и выходной узел. В зависимости от структуры и расположения секции хранения различают три топологии:

- ▲ с кадровым переносом (КП) - FT (Frame Transfer) рис. 6.6;
- ▲ со строчным переносом (СП) - IT (Interline Transfer) рис. 6.7;
- ▲ со строчно-кадровым переносом (СКП) - FIT (Frame-Interline Transfer) рис. 6.7;
- ▲ а также импульсной засветки – FF (Full Frame) рис. 6.8.

В стандартном режиме матрицы работают следующим образом. В течении прямого хода кадровой развертки (в цикле накопления) происходит накопление фотогенерированных носителей в элементах (МОП-конденсаторах) секции накопления. Во время обратного хода – их параллельный перенос в секцию хранения. При следующем цикле накопления зарядовые пакеты из секции хранения построчно во время

обратного хода строчной развертки поступают в выходной ПЗС-регистр, из которого во время прямого хода строчной развертки они выводятся последовательно с тактовой частотой, в два раза превышающей полосу частот формируемого видеосигнала.

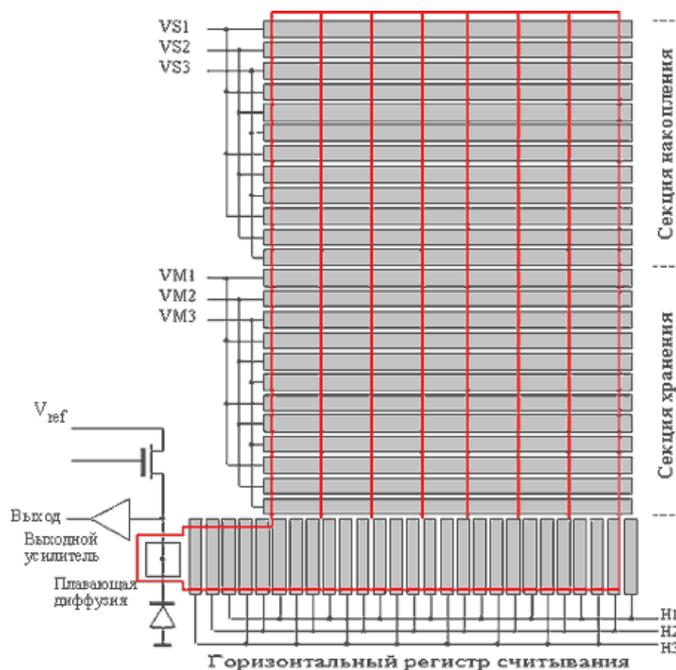


Рис. 6.6. ФПЗС с кадровым переносом.

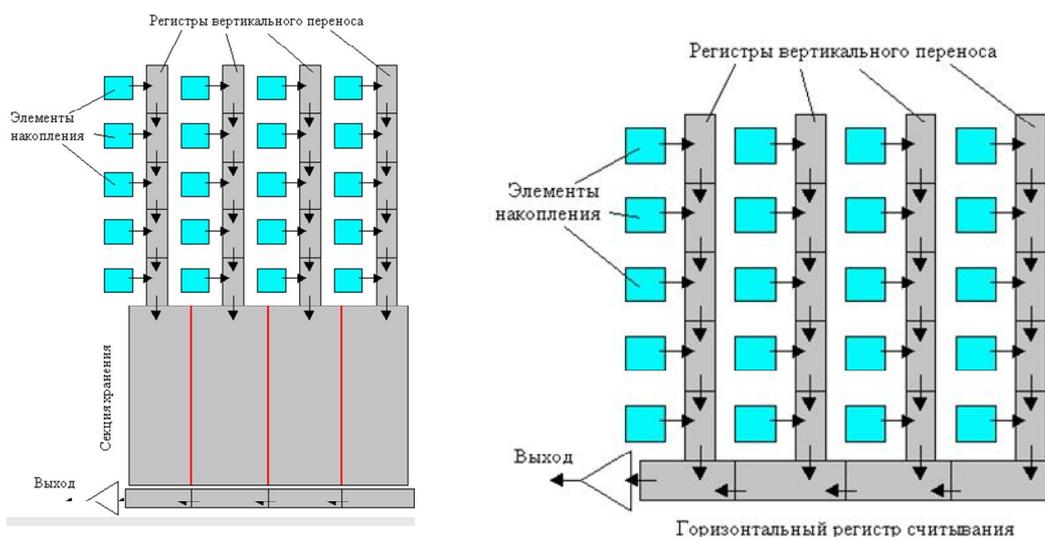


Рис. 6.7. ФПЗС со строчным переносом и строчно-кадровым переносом.

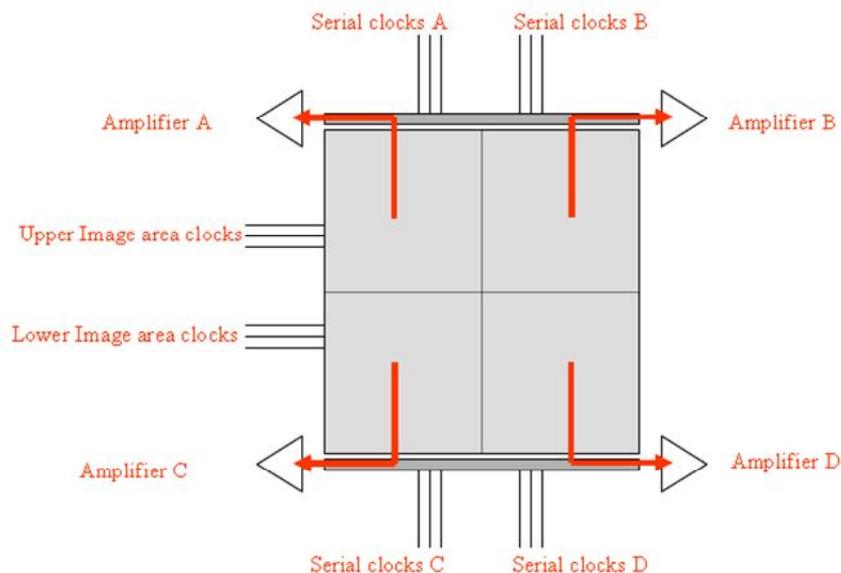


Рис. 6.8. ФПЗС импульсной засветки.

Промышленностью выпускаются матрицы с различной размерностью, например, 1024x1024 и более элементов. При большом числе элементов некоторые типы ФПЗС имеют несколько выходных узлов, что сокращает время считывания. Параметры матричных ФПЗС, выпускаемых в настоящее время, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Характеристики матричных ПЗС-фотоприемников.

Тип фото-приемника	Число элементов (Н x V)	Размер (шаг) элементов, мкм	Активная площадь, мм	Скорость считывания МГц	Особенности	Изготовитель
AT71201M	4096x4096	11x11	45x45	40*4	4 выхода FF Двунаправленные сдвиги по вертикали	e2v
KAF-50100	8304x6220	6,8x6,8	6.0x6.0	14*4	4 выхода	KODAK
HS0512J	512x512	16x16	8,19x8,19	20x16	16 выходов	RETICON
THX7897M	2048x2048	15x15	30,72x30,72	-	Возможно сбор в матрицу 2x2	THOMSON
IA-D1	32x32 - 256x256	16x16	0,51x0,51 - 4,1x4,1	16	До 12000 кадров/с	DALSA
IA-D9	1024x1024 - 5000x5000	12x12	12,29x12,29 - 60,0x60,0	60 ^x	Несколько выходов	DALSA
ФППЗ17M	520x580	17x23	8,84x13,34	10	ТВ применение	Электрон
RA2048J	2048x64	27x27	55,3x1,73	128	16 выходов	RETICON
CCD595	9216 x 9216	8,75 x 8,75	80.64 x 80.64	x	8 выходов FF	FAIRCHILD

Фотодиоды и КМОП-фотоприемники

Одно из перспективных направлений развития фотоприемников является создание однокристальных КМОП цифровых камер. КМОП-фотоприемники стали практически альтернативой ПЗС-фотоприемников. Основным элементом КМОП-фотоприемников является фотодиод.

Фотодиод – это полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности (рис. 6.9.). Обычно в качестве фотодиода используют полупроводниковые диоды с *p-n* переходом, который смещен в обратном направлении внешним источником питания. При поглощении квантов света в *p-n* переходе или в прилегающих к нему областях образуются новые носители заряда. Неосновные носители заряда, возникшие в областях, прилегающих к *p-n* переходу на расстоянии, не превышающей диффузионной длины, диффундируют в *p-n* переход и проходят через него под действием электрического поля. То есть обратный ток при освещении возрастает. Величина, на которую возрастает обратный ток, называется фототоком.

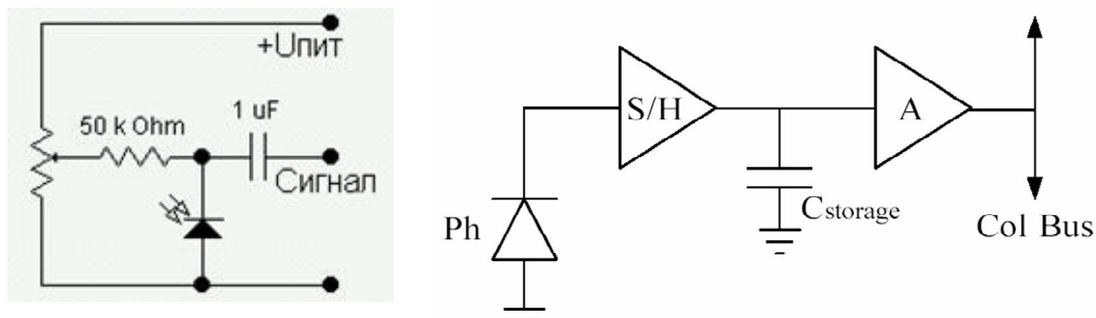


Рис. 6.9. Схема включения фотодиода и схема активного пикселя.

КМОП-фотоприемники появились в результате развития фотодиодных матриц, координатная выборка в которых осуществлялась с помощью *N*-канальных МОП-дешифраторов и регистров, сформированных на том же кристалле. Основной недостаток таких *N*-канальных МОП-

фотодиодных матриц – малая амплитуда выходных сигналов и высокий уровень шумов. Это обусловлено считыванием сигнальных зарядов на шины столбцов, емкость которых велика и пропорциональна числу пикселей в столбце, т.е. пропорциональна формату матрицы. И поскольку КМОП-фотоприемники существенно проигрывали ФПЗС, их разработки были прекращены. Переворот в технологии КМОП-сенсоров произошел, когда в лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory — JPL) NASA успешно реализовали Active Pixel Sensors (APS). APS добавляет к каждому пикселу транзисторный усилитель для считывания, что даёт возможность преобразовывать заряд в напряжение прямо в пикселе. Это обеспечило также произвольный доступ к фотодетекторам наподобие реализованного в микросхемах ОЗУ.

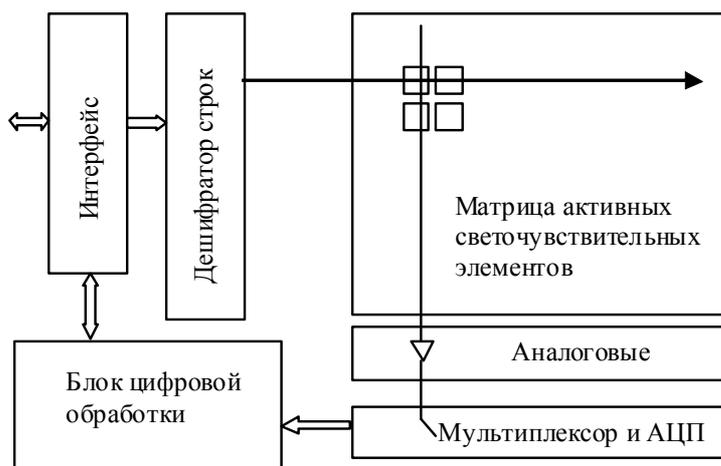


Рис. 6.10. Структурная схема КМОП-фотоприемника.

Современные фоточувствительные КМОП-микросхемы содержат матрицу активных фоточувствительных элементов (активных пикселей, рис. 9.9.), схемы управления, аналоговые усилители считывания на выходе каждого столбца, мультиплексор, АЦП, блок цифровой обработки и ряд других цифровых блоков (рис.6.10). Представленная микросхема представляет практически собой однокристалльную цифровую камеру. В таких КМОП-матрицах схемы управления могут реализовывать

произвольную координатную выборку сигналов, что значительно расширяет возможности фильтрации и обработки (в том числе параллельной) сигналов изображения.

Другая особенность КМОП-фотопремников связана с возможностью параллельного считывания элементов каждого столбца с их последующей цифровой обработкой. В этом случае количество АЦП будет соответствовать количеству столбцов, например, в КМОП-фотопремнике типа MT9M413 используется 1280 10-разрядных АЦП. Блок цифровой обработки для КМОП-микросхеме можно рассматривать как процессор, который выполняет алгоритмы параллельной потоковой обработки сигналов уровня столбцов – строк. Все вопросы алгоритмизации и построения параллельных систем обработки сигналов применимы и для реализации такого процессора.

В настоящее время ведущие фирмы по разработке КМОП-микросхем MIT, Sony, Mitsubishi предлагают следующие алгоритмы обработки сигналов: параллельное межкадровое вычитание (выделение изменяющихся фрагментов изображения); параллельное вычитание сигналов соседних пикселей (выделение контуров на изображении); нейронная сеть персептронов (искусственное зрение) и др.

КМОП-фотопремники можно разделить на два типа: приемники с внутрикристальным процессором, позволяющим программировать различные задачи обработки изображения, и приемники с обработкой сигналов в каждом активном элементе. Примеры КМОП-ФД первого типа – фотоприемные СБИС фирм Cypress, Micron-Aptina, Toshiba и др. Процессор фотоприемника фирмы Cypress (выпускается с 2008г.) содержит 1280 x 1024 активных элементов. Он позволяет задавать размеры и расположение зоны наблюдения, частоту кадров, время экспозиции, коэффициент усиления выходного сигнала, имеет 12 встроенных LVDS-

портов.

Обработка сигналов в каждом активном элементе позволяет получать высокое отношение сигнал/шум, малую потребляемую мощность и обрабатывать изображение в процессе его интегрирования. Однако достигается это за счет увеличения числа транзисторов в элементе и, следовательно, занимаемой ими площади. В результате уменьшается фактор заполнения сенсорного поля (Fill Factor) и снижается фоточувствительность приемника. В фирме Silicon Architects (США) уже реализованы опытные образцы КМОП-фотоприемников второго типа с форматом 640x512 элементов и последовательным многоканальным АЦП в каждом элементе.

Фотоприемники на ПЗС и КМОП имеют свои достоинства и недостатки [6]. Перечислим основные преимущества КМОП-камер.

- Единство технологии с остальными, цифровыми элементами аппаратуры. Это приводит к возможности объединения на одном кристалле аналоговой и цифровой части, что послужило основой для создания миниатюрных встраиваемых камер для самого разного оборудования и снижения их стоимости.

- Низкое энергопотребление в статическом состоянии. Это позволяет применять такие матрицы в составе энергонезависимых устройств, например, в датчиках движения и системах наблюдения, находящихся большую часть времени в режиме «сна» или «ожидания события».

- Высокая скорость считывания данных с возможностью программирования операций по обработке сигналов изображения. В частности, можно быстро считывать только малую часть пикселей.

- Цифровое управление. Для управления ФПЗС требуются в большинстве случаев сигналы аналогового управления, например для

Texas Instruments ФПЗС матриц уровни управляющих сигналов составляют $-2 - +10\text{В}$.

Основные недостатки:

- В ФПЗС фоточувствительная область занимает большую часть площади активного элемента (в специальных структурах всю его площадь). Поэтому отношение площади фоточувствительной области к полной площади элемента, или фактор заполнения FF , может достигать 100%. В КМОП-фотоприемниках фоточувствительная область занимает лишь часть площади фоточувствительного элемента, тогда как остальная площадь занята шинами и КМОП-транзисторами. Поэтому фактор заполнения и фоточувствительность КМОП-фотоприемниках значительно ниже (30–35%), чем у ФПЗС. Для повышения фоточувствительности используются микролинзы (технология, освоенная ранее для ФПЗС), которые фокусируют большую часть падающего света на фотоприемник. При перпендикулярном направлении падающего света это позволяет повысить FF до 80%. Однако для света, падающего под другими углами, эффективность применения микролинз резко падает, и реальное значение FF составляет лишь 45–50%.

- Основные недостатки КМОП-фотоприемников – высокий геометрический шум, обусловленный тем, что активный элемент содержит несколько МОП-транзисторов и несколько шин; низкая фоточувствительность, более высокий темновой ток, большие размеры активного элемента, меньшая, чем у ФПЗС, разрешающая способность.

Сравнение показывает что, высокоточные системы технического зрения, астрономическое, медицинское и биологическое оборудование следует строить на основе ФПЗС. Для ОЭ-процессоров можно использовать оба типа фотоприемников, но для большинства задач предпочтительнее ПЗС-фотоприемники, прежде всего благодаря их

большей равномерности чувствительности и динамическому диапазону.

Цветные ПЗС-фотоприемники

Для регистрации цветных изображений используются специальные фотоприемники. Они имеют над каждым элементом светофильтр и микролинзу. Схема расположения фильтров Байера и ПЗС-фотоприемника приведена на рис.6.11. При интерполяции обрабатывается матрица пикселей размером 3 x 3 пиксела.

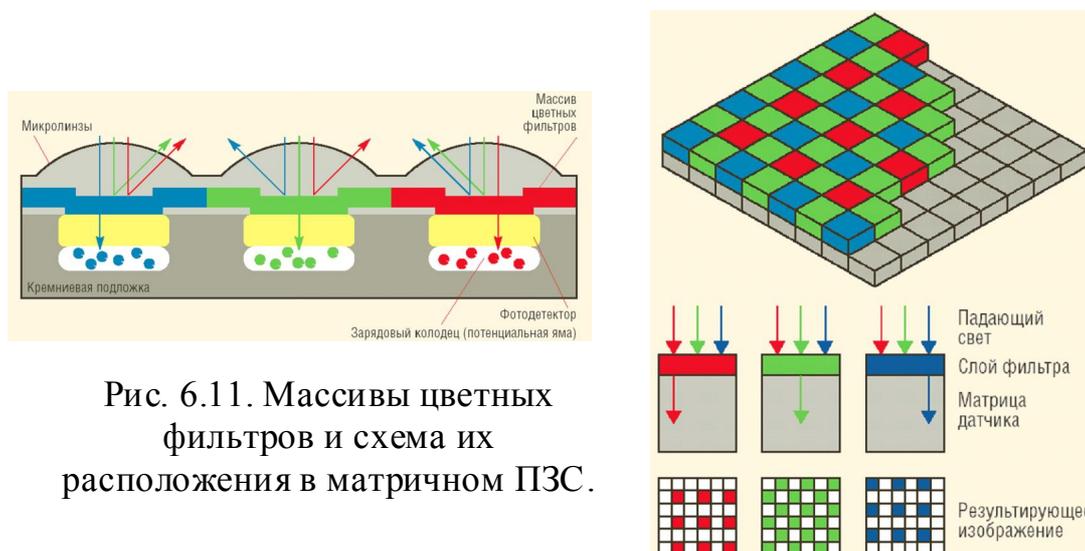


Рис. 6.11. Массивы цветных фильтров и схема их расположения в матричном ПЗС.

Возможности по дополнительной обработке информации в ПЗС-фотоприемниках

ПЗС-фотоприемники кроме поэлементного преобразования свет - сигнал позволяют выполнять и дополнительную обработку сигналов на самом кристалле. Дополнительная обработка возможна на каждом из этапов преобразования. Можно выделить четыре этапа преобразования фотонного потока в выходной сигнал (рис. 6.12): детектирование, накопление зарядов, перенос зарядовых пакетов в сторону выходного устройства и преобразование заряда в напряжение. Работа ФПЗС происходит под управлением внешнего генератора тактовых управляющих сигналов или ПЗС-контроллера.

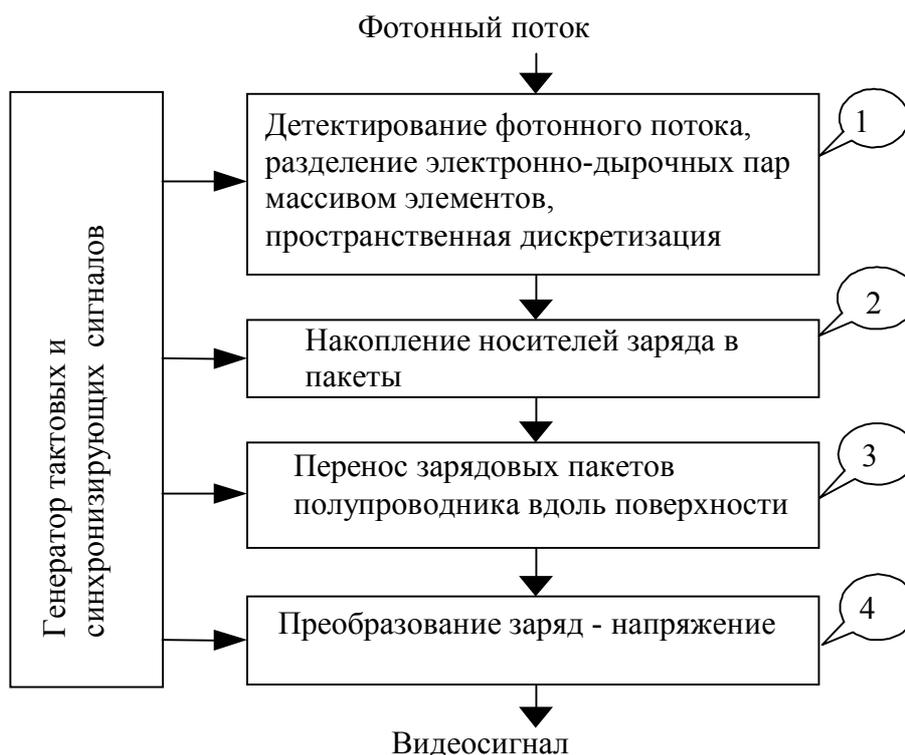


Рис. 6.12. Этапы преобразования сигналов в ФПЗС.

ПЗС-фотоприемник в отличие от КМОП-фотоприемника более открыт для управления его сенсорным полем. Для большинства ФПЗС-микросхем сигналы управления ПЗС-структурами выведены на контакты микросхем. В результате ПЗС-фотоприемники доступны для организации различных алгоритмов обработки сигналов.

Для разработки и применения алгоритмов обработки необходимо знать те возможности, которые предоставляют элементы и узлы ФПЗС на каждом этапе преобразования сигналов.

На этапе детектирования фотонного потока происходит генерация элементарных носителей электронов или дырок и пространственная дискретизация. За счет управления напряжениями на фазных электродах возможно переключение центров накопления зарядов внутри пикселей, что позволяет управлять пространственным разрешением фотоприемника при обработке изображения нескольких кадров. На рис. 6.1. показана

трехфазная структура электродов при накоплении зарядов под электродом второй фазы Φ_2 . Если в следующем кадре потенциальную яму сформировать под электродом первой фазы Φ_1 , то получаем двукратное повышение разрешения. Максимальное количество центров накопления позволяют получить 4-х фазные ПЗС-структуры.

В процессе переноса зарядовых пакетов возможно их накопление. Такой режим получил название временной задержки и накопления (ВЗН) или накопление при сдвиге (Time Delay and Integretion TDI). Режим предназначен для регистрации движущихся изображений. Скорость перемещения изображения, проецируемого на фотоприемник, должна совпадать со скоростью перемещения зарядовых пакетов в ФПЗС при этом каждый элемент изображения даёт вклад в один и тот же зарядовый пакет. ВЗН-режим позволяет увеличить отношение сигнал шум (в корень из «строк» раз) и повысить временное разрешение принимаемого оптического сигнала. Известны специальные ПЗС-приборы - ВЗН матрицы, которые позволяют реализовать описанный режим.

Первоначально ВЗН-матрицы были использованы в системах наблюдения земной поверхности из космоса, затем они стали широко применяться в астрономии. Они позволяли при неподвижном телескопе отслеживать электронным образом движение изображения из-за вращения Земли.

В настоящее время ряд фирм за рубежом и в нашей стране выпускают ВЗН-матрицы. Можно выделить два типа приборов: а) с одной секцией и возможностью вывода зарядов в две стороны (реверсивный перенос) и б) с несколькими секциями (рис. 6.13.). Лидером по разработкам и выпуску приборов первого типа является фирма Hamamatsu. Фирма выпускает приборы, состоящие из нескольких ВЗН-полей. В ФПЗС типа S10200-02 таких полей два, а ФПЗС S10202-16 имеет 16 полей. Все ВЗН-ФПЗС

используют обратную засветку и имеют высокую квантовую эффективность (до 90%). Приборы имеют средние значения динамического диапазона - 1000 и шумов считывания – 100 электронов (30 МГц частота вывода).

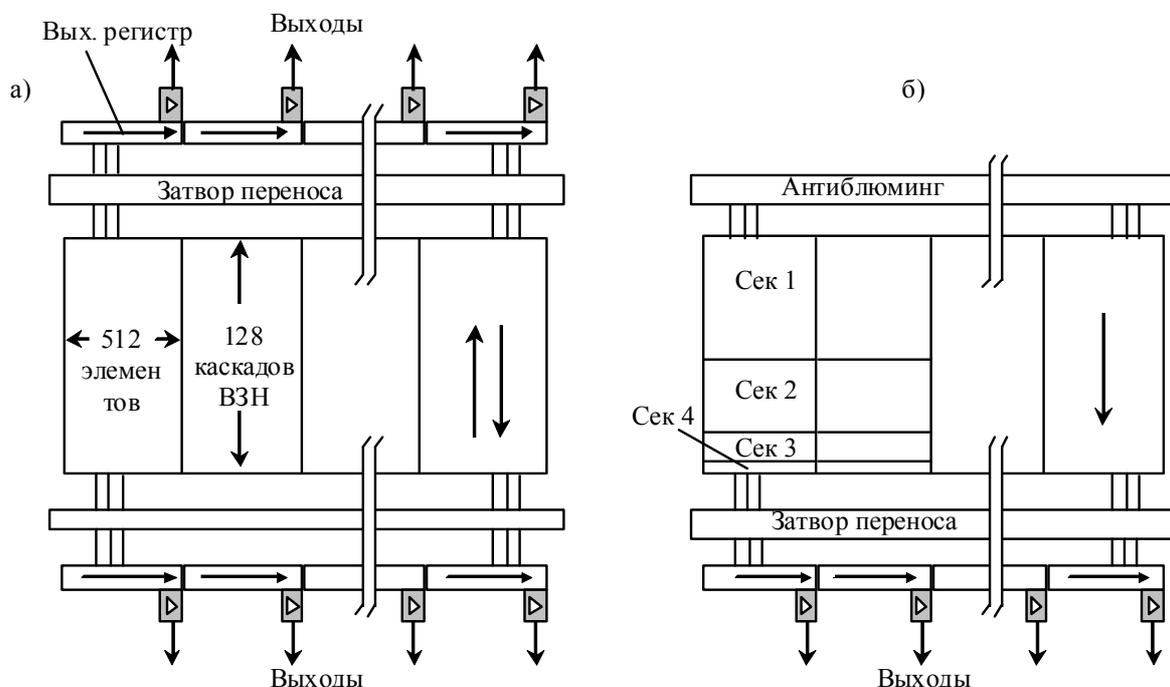


Рис. 6.13. Структурные схемы ВЗН-ФПЗС двух типов а) реверсивного (S10202-16, 4098x128) и б) секционного (CCD 21241, 24000x64)

Фирмы Fairchild Imaging и Dalsa выпускают многосекционные ВЗН-ФПЗС. Так ФПЗС CCD 10121-8 имеет 7 секций 4, 8, 16, 32, 64, 96, 128 строк в каждой. Секции разделены специальным затвором, который отключает секцию. Заряды из отключенной секции уже не участвуют в формировании итогового зарядового пакета, за счет чего исключается переполнение ПЗС-ячеек. В зависимости от текущего уровня сигнала можно выбрать оптимальное число шагов накопления. В результате за счет разбиения всего сенсорного поля на секции можно управлять чувствительностью ФПЗС.

Узел антиблоринговой защиты является важным элементом современных фотоприемников. Он применяется и для линейных, и для

матричных ФПЗС. Антиблэинг обеспечивает сброс излишнего заряда в подложку. Он позволяет организовать режим электронного затвора для управления чувствительностью ФПЗС.

На третьем этапе преобразования в ФПЗС, этапе переноса зарядовых пакетов, возможно сбрасывание некоторых пакетов в подложку и объединение зарядов. Объединение (суммирование) нескольких следующих друг за другом зарядовых пакетов или строк зарядовых пакетов (binning) можно проводить в выходном узле или в регистре.

На четвертом этапе преобразования в выходном узле ФПЗС можно проводить следующие операции по обработке сигнала: суммирование зарядовых пакетов, дифференцирование и умножение электронов (зарядов). Для суммирования зарядов используется выходное устройство с диффузионной областью. При каждом переносе зарядового пакета в диффузионную область потенциал ее увеличивается. По окончании суммирования n зарядовых пакетов заряд диффузионной области сбрасывается. Для дифференцирования используется выходное устройство с плавающим затвором, в котором формируются поэлементные разности зарядовых пакетов. Для применения указанных возможностей необходимо управлять порядком следования импульсов на затворах сброса и вывода ФПЗС.

В выходном узле можно осуществлять операцию по умножению электронов в зарядовом пакете (electron multiplying charge). Для этой цели разработаны специальные фотоприемники. Они по сокращению английских терминов получили название Electron Multiplying Charge Coupled Device - EMCCD (www.emccd.com). Данная операция предназначена для выделения слабых сигналов - ниже собственных шумов ПЗС. За счет электронного умножения удается почти на порядок поднять динамический диапазон ФПЗС. Особенно это важно для инфракрасных

фотоприемников, у которых собственные шумы выше, чем 100 электронов. ФПЗС с электронным умножением выпускает фирма Texas Instruments [6].

На рис. 6.14 показана схема фотоприемника с выделенным регистром умножения. В регистре происходит умножение неосновных носителей (электронов) за счет того, что они падают в глубокую потенциальную яму и в процессе падения порождают новые носители. Глубокие потенциальные ямы появляются при подаче фазных напряжений до 40-60 В. ФПЗС с электронным умножением выпускает фирма Texas Instruments. Так фотоприемник TC285 имеет 1004x1002 элементов. Регистр умножения содержит 400 элементов, и напряжение его фазных электродов составляет 25 В.

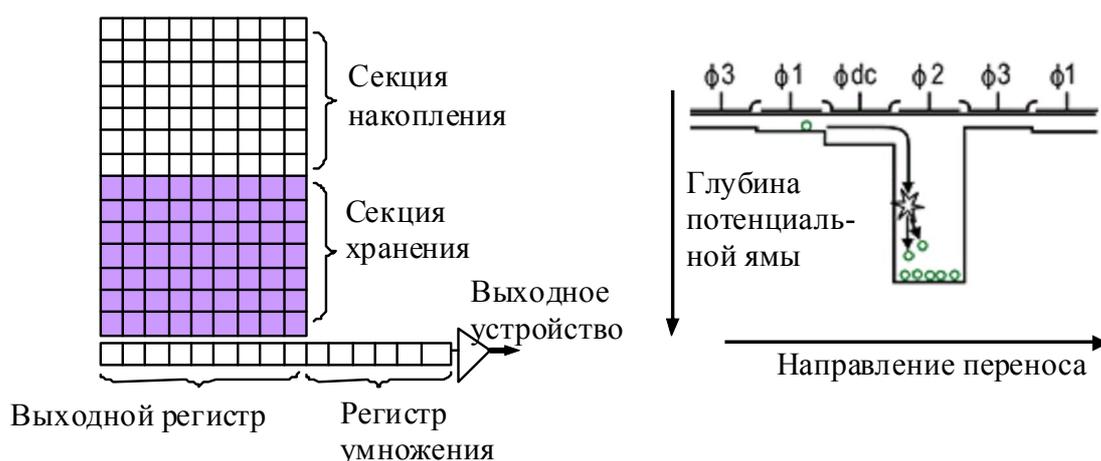


Рис. 6.14. Структурная схема ФПЗС и схема умножения заряда.

ПЗС-фотоприемники могут иметь узлы электрического ввода зарядов. Ввод заряда, пропорционального подаваемому на входной управляющий электрод напряжению, может быть использован для суммирования электрического и оптического сигнала, для обработки видеосигналов, соответствующих регистрируемым оптическим распределениям. Если соединить выход фотоприемника с узлом электрического ввода через масштабирующий усилитель и организовать рециркуляцию сигнала, то можно выполнять такие операции как запоминание и многократное

считывание, детектирование перемещений, компенсации неоднородностей темнового тока.

Современные технологии позволяют изготавливать ПЗС-фотоприемники любой геометрии, с различными элементами, расположенными на кристалле. Создаются гибридные фотоприемники, объединяющие ПЗС и КМОП элементы, по такому пути ведут разработки в швейцарском центре CSEM - Swiss Center for Electronics and Microtechnology. Отдельные элементы и сами фотоприемники, выполняющие разные операции над сигналом, получили название умные - smart.

Некоторые параметры ПЗС-фотоприемников

1. **Темновой ток** - это результат спонтанной генерации электронно-дырочных пар при уменьшении температуры на каждые 7-8 градусов он уменьшается вдвое. **Максимальное время накопления** - 10-100 секунд.

2. **Квантовая эффективность** (Quantum efficiency - QE) - отношению числа фотонов, поглощение которых вызвало образование неосновных носителей, к общему числу поглощенных фотонов. У ПЗС она может достигать 90 % для некоторых длин волны.

3. Спектральная чувствительность

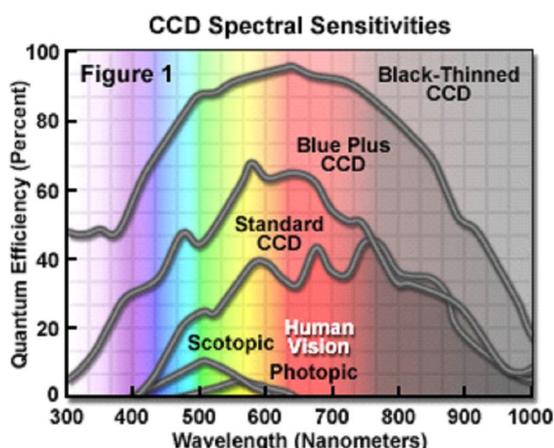


Рис. 6.15. Квантовая эффективность ФПЗС в зависимости от длины волны.

2. **Неоднородность чувствительности** обычно не превышает 1-5%
3. Потери при переносах.
4. Выбитые (нечувствительные и «горячие») элементы.
5. Интервалы между светочувствительными элементами.
6. **Шумы в выходном сигнале ФПЗС.**

Шумы фотоприемника определяют его динамический диапазон.

Поэтому важно рассмотреть составляющие шумов.

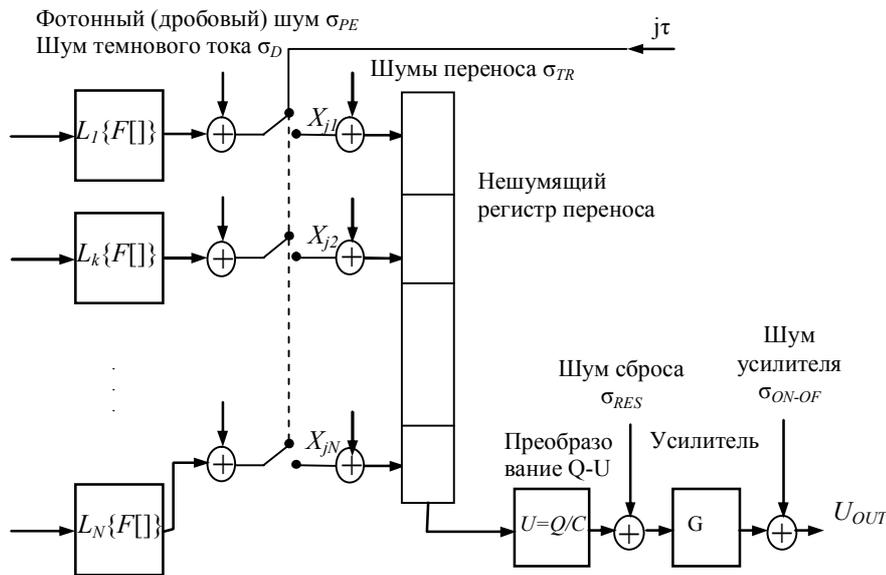


Рис. 6.16. Модель ФПЗС с указанием источников шумов.

В схеме рис.6.16. показаны следующие источники шумов: дробовой шум σ_{PE} , шум темнового тока σ_D , шум переноса зарядовых пакетов σ_{TR} , шум выходного узла (kTC – шум) σ_{RES} , собственный шум усилителя на кристалле ФПЗС и внешнего усилителя σ_{ON-OFF} .

Определим приведенный к входу усилителя суммарный шум в виде:

$$\sigma_Y^2 = \sigma_{PE}^2 + \sigma_D^2 + \sigma_{TR}^2 + \sigma_{OUT}^2,$$

где шум считывания определяется выражением $\sigma_{OUT}^2 = \sigma_{RES}^2 + \sigma_{ON-OFF}^2$.

Фотонный шум. Является следствием дискретной природы света. Любой дискретный процесс подчиняется закону (статистике) Пуассона. Поток фотонов (S — количество фотонов, падающих на

светочувствительную часть приемника за единицу времени) так же следует этой статистике. Согласно ей, фотонный шум равен \sqrt{S} .

Шум темнового сигнала. Если на вход ФПЗС не подавать световой сигнал (например, плотно закрыть светонепроницаемой крышкой объектив видеокамеры), то на выходе системы получим так называемые “темновые” кадры. Основной составляющей темнового сигнала является термоэлектронная эмиссия. Чем ниже температура, тем ниже и темновой сигнал. Термоэлектронная эмиссия также подчиняется статистике Пуассона и её шум равен: $\sqrt{N_t}$, где N_t — число термически сгенерированных электронов в общем сигнале.

Шум сброса определяется выражением (Reset Noise) (кТС-шум):

$$\sigma_{RES} = \frac{\sqrt{kTC_0}}{q},$$

где q — заряд электрона и k — постоянная Больцмана. вычисляется по формул. Для типичного значения ёмкости C , равной 0.1 пф, при комнатной температуре СКО шума сброса составляет около $130 e_0$. Для ФПЗС Hamamatsu S9840 шум считывания σ_{RES} составляет $25 e_0$. Тепловой шум может быть значительно снижен при использовании двойной коррелированной выборки, при уменьшении емкости выходного узла и при охлаждении фотоприемника. В современных ФПЗС емкость выходного узла снижают до величины 0,01 пФ и при охлаждении шум сброса достигает единиц электронов.

Шум накристального и внешнего усилителей (output amplifier noise) σ_{ON-OFF} содержит две составляющие: **белый шум** и **фликер шум** ($1/f$ шум) (white and a $1/f$ -noise). У фликер шума спектральная плотность мощности растет в области низких частот. Белый или тепловой шум имеет равномерный спектр. Перечисленные составляющие показаны на рис.6.17.б и в.

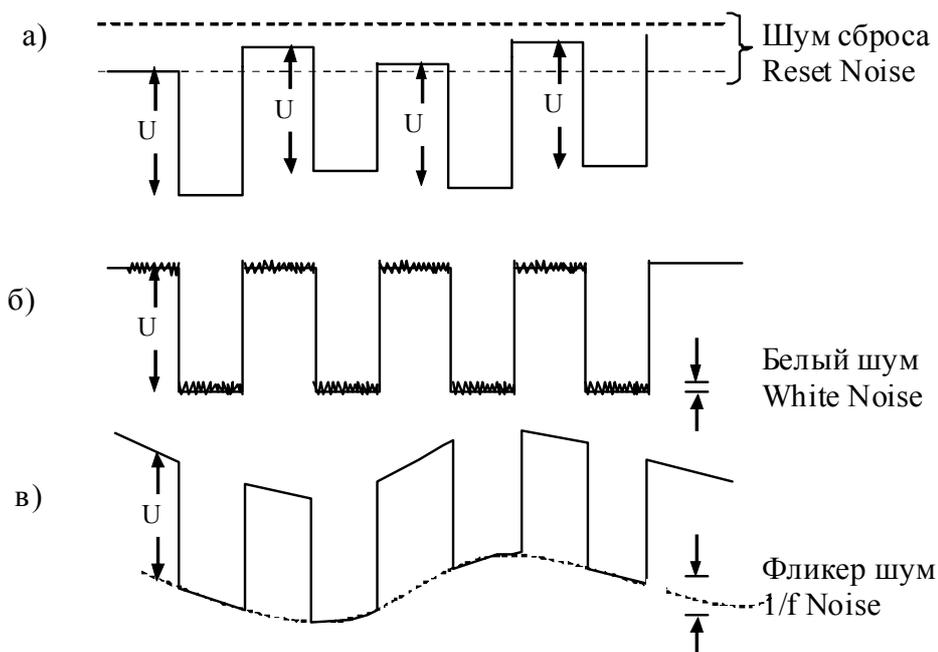


Рис. 6.17. Шумы в выходном сигнале с ФПЗС.

Параметр, описывающий относительную величину шума, как было сказано выше, называется отношением сигнал/шум (S/N) и измеряется в децибелах.

$$S/N = 20 \times \log(\langle \text{видеосигнал} \rangle / \langle \text{шум} \rangle)$$

Например, сигнал/шум, равный 60 дБ, означает, что сигнал в 1000 раз больше шума.

Динамический диапазон — это отношение максимально возможного сигнала, сформированного фотоприемником, к его собственному шуму. Для ПЗС этот параметр определяется как отношение наибольшего зарядового пакета, который может быть накоплен в пикселе к шуму считывания. Чем больше размер пиксела ПЗС, тем больше электронов может удерживаться в нем. Для разных типов ПЗС эта величина составляет от 75000 до 500000 и выше. При $10 e_0$ динамический диапазон ПЗС достигает значения 50000.

Глава 7. Оптические волноводы.

Оптическое волокно - нить из оптически прозрачного материала (стекло, пластик), используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения.

Основы организации оптических волноводов

Оптический волновод - направляющая структура, обеспечивающая распространение света вдоль нее. Типы: планарные оптические волноводы и двухслойные волокна.

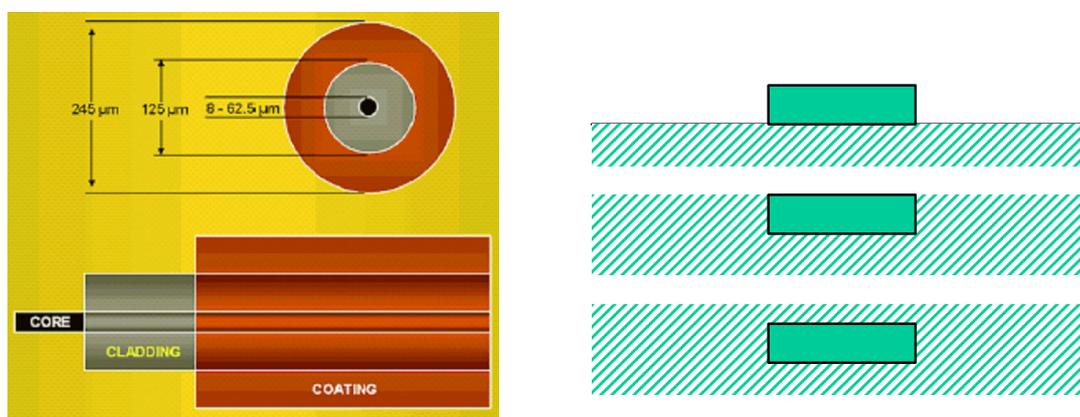


Рис. 7.1. Структура оптического волокна и планарные волноводы: возвышающаяся полоска, погруженная полоска, утопленная полоска.

Оптическое волокно, как правило, имеет круглое сечение и состоит из двух частей — сердцевины и оболочки (рис. 7.1.). Для обеспечения полного внутреннего отражения абсолютный показатель преломления сердцевины несколько выше показателя преломления оболочки. Например, если показатель преломления оболочки равен 1,474, то показатель преломления сердцевины — 1,479. Луч света, направленный в сердцевину, будет распространяться по ней. Возможны и более сложные конструкции: в качестве сердцевины и оболочки могут применяться двумерные фотонные кристаллы, вместо ступенчатого изменения показателя преломления часто используются волокна с градиентным профилем

показателя преломления, форма сердцевины может отличаться от цилиндрической. Такие конструкции обеспечивают волокнам специальные свойства: удержание поляризации распространяющегося света, снижение потерь, изменение дисперсии волокна и др.

Классификация

Оптические волокна могут быть одномодовыми и многомодовыми (рис. 7.2). *Мода* - разновидность волны в волноводе. Диаметр сердцевины одномодовых волокон составляет от 7 до 10 микрон (рис. 7.3).. Благодаря малому диаметру достигается передача по волокну лишь одной моды электромагнитного излучения, за счёт чего исключается влияние дисперсионных искажений.

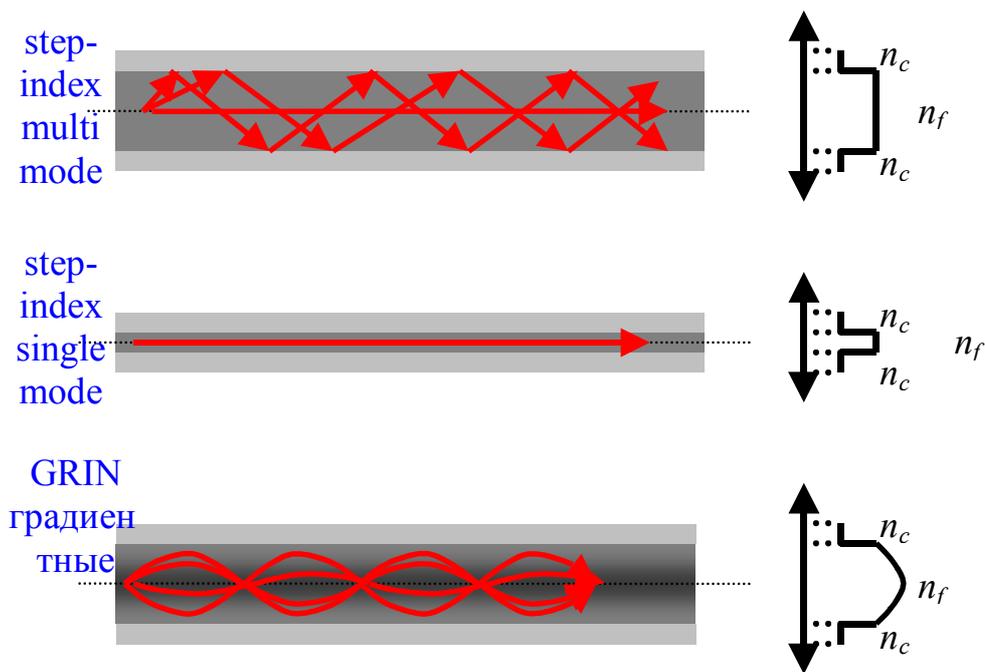


Рис. 7.2. Профиль показателя преломления различных типов оптических волокон: одномодовое волокно, многомодовое ступенчатое волокно, градиентное волокно с параболическим профилем.

Существует три основных типа одномодовых волокон. В большинстве оптических систем связи применяется одномодовое ступенчатое волокно с

несмещённой дисперсией (стандартное) (англ. SMF — Step Index Single Mode Fiber).

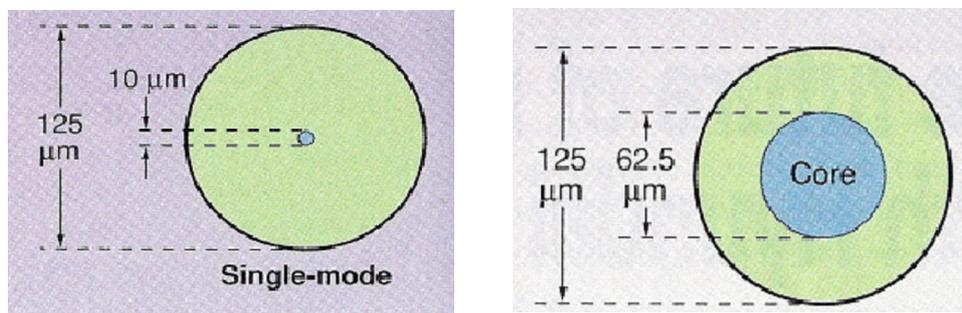


Рис. 7.3. Диаметр сердцевины волокон.

Многомодовые волокна отличаются от одномодовых диаметром сердцевины, который составляет 50 микрон в европейском стандарте и 62,5 микрон в североамериканском и японском стандартах. Из-за большого диаметра сердцевины по многомодовому волокну распространяется несколько мод излучения — каждая под своим углом, из-за чего импульс света испытывает дисперсионные искажения и из прямоугольного превращается в колоколоподобный.

Число распространяющихся мод при данной длине волны ограничено и определяется размерами волновода (радиусом сердцевины) и разностью показателей преломления:

$$N = \frac{2\pi^2 R_c}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2)$$

Числовая апертура NA определяет условия ввода оптических сигналов и процессы их распространения в волокне. Она связана с максимальным углом α вводимого в волокно излучения из свободного пространства, при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну.

$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Нормированная частота V определяет число мод, распространяющихся в волноводе

$$V = \frac{2\pi R_c}{\lambda} NA$$

где λ — длина волны, мкм.

Если $0 < V < 2,405$, то режим работы волокна одномодовый, если $V > 2,405$ — многомодовый. Чем меньше диаметр сердцевины волокна, тем меньшее число мод может распространяться по нему и тем меньшее расширение получают оптические импульсы. Соответственно увеличивается коэффициент широкополосности волокна. Таким образом, одномодовое (ОМВ, англ. SMF – single mode fibre) может передавать более широкополосные сигналы, чем многомодовое (ММВ, англ. MMF – multi mode fibre).

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые и градиентные. В ступенчатых волокнах показатель преломления от оболочки к сердцевине изменяется скачкообразно. В градиентных волокнах это изменение происходит иначе — показатель преломления сердцевины плавно возрастает от края к центру. Это приводит к явлению рефракции в сердцевине, благодаря чему снижается влияние дисперсии на искажение оптического импульса. Профиль показателя преломления градиентного волокна может быть параболическим, треугольным, ломаным и т. д.

Некоторые замечания:

1. Большой размер сердцевины требует малого изменения показателя преломления Δn , что облегчает ввод основной (фундаментальной) моды, но волокно слабо направляет моду и чувствительно к нерегулярностям Δn .

2. Большое Δn позволяет иметь тонкие волокна, но возникают трудности при сращивании.

$R_c = 5$ мкм, $\Delta n = 0.003$, лотсечки=1.225 мкм

3. Потери минимальны при $V=2,2$. В этом случае в оболочке оказывается до 20% оптической мощности. Толщина оболочки должна на порядок превышать радиус сердцевины.

4. У градиентных волокон проще ввод излучения и сращивание, но существенна межмодовая дисперсия за счет разной скорости распространения (вводим моды одновременно, а приходят в разные моменты времени). Время прохождения мод могут быть уравнены путем создания Δn близкого к параболическому закону.

Потери при распространении

Лауреат Нобелевской премии по физике за 2009 г. стал китайско-британский ученый Чарльз Као. Ч.Као работает в британской Standard Telecommunication Laboratories (STL). В 1966г. совместно с Джорджем Хокхамом ему удалось достичь показателя потерь в оптоволокне ниже 20 дБ/км благодаря очистке стекла, что сделало оптоволокно пригодным для коммерческого использования. В настоящее время потери при распространении соответствуют 0.1 - 0.2 дБ/км.

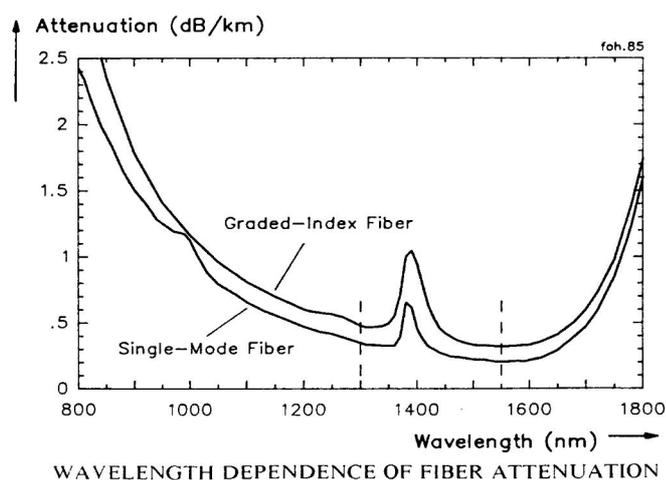


Рис. 7.4. Зависимость затухания от длины волны.

Дисперсия при распространении

Импульсы света, последовательность которых определяет информационный поток, при распространении по волокну расплываются. Расплывание импульса приводит к перекрытию крыльев соседних импульсов, как изображено на рис. 3.15. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приёме. Вследствие этого импульсы трудно отличить один от другого, а заключенная в них информация теряется.

Дисперсия - это расплывание светового импульса по мере его движения по оптическому волокну. Дисперсия ограничивает ширину полосы пропускания и информационную емкость кабеля. Уменьшение дисперсии приводит к увеличению полосы пропускания.

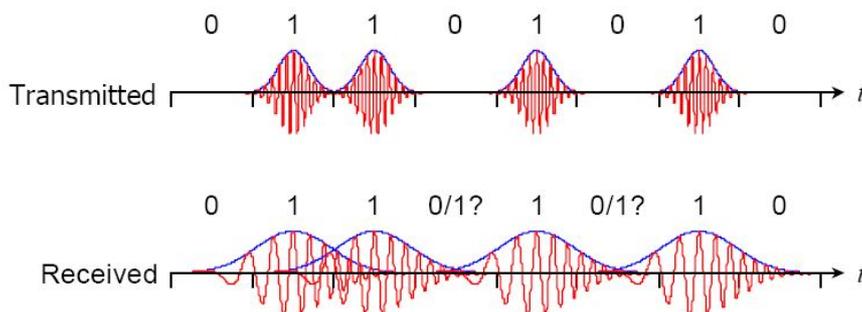


Рис. 7.5. Искажения формы импульсов из-за дисперсии.

Виды дисперсий:

Материальная дисперсия - определяется свойствами материала и зависимостью скорости оптического излучения от длины волны.

Волноводная дисперсия - направляющие свойства оптической структуры. Волноводная (внутримодовая) дисперсия обусловлена процессами внутри моды. Внутримодовая дисперсия, в первую очередь, определяется профилем показателя преломления волокна и пропорциональна ширине спектра излучения источника $\Delta\lambda$.

Межмодовая дисперсия - различие скоростей распространения направляемых мод. Межмодовая дисперсия свойственна только многомодовым волокнам. Различные моды имеют различные фазовые и групповые скорости и их максимумы энергии достигают детектор в различные моменты времени. Лучи проходят различные пути и, следовательно, достигают противоположного конца волокна в различные моменты времени.

Поляризационная дисперсия - различие скоростей распространения разнополяризованных мод (рис. 7.6).

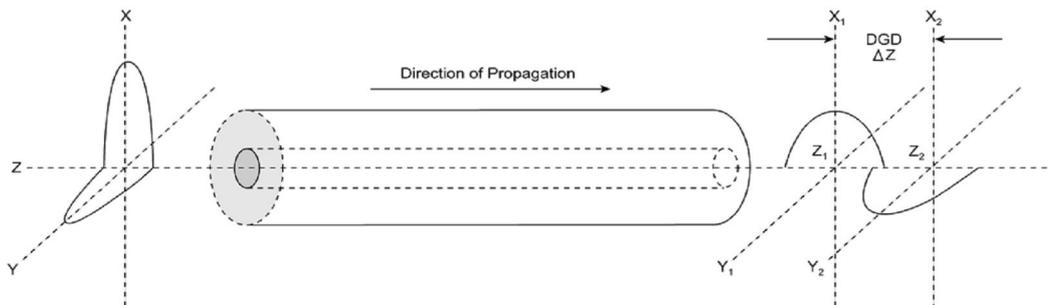


Рис. 7.6. Схема механизма поляризационной дисперсии.

Спектральное мультиплексирование

Мультиплексоры/демультиплексоры WDM (Wavelength Division Multiplexing) — полностью пассивные устройства, обеспечивающие объединение и разделение нескольких сигналов. WDM позволяет передавать по одному оптоволокну до 8 и более сигналов из диапазона C-band с длинами волны 1470 нм, 1490 нм, 1510 нм, 1530 нм, 1550 нм, 1570 нм, 1590 нм и 1610 нм. Все сигналы расположены вокруг длины волны 1550 нм — области минимальных потерь при передаче света в одномодовом оптоволоконном кабеле.

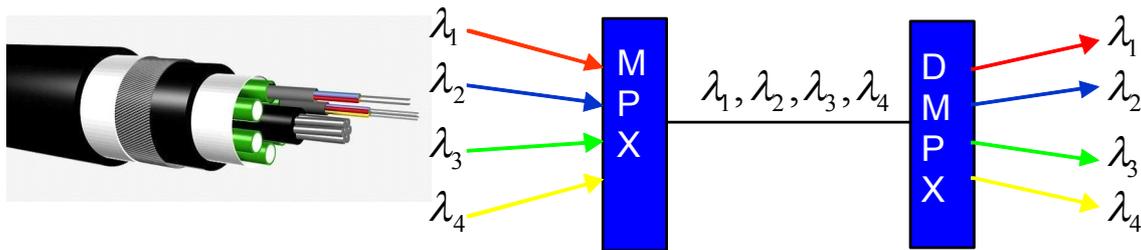


Рис. 7.6. Кабель и схема спектрального мультиплексирования.

Табл. 7.1. Диапазоны длин волн.

<i>Band</i>	<i>Wavelength (nm)</i>
<i>O</i>	1260 – 1360
<i>E</i>	1360 – 1460
<i>S</i>	1460 – 1530
<i>C</i>	1530 – 1565
<i>L</i>	1565 – 1625
<i>U</i>	1625 – 1675

Волоконно-оптические шайбы

Волоконно-оптические шайбы (пластины - Fiber Optic Plate) используется для передачи изображения без использования линз. Они состоят из большого количества оптических волокон, сгруппированы вместе. Сужение волокон (конические волоконно-оптические пластины - Tapered fiber optic plate) позволяет проводить либо увеличение или уменьшение изображения.



Гибридная микросхема с использованием волоконно-оптических шайб

Гибридная микросхема вектор-матричного перемножителя (рис. 7.8). включает одинакового размера элементы: линейку светоизлучающих

диодов (СИД), транспарант, матричный ФПЗС, а также световолоконные шайбы, обеспечивающие соединение элементов.

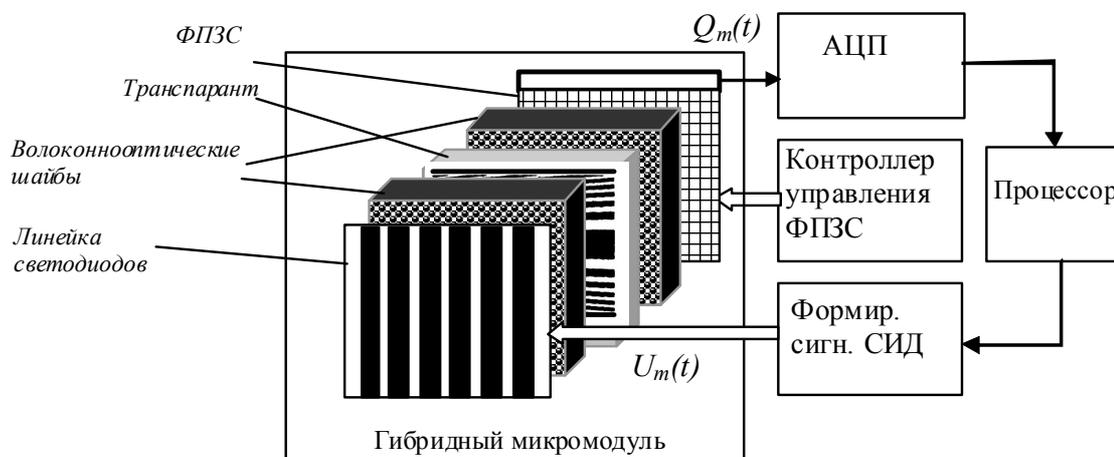


Рис. 7.8. Структурная схема гибридной микросхемы и ее обрaмления.

Каждый элемент линейки светоизлучающих диодов имеет вытянутую ленточную форму, с индивидуальным управлением. Средний слой представляет собой маску с опорными функциями (френелевскую маску), а матричный ФПЗС работает по способу ВЗН. Слой маски изготавливается из диэлектрического материала, обеспечивающего отсутствие контакта между электродами на кристаллах излучателя и фотоприемника. Ленточный СИД равномерно засвечивает весь столбец ФПЗС через соответствующую часть маски. ФПЗС интегрирует поступающий сигнал по N импульсам, сдвигая в выходной регистр после каждого такта строку формируемого изображения. Световолоконные шайбы переносят изображение из плоскости входных торцов в плоскость выходных торцов. Они выполняют функции отображающих каскадов и обеспечивают жесткое соединение отдельных слоев гибридной микросхемы. При необходимости световолоконные шайбы позволяют изменять масштаб изображений. Световолоконные шайбы в том числе с изменением

масштаба, состоящие из конических волокон, выпускают американские фирмы Incom и Princeton Instruments.

Для работы микросхемы необходимы дополнительные элементы. Формирователь сигналов для линейки СИД должен содержать буферные регистры и усилители сигналов для каждого светодиода. Контроллер управления ФПЗС обеспечивает формирование необходимых сигналов для работы фотоприемника в режиме ВЗН. Сигнал с ФПЗС через АЦП и промежуточный интерфейс поступает в процессор или ЭВМ.

Светодиоды в линейке СИД ориентированы вдоль столбцов матрицы ФПЗС. Они засвечивают каждый свой столбец. Входной сигнал поступает одновременно на все светодиоды.

Для исследований микромодуля в СПбГПУ (Центр оптоэлектронных проблем информатики) был разработан макет, который включал многоэлементный светоизлучатель СИД с 64-мя ленточными диодами с размерами 31x7600 мкм, расположенных с шагом 63 мкм и длиной волны излучения $\lambda=0,6$ мкм. Маска представляет собой часть зонной пластинки Френеля и изготовлена на фотопленке с высоким разрешением. Волоконная шайба была выполнена в виде плоскопараллельной пластины из волокон диаметром 6 мкм, расположенных упорядоченно в гексагональной упаковке, при длине волокон (толщине шайбы) 2,5 мм. Матричный фотоприемник имел 264 столбца по 290 элементов. В разработанном макете обрабатывались сигналы вида:

$$U_m(n) = \begin{cases} 0.5 \{ 1 + A \cos[\beta_m (n - n_0)^2] \}, & |n - n_0| \leq N/2 \\ 0.5, & |n - n_0| > N/2 \end{cases}, \quad (7.1)$$

где $A < 1$ – глубина модуляции; n – номер отсчета; n_0 – номер отсчета, соответствующего середине сигнала; β_m – коэффициент, зависящий от номера m канала. На рис. 7.9.а показан тестовый входной сигнал длительностью $N=290$ отсчетов с $m=17$ ($\beta_m = 2.24 \cdot 10^{-3}$). На рис. 7.9.б

показано изменение коэффициента пропускания маски по каналу (в макете использовалась спадающая к краям засветка). На рис. 7.9.в представлен выходной сигнал процессора для рассматриваемого канала.

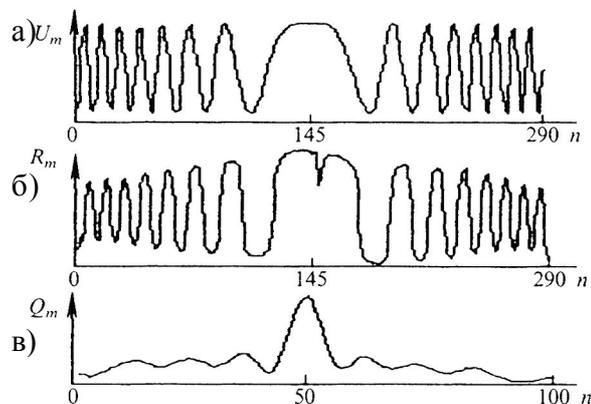


Рис. 7.9. Входной сигнал (а), сигнал маски (б) и выходной сигнал (в) одного канала микросхемы.

Глава 8. Транспаранты

Транспарант - тонкая пластинка, обладающая в разных точках плоскости, на которую падает световой луч, различной поглощательной способностью или показателем преломления. При прохождении плоской световой волны через транспарант происходит амплитудная или фазовая модуляция сигнала на выходе транспаранта; используется в системах оптич. обработки информации.

Акустооптический модулятор - устройство для изменения интенсивности пропускаемого света, вследствие его дифракции на решётке, образуемой в стекле в результате пространственной модуляции показателя преломления акустической волной.

Брэгговская дифракция - явление сильного рассеяния волн на периодической решётке рассеивателей при определенных углах падения и длинах волн.

Методы модуляции света

1. Магнитооптический. Эффект Фарадея – в намагниченном веществе меняется показатель преломления .
2. Электрооптический. Эффекты Керра и Погкельса - показатель преломления меняется под действием электрического поля. Жидкие кристаллы, Сегнетокерамика.
3. Тепловой. Магнитные пленки, Испарение слоев.
4. Фотохимический. Щелочногалоидные кристаллы, Фотохромные вещества.
5. Акустооптический. Показатель преломления меняется под действием упругих напряжений (ультразвуковая волна).
6. Рельефная запись. Термопластическая, Фотопластическая ...

7. Матрица элементов (зеркала, линзы), формирующих изображение. MEMS - Microelectromechanical Systems

Дефлектор (от лат. deflecto - отклоняю, отвожу) используется по прямому назначению для отклонения световых пучков. *Модулятор* - модулирует (изменяет амплитуду, фазу, или поляризацию) световой пучок. При построении управляемых дефлекторов базовым является электрооптический эффект.

Электрически и оптически управляемые транспаранты. Пример.

Запись информации в транспарант производится путём экспозиции модулированного светового пучка (управляющая волна I_1) на фотопроводник с одновременной подачей постоянного напряжения. При этом происходит перераспределение разности потенциалов, приложенной к структуре. Модулированный световой пучок создаёт в фотопроводнике заряженные носители, дрейфующие к поверхности фотопроводник-электрооптический материал. Прикладываемое к транспаранту электрическое поле пространственно ослабляется фотоносителями пропорционально интенсивности падающего света. Это приводит к изменению оптических свойств электрооптического материала в соответствии с управляющей волной.

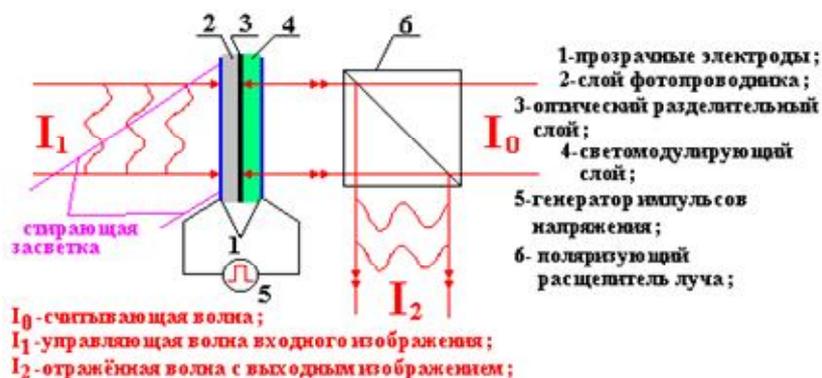


Рис. 8.1. Схема построения оптически управляемого транспаранта отражательного типа.

Для неразрушающего считывания записанных данных надо использовать свет с другой длиной волны. Считывание может производиться в проходящем или отражённом свете. При работе в отражённом свете между фотопроводником и электрооптическим материалом помещается оптический разделительный слой.

Электрооптические транспаранты

Kerr effect 1875, Pockels effect 1893

Действие на среду электрического поля. Впервые изменение оптических свойств изотропной среды (жидкости, стекла) под действием электрического поля было открыто Керром в 1875 году. Им было установлено, что под действием внешнего поля эти среды становятся анизотропными. При этом величина двупреломления оказалась пропорциональной квадрату напряженности поля. Это явление получило название квадратичного электрооптического эффекта или просто эффекта Керра.

$$n(E) = n - \frac{1}{2} s \cdot n^3 E^2$$

В 1894 году Поккельсом было установлено, что в ряде кристаллов при определенных условиях проявляется линейная зависимость двупреломления от электрического поля. Эффект Поккельса - изменение показателя преломления света в кристаллах, помещенных в электрическое поле, пропорционально напряженности электрического поля.

$$n(E) = n - \frac{1}{2} r \cdot n^3 E$$

Двойное лучепреломление

Двойное лучепреломление проявляется как расщепление пучка света в анизотропной среде (например, в кристалле) на две составляющие, распространяющиеся с разными скоростями и поляризованные в двух

взаимно перпендикулярных плоскостях. Если световой поток падает перпендикулярно к поверхности кристалла, то он распадается на два пучка, один из которых продолжает путь без преломления, как и в изотропной среде, другой же отклоняется в сторону, нарушая обычный закон преломления света. Соответственно этому явлению лучи первого пучка называются обыкновенными o (ordinary), а второго - необыкновенными e (extraordinary). Угол, образуемый обыкновенным и необыкновенным лучами, называется углом двойного лучепреломления.

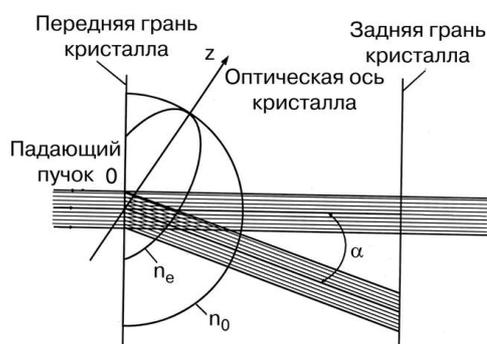


Рис. 8.2. Схема двойного лучепреломления.

Электрооптический модулятор

Принцип работы электрооптического модулятора (ЭОМ) основан на линейном электрооптическом эффекте. При воздействии на электрооптический кристалл электрического поля в результате двойного лучепреломления изменяется направление поляризации прошедшей через кристалл световой волны.

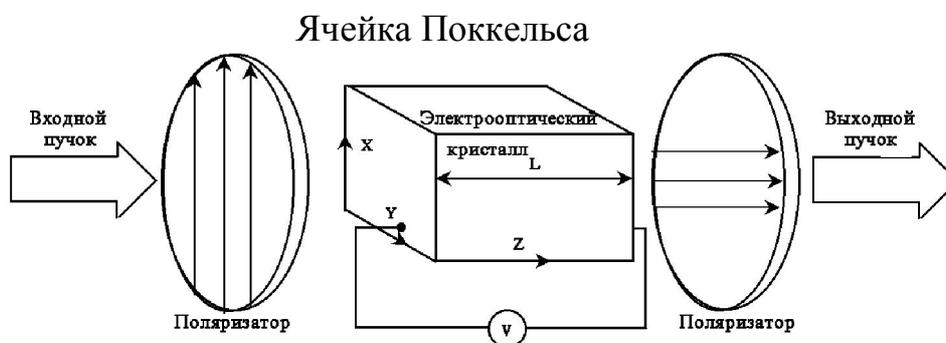


Рис. 8.3. Схема электрооптического модулятора.

Если электрооптические кристаллы поместить между поляризаторами с ортогонально направленными осями поляризации и на вход этой системы направить лазерный пучок с поляризацией, соответствующей поляризации входного элемента, то при отсутствии напряжения на электродах кристаллов световой поток на выходе второго поляризатора (анализатора) тоже будет отсутствовать. При подаче на электроды управляющего напряжения возникнет выходной световой поток, интенсивность которого достигает максимума при некотором значении этого напряжения, называемого полуволновым. Таким образом, изменяя напряжение, подаваемое на электроды, можно осуществлять модуляцию светового потока. Время переключения электрооптического модулятора из одного состояния в другое может составлять всего 10^{-8} с и менее. Для переключения ЭОМ требуется высокое управляющее напряжение, превышающее 100 В. К недостаткам ЭОМ, помимо использования высокого управляющего напряжения, следует отнести зависимость параметров от температуры и низкий коэффициент контрастности (порядка 100).

Дискретный (цифрового) электрооптический дефлектор

Используется трехкаскадное устройство, причем каждый каскад содержит входной модулятор (электрооптический кристалл с эффектом Поккельса) 1, управляемый внешним напряжением U , и анизотропный кристалл (призма Волластона) 2, обеспечивающий двойное лучепреломление. Управляющее напряжение U принимает лишь два дискретных уровня: низкий (нулевой) уровень, соответствующий, например, логическому 0, и высокий уровень, моделирующий логическую 1.

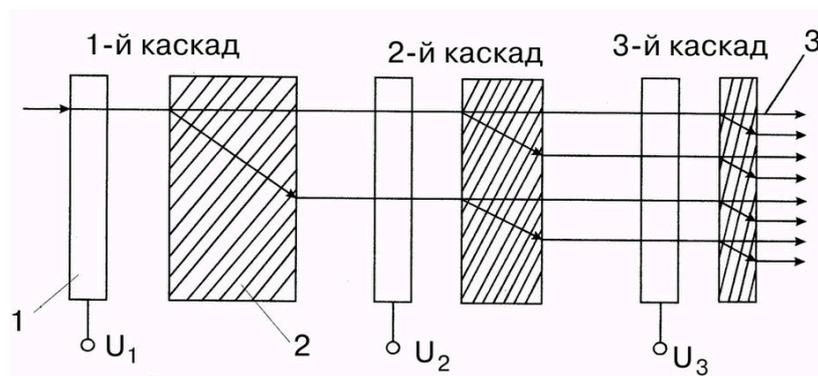


Рис. 8.4. Схема дискретного электрооптического дефлектора.

Магнитооптика.

Объяснение поворота плоскости поляризации

Фарадея эффект, один из эффектов магнитооптики. Заключается во вращении плоскости поляризации электромагнитного излучения (например, света), распространяющегося в веществе вдоль силовых линий постоянного магнитного поля, проходящих через это вещество. Открыт М. Фарадеем в 1845г. Он явился первым доказательством наличия прямой связи между магнетизмом и светом.

Феноменологическое объяснение заключается в следующем. Намагниченное вещество в общем случае уже нельзя охарактеризовать единым показателем преломления n . Показатели преломления n_+ и n_- для излучения правой и левой круговых поляризаций становятся различными. Проходящее через изотропную среду линейно поляризованное излучение всегда может быть формально представлено как суперпозиция (наложение) двух поляризованных по правому и левому кругу волн с противоположным направлением вращения. Различие n_+ и n_- приводит к тому, что поляризованные по правому и левому кругу составляющие излучения распространяются в среде с различными фазовыми скоростями, приобретая разность хода, линейно зависящую от оптической длины пути. В результате плоскость поляризации монохроматического света с длиной

волны (после прохождения в среде пути l поворачивается на угол J : $(= pl (n + - n-)/l$). Разность $(n + - n-)$ линейно зависит от напряжённости магнитного поля H в области не очень сильных полей.

Жидкие кристаллы

Жидкий кристалл – анизотропная жидкость, характеризующаяся (двумерным) упорядоченным расположением молекул.

В 1887 году австрийский ботаник Рейнитцер обнаружил две точки плавления холестерилбензоата в областях 145° и 179°C . При 145°C твердое кристаллическое вещество превращалось в мутную анизотропную жидкость, которая при 179° становилась прозрачной и изотропной. Состояние холестерилбензоата в области температур 145° - 179°C было названо жидкокристаллическим, а вещества, способные выше температуры плавления (в определенном интервале температур), сочетать одновременно свойства жидкостей (текучесть, способность к каплеобразованию) и кристаллических тел (анизотропию), были названы жидкими кристаллами.

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют промежуточную фазу (или мезофазу) между изотропной жидкостью и твердым кристаллом.

В 1922 году английский физик Фридель ввел понятия «мезофаза», «мезоморфное вещество» и «мезоморфное состояние», употребив слово «мезоморфный» в значении, эквивалентном «жидкокристаллический», а также предложил классификацию ЖК соединений в зависимости от характера расположения молекул в ЖК-фазе, разделив их на смектики, нематики и холестерики (три вида ЖК: нематический, смектический, холестерический).

Анизотропия свойств жидкого кристалла объясняется особенностью строения молекул. Для них характерна вытянутая, палочкообразная, форма.

Нематические жидкие кристаллы имеют ориентацию длинных осей молекул в одном направлении при хаотичном расположении центров тяжести молекул.

Смектические жидкие кристаллы характерны тем, что в них молекулы расположены параллельно своим длинным осям и образуют слои одинаковой толщины, близкой к длине молекул (1...3 мкм).

В холестерических ЖК молекулы расположены также в слоях, но направление их ориентации монотонно изменяется от слоя к слою.

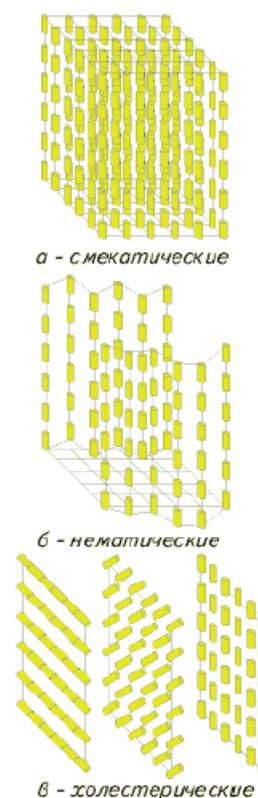
В жидкокристаллических индикаторах используются электрооптические эффекты динамического рассеивания и "твист-эффект".

В индикаторах, использующих динамическое рассеивание света, при наложении электрического поля $10^3 - 10^4$ В/см возникают турбулентные потоки, которые приводят к тому, что прозрачный ЖК мутнеет, на однородном фоне появляется рисунок, яркость которого в 10 - 40 раз превышает яркость фона.

В индикаторах на основе "твист-эффекта" при приложении электрического поля меняется прозрачность системы, состоящей из плоской стеклянной ячейки, заполненной ЖК и помещенной между скрещенными поляроидами. На слабо окрашенном фоне появляется черный рисунок. Пороговое напряжение твист-эффекта может составлять доли вольта.

ЖК-транспаранты

Интенсивность света, прошедшего через ячейку в скрещенных поляроидах (рис. 8.5):



$$I = I_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot l \cdot \Delta n}{\lambda}\right)$$

Δn - разность показателей преломления для света, поляризованного вдоль оси молекулы и перпендикулярного ей, $\Delta n=0,15-0,3$. Время электрооптического переключения в ЖК составляет около 1 мс, время релаксации на порядок больше.

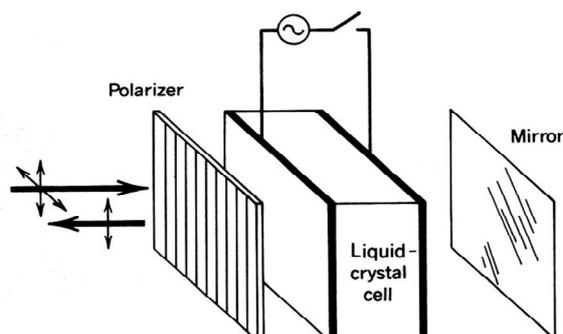


Рис. 8.5. Схема ЖК-модулятора.

АО-транспаранты

Акустооптика базируется на взаимодействии звука со светом. Предсказал Бриллюэн - 1922 год. Экспериментально подтвердили Люк и Бирак (Франция), Дебай и Сирс (США) - 1932 год

Ультразвук - колебательные движения частиц упругой среды (упругие колебания и волны), распространяющиеся в газообразной, жидкой или твердой среде с частотами от 15-20 кГц до 1 ГГц. Более низкие частоты характерны для звука; диапазон сверхвысоких частот от 10^9 до $10^{12}-10^{13}$ Гц соответствует гиперзвуку

Принцип действия АОМ основан на дифракции поляризованного света на бегущей ультразвуковой волне в оптически прозрачном материале.

Если на акустопровод, в котором с помощью пьезоэлектрического преобразователя возбуждена бегущая ультразвуковая волна, подать пучок света, то благодаря возникновению участков сжатия и растяжения,

различающихся показателем преломления, эта область акустопровода будет действовать на падающий свет как дифракционная решетка.

Световой пучок, дифрагируя на решетке, образует несколько выходных пучков — максимумов интенсивности излучения различных порядков, разнесенных в пространстве по направлению.

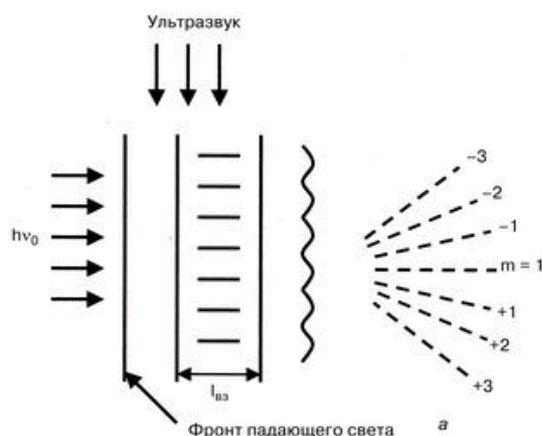


Рис. 8.6. Дифракция света на ультразвуке.

Очевидно, что акустооптическая дифракционная решетка является динамической; зоны сжатия и разрежения либо распространяются в среде со скоростью звука v_s , либо периодически сменяют друг друга в каждой точке среды. Следует также учитывать, что в акустооптических средах относительное изменение показателя преломления невелико (менее 10^{-5} - 10^{-4}).

Дифракция Рамана - Ната (Дебая-Сурса)

При дифракции Рамана - Ната выполняется условие $Q \ll 1$ (Q - волновой параметр $Q = \frac{\lambda l}{n\Lambda^2}$) и искривление (рефракция) падающего света после относительно тонкой дифракционной решетки оказывается незначительным. Однако появляются периодические всплески (возмущения) на фронте световой волны с характерными многочисленными дифракционными максимумами ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$).

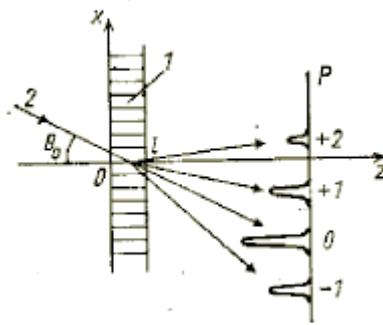


Рис. 8.6. Дифракция Рамана - Ната.

При увеличении акустической мощности свет последовательно перекачивается из нулевого порядка в первый, из первого во второй и т.д., распределяясь по все большему числу максимумов.

При определенных значениях мощности любой из максимумов может исчезнуть, но нельзя подобрать такую мощность, чтобы весь падающий свет оказался в одном из боковых максимумов.

Дифракция Брэгга

Особый практический интерес представляет случай, когда свет (лазерный пучок) направляется на кристалл под так называемым углом Брэгга. При этом наблюдается дифракция Брэгга, которая характеризуется тем, что интенсивности всех дифракционных максимумов, кроме первого, становятся пренебрежимо малыми ($Q \gg 1$).

Такое отклонение происходит в первый (+1 или -1-й) дифракционный максимум, если выполняется условие Брэгга

$$2\Lambda \sin \theta = \frac{\lambda}{n}$$

где n - показатель преломления кристалла.

Угол Брэгга, под которым в этом случае должен падать луч света, определяется соотношением

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{2\Lambda n}$$

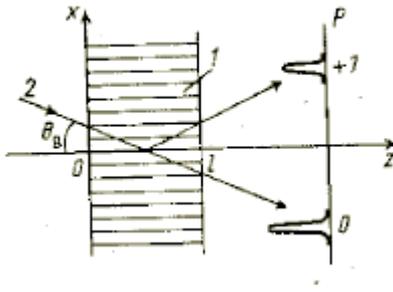


Рис. 8.7. Дифракция Брэгга.

Угол Брэгга - угол падения светового пучка, при котором свет дифрагирует с наибольшей эффективностью.

Брэгговская дифракция получила свое название в честь отца и сына Бреггов (Брэгг, Уильям Генри и Брэгг, Уильям Лоренс), которые открыли дифракцию рентгеновских лучей на кристаллах в 1913 году. В 1915 году отец и сын получили Нобелевскую премию по физике за это открытие.

Эффективность дифракции в режиме Рамана - Ната не превышает 33%, в режиме Брэгга (с увеличением волнового параметра) достигает 90%.

Конструкция акустооптического модулятора

Ультразвук генерируется пьезоэлектрическим излучателем (из ниобата лития LiNbO_3), который периодически возбуждается генератором высокочастотного напряжения. Упругие (ультразвуковые) волны создают в акустооптической среде дифракционную решетку, которая непосредственно влияет на распространение (пропускание, поглощение, отражение) падающего оптического излучения. Избыток энергии упругих сил отбирается специальным устройством (поглотителем ультразвука).

Лучи света, падающие перпендикулярно ультразвуковым волнам, далее распространяются согласно дифракционной картине Рамана - Ната или Брэгга.

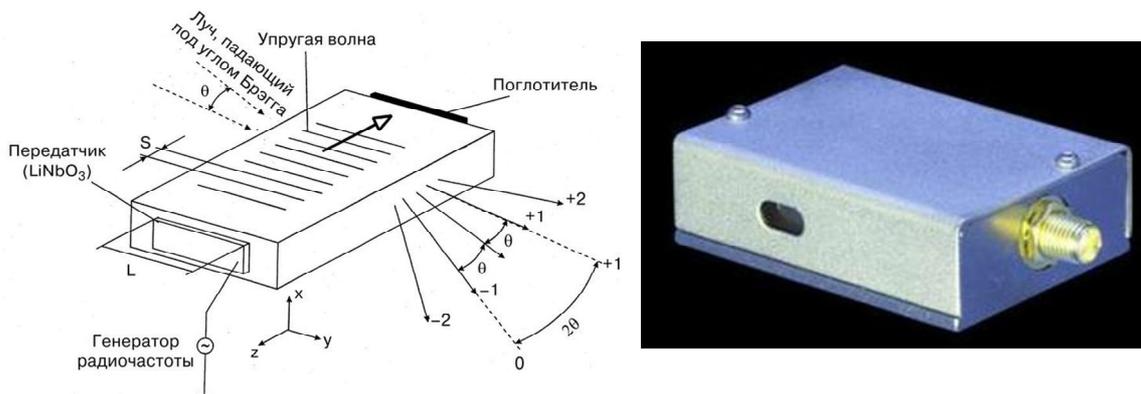


Рис. 8.8. Схема и фотография АО-модулятора.

Особенности функционирования:

1. Суммарный угол дифракционного отклонения от исходного направления падающего луча составляет удвоенное значение угла падения. ($\varphi = 2\theta$)

2. Согласно соотношению $\sin\theta = \lambda/2\Lambda$, угол Брэгга непосредственно зависит от длины волны ультразвука Λ , а следовательно, и от его частоты $f = v/\Lambda$:

Изменяя (например, увеличивая) частоту ультразвука, можно существенно изменять (увеличивать) углы отклонения дифрагированного пучка света.

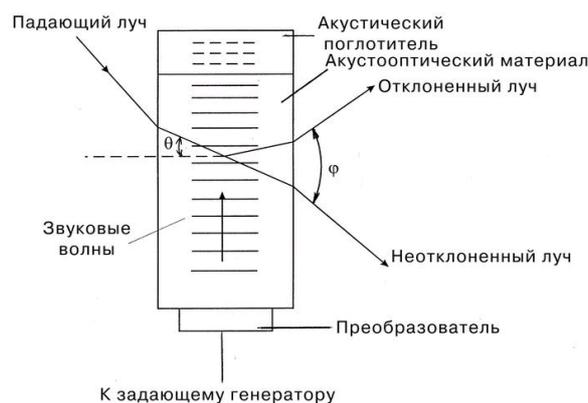


Рис. 8.9. Отклонение луча в АО-модуляторе.

3. Частота дифрагированных волн отличается от частоты падающего света. Сдвиг частоты обусловлен эффектом Доплера. Дифракция происходит на движущейся решетке. Р - номер порядка.

4. Изотропная и анизотропная дифракция

Многоканальный АО-модулятор

<http://www.crystaltechnology.com/products/AO-devices/AOMC-modulators/index.php>

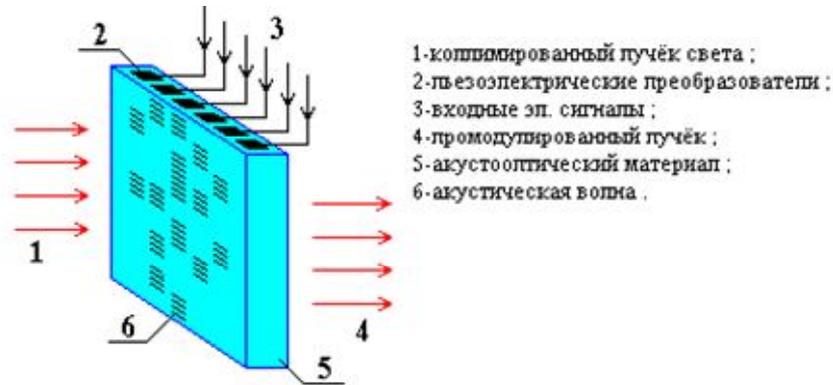


Рис. 8.10. Схема многоканального АО-модулятора.

Интегральный АО-модулятор

Гибридный анализатор спектра сигналов с интегральным АО-модулятором включает оптический волновод со встречно-штыревым преобразователем (3), интегральные линзы (2, 5), полупроводниковый лазер (1) и фотоприемник (6).

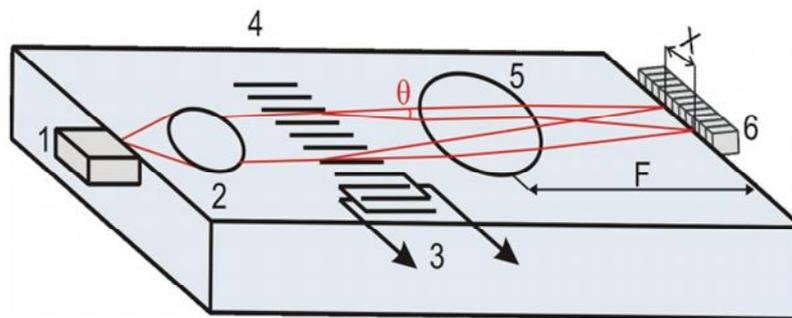


Рис. 8.11. Схема интегрального АО-модулятора.

Глава 9. Когерентные и некогерентные оптические процессоры

Когерентный оптический процессор - схема пространственной фильтрации

Оптический процессор, реализующий фильтрацию сигнала в области пространственных частот, представлен на рис. 9.1. Это аналоговый когерентный процессор с обработкой сигнала в частотной области [7].

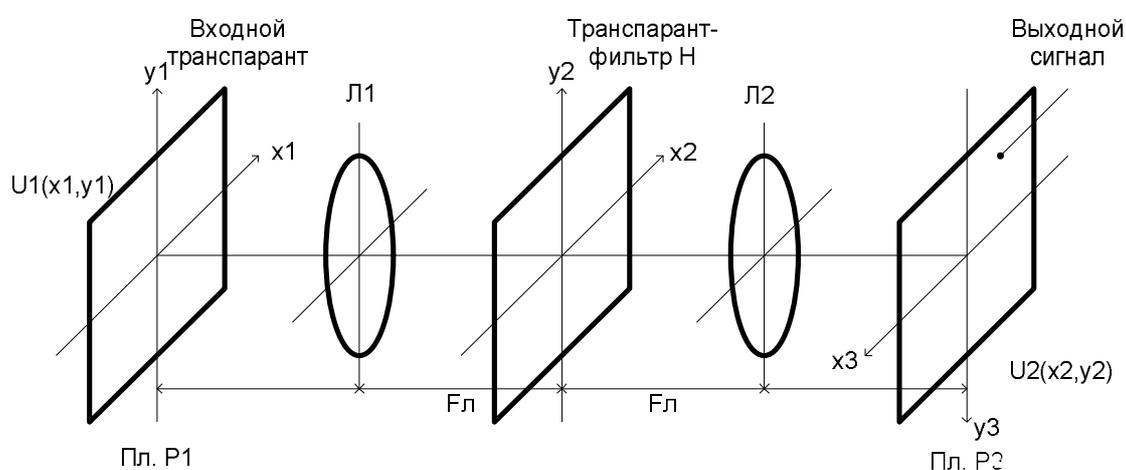


Рис. 9.1. Оптический процессор, реализующий принцип пространственной фильтрации, $L1$ и $L2$ – сферические линзы.

Замечание: Возможность обработки сигналов была отмечена при рассмотрении выходного сигнала пространственно-инвариантных систем. У пространственно-инвариантных систем импульсный отклик h на δ -воздействие во входной плоскости есть функция не изменяющая своей формы при изменении положения δ -воздействия:

$$h(x_2, y_2; x_1, y_1) = h(x_2 - x_1, y_2 - y_1) = L\{\delta(x'_1 - x_1, y'_1 - y_1)\}$$

Поэтому у таких пространственно-инвариантных систем

$$U_2(x_2, y_2) = U_1(x_1, y_1) \otimes h(x_1, y_1)$$

Работа процессора. Волна единичной амплитуды падает на транспарант в плоскости P_1 . Справа от транспаранта имеем волну с

комплексной амплитудой $U_1(x_1, y_1)$. После Фурье-линзы $L1$ поле в плоскости $P_2(x_2, y_2)$ имеет комплексную амплитуду: $U_2(x_2, y_2) = C \cdot U_1(\xi, \eta)$, где C – комплексная константа. После прохождения транспаранта-фильтра H оптический сигнал справа от транспаранта есть $U_2(x_2, y_2) = C \cdot U_1(\xi, \eta) \cdot H(\xi, \eta)$. При соответствующем выборе направления координатных осей x_3, y_3 в плоскости P_3 линза $L2$ выполняет обратное преобразование Фурье. В результате выходной оптический сигнал процессора есть свертка.

$$\begin{aligned} U_3(x_3, y_3) &\approx C' F^{-1} \{U_1(\xi, \eta) H(\xi, \eta)\} = \\ &= C' \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) h(x_3 - x_1, y_3 - y_1) dx_1 dy_1 = C' U_1 \otimes h \end{aligned}$$

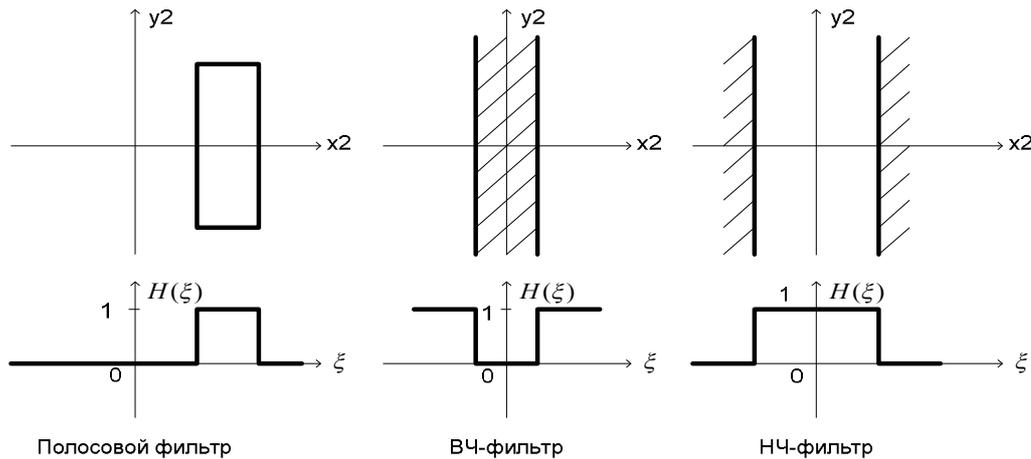
Здесь $h(x, y)$ - импульсный отклик фильтра, при этом $H(\xi, \eta) = F\{h(x, y)\}$.

Замечание: Пространственный фильтр в частотной плоскости P_2 может состоять из каких-либо пропускающих диафрагм или дополнительно из амплитудных поглощающих фильтров и фазовых транспарантов.

Замечание: Так как входной сигнал оптической системы является финитным, ее Фурье-образ имеет неограниченную протяженность. Поэтому ошибка в выходном сигнале оптической системы, обусловленная потерей части Фурье-образа, соответствующей высоким пространственным частотам, неизбежна. Эффект виньетирования.

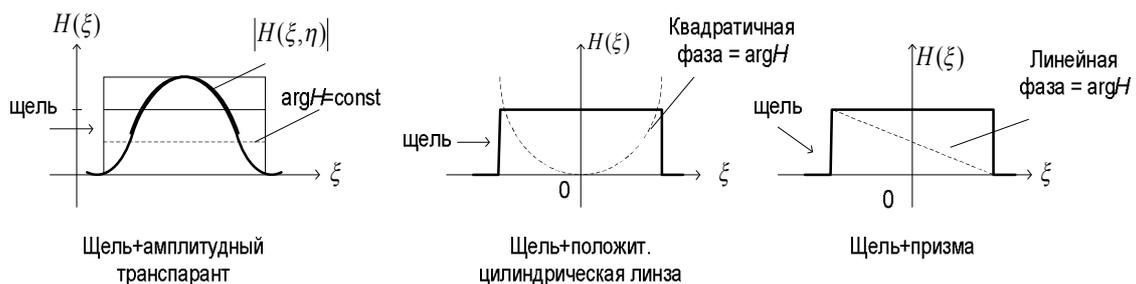
Примеры.

1. Фильтры в частотной плоскости – диафрагмы:



Эти фильтры имеют $|H| = 1$ в полосе пропускания и постоянную фазовую характеристику: $\arg(H) = \text{const}$.

2. Фильтры в частотной плоскости с переменными характеристиками $|H(\xi, \eta)|$ и $\arg(H(\xi, \eta))$.



Примечание к 3-му рисунку:

По теореме смещения $F\{g(x - a)\} = G(\xi) \cdot \exp(j2\pi \cdot \xi \cdot a)$, т. е. умножение спектра на линейный фазовый множитель дает смещение сигнала при его восстановлении (с помощью обратного преобразования Фурье).

3. В случае пространственных фильтров с произвольными амплитудными и фазовыми характеристиками обычно амплитудную и фазовую части фильтра делают отдельными, то есть фильтр состоит из двух транспарантов, расположенных рядом друг с другом на пути распространения света.

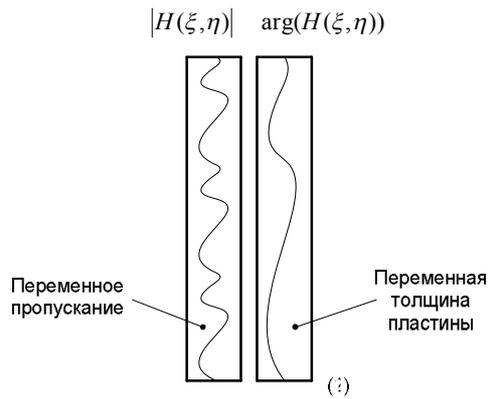
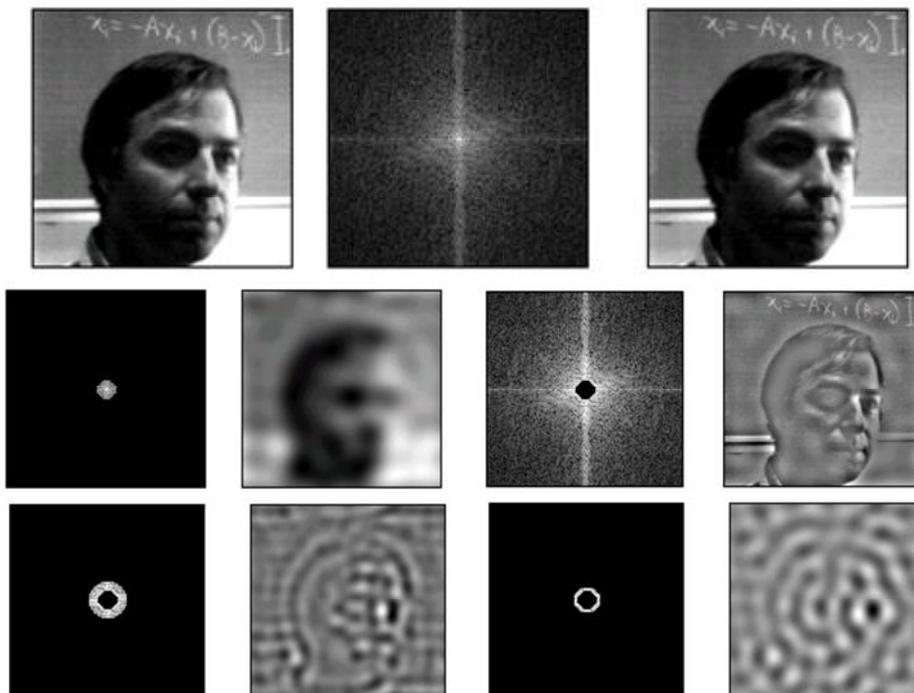


Рис. 9.2. Представление пространственного фильтра как суммы амплитудного (1) и фазового (2) фильтров.

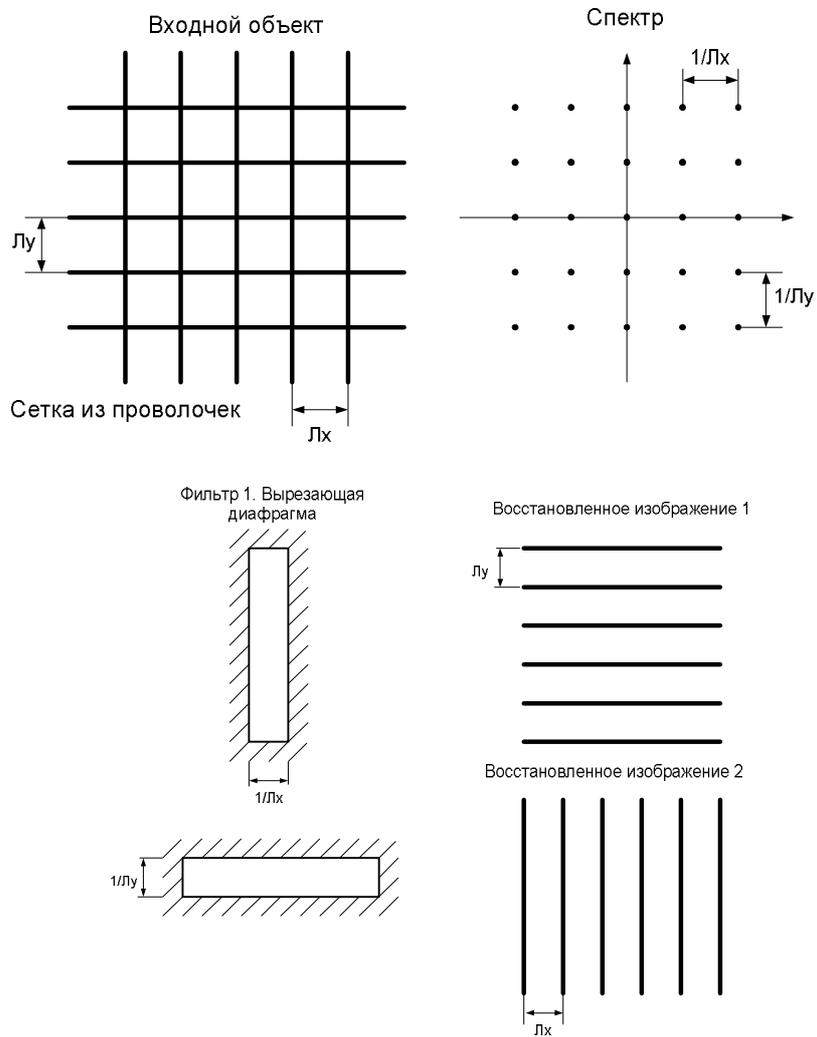
Создание таких фильтров с произвольными функциями пропускания - это сложная технологическая задача. Взаимное совмещение двух фильтров также достаточно сложная задача. Преодолеть эту трудность удастся с помощью голографического фильтра Вандер-Люгта.

Примеры действия пространственных фильтров

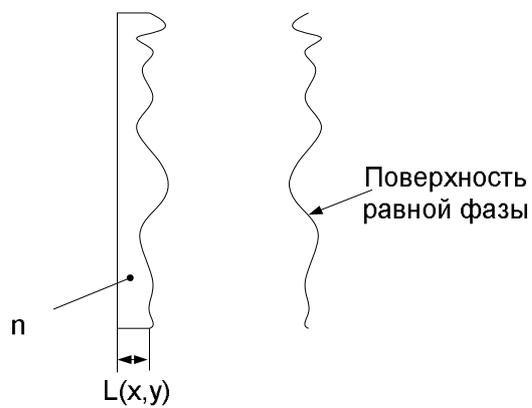
Пример 1.



Пример 2.



Пример 3. Фазовый объект – стеклянная пластина переменной толщины.



$\varphi = -n \cdot L(x, y)$ поле: $e^{j\varphi(x,y)} \approx 1 + j\varphi(x, y)$, если φ - мало, то интенсивность $I \approx |1 + j\varphi|^2 \approx 1$

Многоканальный оптический процессор с фильтрацией сигнала в области пространственных частот

Многоканальный оптический процессор может быть построен по принципу, объединяющему структуры оптического многоканального анализатора спектра и оптической пространственной фильтрации. Схема процессора представлена на рис. 9.3.

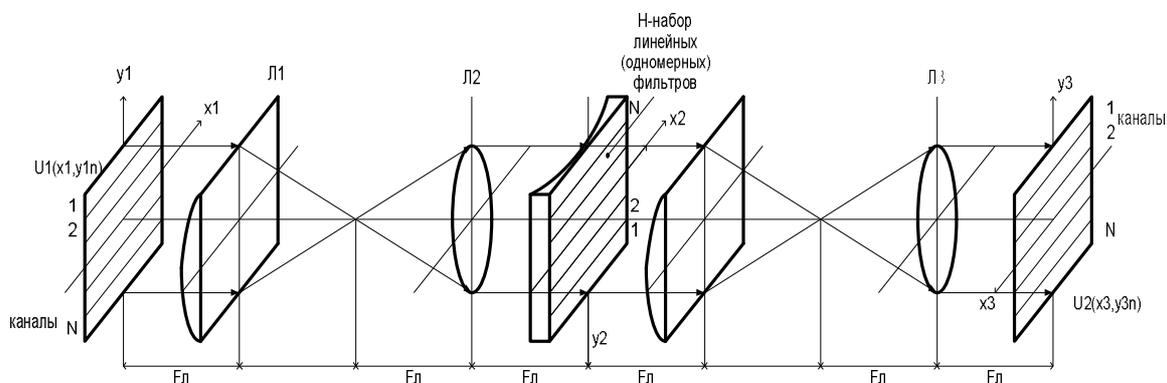


Рис. 9.3. Многоканальный оптический процессор.

Схема представляет собой два последовательных каскада – многоканальные анализаторы спектра. На выходе первого каскада – в плоскости пространственных частот ξ расположен многоканальный фильтр $H(\xi, y_{2n})$. Следует заметить, что перед фильтром H установлена дополнительно линза $L5$ – цилиндрическая линза с отрицательным фокусным расстоянием $-Fл/2$. Эта линза компенсирует квадратичный фазовый сдвиг $\exp\left[\frac{j2\pi}{\lambda F_n} \left(\frac{d}{F_n} - 1\right) x_2^2\right]$, возникающий в плоскости пространственных частот первого каскада, так как расстояние d от входной плоскости (x_1, y_1) до Фурье-линзы $L2$ равно $3Fл$ (поэтому множитель $\frac{d}{F_n} - 1 = 2$).

$$\frac{d}{F_n} - 1 = 2.$$

Замечание: В плоскости (x_3, y_3) также возникает квадратичный фазовый сдвиг (по координате x_3). Однако он не играет роли, если фотоприемник регистрирует интенсивность.

Итог: Многоканальный процессор пространственной фильтрации осуществляет независимую фильтрацию N входных сигналов (по координате x) с помощью N -канального фильтра $H(\xi, y_{2n})$ и формирует на выходе одновременно N независимых сверток входных сигналов с импульсными характеристиками $h_n(x)$ фильтра:

$$U_2(x_3, y_{3n}) = U_1(x_1, y_{1n}) \otimes h_n(x).$$

Интенсивность $I(x_3, y_{3n}) \approx U_{1n}(x) \otimes h_n(x), n = 1, 2, \dots, N$.

Схема фильтрации сигналов в предметной области

Наряду с синтезом фильтров в области пространственных частот для осуществления операции фильтрации может быть использовано движение сигнала во входной предметной плоскости. Схема процессора представлена на рис.6.

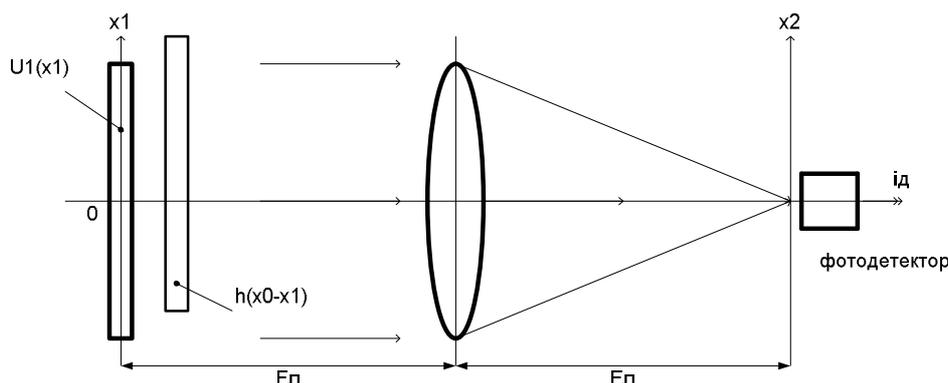


Рис. 9.4. Фильтр сигнала в предметной области.

Здесь «опорная» (эталонная) функция h перемещается во входной предметной плоскости $h = h(x_0 - x_1)$, x_0 - сдвиг опорной функции (x_0 - положение центра), h - импульсный отклик фильтра. Сигнал во входной

плоскости есть Фурье-преобразование от произведения функций пропускания двух транспарантов.

$$U_2(x_2, x_0) = C \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1) h(x_0 - x_1) \exp\left[\frac{j2\pi}{\lambda F_n}(x_1 x_2)\right] dx_1$$

На оси системы ($x_2 = 0$) имеем

$$U_2(x_0) = C \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1) h(x_0 - x_1) dx_1 = CU_1(x) \otimes h(x)$$

Фотодиод даст ток $i_o \approx U_1(x) \otimes h(x)$.

Достоинство системы – ее простота. Для получения свертки (или корреляции) необходимо движение одного из сигналов во входной плоскости. Наиболее просто и естественно такое движение реализуется в системе обработки одномерных временных сигналов с акустооптическим модулятором для ввода сигнала в оптический процессор (аргумент времени t заменяется в этих модуляторах аргументом $t-x/V$, где V – скорость распространения акустической волны («акустической копии» сигнала) по материалу акустооптического модулятора).

Фильтры Вандер Люгта. Оптический процессор с фильтром Вандер Люгта

Для оптических процессоров в области пространственных частот необходимо изготовить транспаранты $H(\xi, \eta)$ с довольно произвольными в общем случае амплитудной $|H|$ и фазовой $\arg(H)$ функциями. Как правило, отдельно выполняются соответствующие амплитудный и фазовый транспаранты и они размещаются рядом друг с другом на пути распространения света. Амплитудный транспарант – это может быть фотопластинка (фотопленка) с переменным коэффициентом пропускания. Фазовый транспарант – это может быть стеклянная пластинка с переменной толщиной (или переменной толщиной диэлектрического слоя

на стеклянной подложке постоянной толщины). Очевидны технологические трудности изготовления таких транспарантов и их взаимной юстировки.

Вандер Люгт (Радиолокационная Лаборатория Мичиганского Технологического Института) предложил голографический способ изготовления пространственного фильтра, в котором чисто амплитудный транспарант работает так же, как фильтр с произвольным комплексным коэффициентом передачи H . Фильтр записывается голографическим способом в Фурье-плоскости известной нам схемы оптического анализатора спектра.

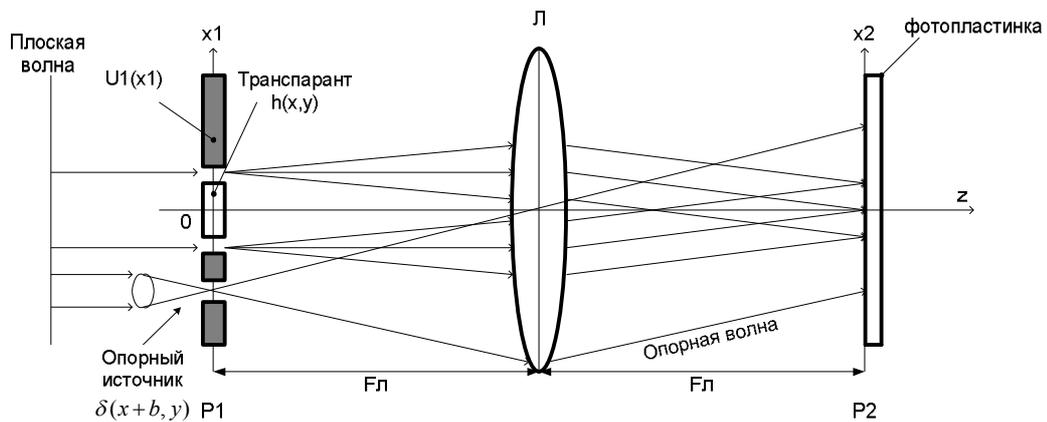


Рис. 9.5. Схема записи фильтра Вандер Люгта.

В плоскости $P1$ – входной транспарант с функцией $h(x,y)$. В плоскости $P2$ (фокальная плоскость линзы) – спектр $H(\xi,\eta)$, где $\xi = \frac{x_2}{\lambda F_{\text{л}}}$ $\eta = \frac{y_2}{\lambda F_{\text{л}}}$. Кроме того в плоскость $P2$ попадает наклонная опорная волна постоянной амплитуды от точечного источника $\delta(x+b,y)$. Смещенный точечный источник дает в плоскости $P2$ волну с комплексной амплитудой $A \cdot \exp[-j2\pi b\xi]$, далее полагаем $A=1=const$.

Оценка пространственной частоты опорной волны (в плоскости $P2$)

$$\exp[-j2\pi b\xi] = \exp\left[-j2\pi b \frac{x_2}{\lambda F_l}\right] = \exp[-j2\pi b f_x x_2], \quad f_x \text{-пространственная}$$

$$\text{частота, } f_x = \frac{b}{\lambda F_l}.$$

В плоскости $P2$ установлена тонка фотопластинка. Взаимодействие двух волн в плоскости $P2$ приводит к формированию интерференционной картины с интенсивностью.

$$I = [\exp(-j2\pi b\xi) + H(\xi, \eta)] \cdot [\exp(j2\pi b\xi) + H^*(\xi, \eta)] = 1 + |H(\xi, \eta)|^2 + H(\xi, \eta) \cdot \exp(-j2\pi b\xi)$$

Если характеризовать комплексную функцию $H(\xi, \eta)$ распределением ее амплитуды $|H(\xi, \eta)|$ и фазы $\varphi(\xi, \eta)$, $H(\xi, \eta) = |H(\xi, \eta)| \cdot \exp[j\varphi(\xi, \eta)]$, то распределение интенсивности можно представить в следующем виде:

$$I = 1 + |H(\xi, \eta)|^2 + 2 \cdot |H(\xi, \eta)| \cdot \cos(2\pi b\xi + \varphi(\xi, \eta))$$

Амплитудная и фазовая информация о спектре является амплитудной и фазовой модуляцией высокочастотной несущей, пространственная частота которой f_x определяется наклоном опорной волны.

После экспонирования в течение какого-то времени T_3 фотоэмульсия проявляется, получается негатив. После по негативу делается повторная экспозиция (другая фотопластинка) и получается диапозитив - транспарант. Коэффициент пропускания негатива по интенсивности τ_i обратно пропорционален экспозиции $\mathcal{E} = I \cdot T_3$.

Восстановление изображений от голограммы (рис. 9.6.)

Итак, проявленная голограмма (диапозитив) имеет пропускание по амплитуде $t_n \approx I(x_2, y_2)$. Если тонкая голограмма освещается плоской волной с постоянной амплитудой A_0 , распространяющейся вдоль оси z , то комплексная амплитуда после голограммы есть:

$$A_0 \cdot t_n \approx I = 1 + |H(\xi, \eta)|^2 + H(\xi, \eta) \cdot \exp(j2\pi b\xi) + H^*(\xi, \eta) \cdot \exp(-j2\pi b\xi)$$

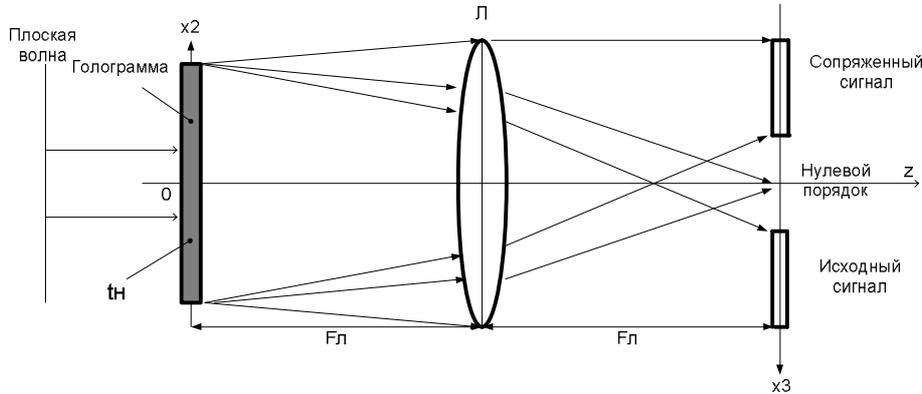


Рис. 9.6. Восстановление двух изображений от голограммы.

Линза выполняет обратное преобразование Фурье, поэтому ось x_3 перевернута. Установим за голограммой линзу, выполняющую обратное преобразование Фурье.

- 1) В ее фокальной плоскости на оси системы будет формироваться отклик, определяемый 1-м и 2-м слагаемыми.
- 2) Обратный Фурье-образ от 3-го слагаемого – это исходный сигнал $h(x_3 - b, y_3)$, смещенный по оси x_3 на величину b .
- 3) Обратный Фурье-образ от 4-го слагаемого – это сопряженная и зеркально-симметричная исходная функция, то есть $h^*(-x_3 - b, -y_3)$ смещенная по оси x_3 на величину b в отрицательном направлении.

Если теперь голографический фильтр вернуть в частотную плоскость спектроанализатора (Рис.9.7.), то в плоскости $P2$ сразу за фильтром световое поле имеет комплексную амплитуду:

$$U_2(\xi, \eta) = U(\xi, \eta) \cdot t_n(\xi, \eta) = \\ = U(\xi, \eta) + U(\xi, \eta) |H(\xi, \eta)|^2 + U(\xi, \eta) H(\xi, \eta) \cdot \exp(j2\pi b\xi) + U(\xi, \eta) H^*(\xi, \eta) \cdot \exp(-j2\pi b\xi)$$

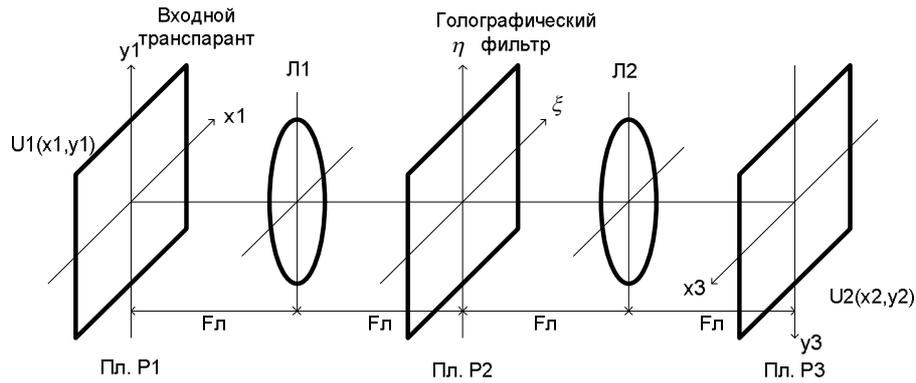


Рис.9.7. Оптический процессор с голографическим фильтром Вандер Люгта.

Процессор позволяет получить свертку сигналов и взаимную корреляцию сигналов U и h . Обратное Фурье преобразование, выполняемое линзой $L2$ дает в выходной плоскости 4 слагаемых:

$$\begin{aligned}
 U_3(x_3, y_3) \approx & U(x_3, y_3) + h(x_3, y_3) \otimes h^*(-x_3, -y_3) \otimes U(x_3, y_3) + \\
 & + U(x_3, y_3) \otimes h(x_3 - b, y_3) + \\
 & + U(x_3, y_3) \otimes h^*(-x_3 - b, -y_3)
 \end{aligned}$$

Первые две компоненты «нулевого порядка» расположены на оси системы, остальные две смещены, они не могут перекрываться с нулевым порядком (рис.9.8).

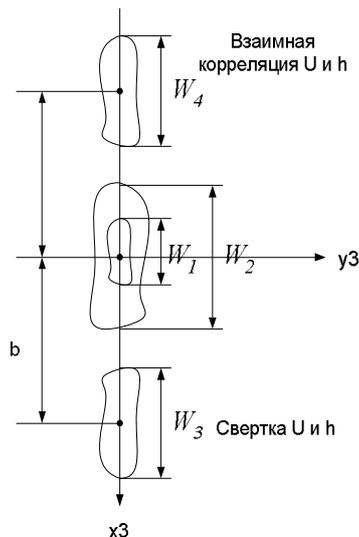


Рис.9.8. Положение различных компонент на выходе оптического процессора с фильтром Вандер Люгта.

Ширина областей W_1, W_2, W_3, W_4 на выходе процессора определяется размерами W_U и W_h объектов (сигналов) $U(x,y)$ и $h(x,y)$.

1) $U(x,y) \rightarrow W_1 = W_U$

2) $h \otimes h^* \otimes U \rightarrow W_2 = 2W_h + W_U$

3) $U \otimes h \rightarrow W_3 = W_U + W_h$

4) $U \otimes h^* \rightarrow W_4 = W_U + W_h$

Преимущества фильтра Вандер Люгта.

Использование фильтров Вандер Люгта устраняет 2 трудности применения когерентных оптических процессоров с фильтрацией сигнала в частотной плоскости.

- 1) По заданному (имеющемуся) импульсному отклику h не нужно делать Фурье преобразование (аналитически) для последующего синтеза фильтра. Оптическая система сама оптическим путем осуществляет преобразование Фурье.
- 2) Комплексная передаточная функция общего вида $H(\xi, \eta)$ синтезируется (реализуется) с помощью одной поглощающей маски. Не нужно отдельно делать амплитудный и фазовый транспаранты и затем их совмещать.

Некогерентные оптические процессоры

Схема получения интегрального произведения двух функций

На основе оптических систем, в которых используются некогерентные источники излучения, также можно строить устройства обработки информации. В отличие от когерентного оптического сигнала некогерентный сигнал описывается не комплексной, а действительной функцией. Информация содержится в интенсивности световой волны. *Фазовая информация в световой волне утрачивается.*

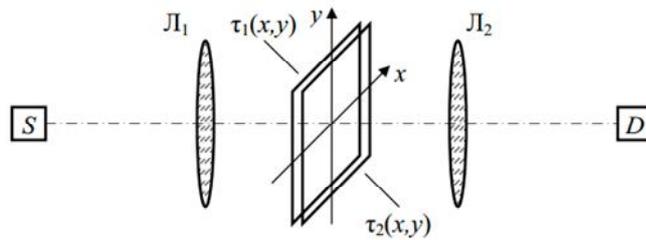


Рис. 9.9. Схема получения произведения двух функций.

На рис. показана простая система, которая осуществляет перемножение коэффициентов пропускания транспарантов по интенсивности. Ее выходной сигнал равен $I = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_1(x, y) \tau_2(x, y) dx dy$

Некогерентный конвольвер

Для получения функции корреляции или свёртки один из транспарантов должен механически перемещаться, а сигнал детектора измеряться как функция времени. Если диапозитив τ_2 установлен в перевёрнутом положении, то выходной сигнал системы

$I = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_1(x, y) \tau_2(-x, -y) dx dy$. Если перемещать транспарант τ_2 с постоянной

скоростью v в сторону отрицательных значений координаты x , то сигнал

детектора будет зависеть от времени как $I(t) = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_1(x, y) \tau_2(vt - x, -y) dx dy$.

Рассмотренная схема неудобна в использовании из-за необходимости механического движения транспаранта. Можно осуществлять свертку и без перемещений, как в схеме, показанной на рис. .

Схема работает следующим образом. Лучи из точки источника с координатами $-x_s, -y_s$ идут после линзы L_1 параллельным пучком и дают на расстоянии d распределение интенсивности пропорциональное, в пределах точности геометрической оптики, величине $t1[-x+(d/f)x_s, -y+(d/f)y_s]$. После прохождения через транспарант τ_2 лучи фокусируются на

фотоприемнике D в точке (x_s, y_s) . Интенсивность света в точке фокусировки при этом равна

$$I(x_D = x_s, y_D = y_s) = k \int_{-\infty}^{\infty} \tau_1 \left[\left(\frac{d}{f} \right) x_s - x, \left(\frac{d}{f} \right) y_s - y \right] \tau_2(x, y) dx dy$$

Из выражения видно, что интенсивность света в плоскости фотоприемника пропорциональна свертке коэффициентов пропускания транспарантов τ_1 и τ_2 .

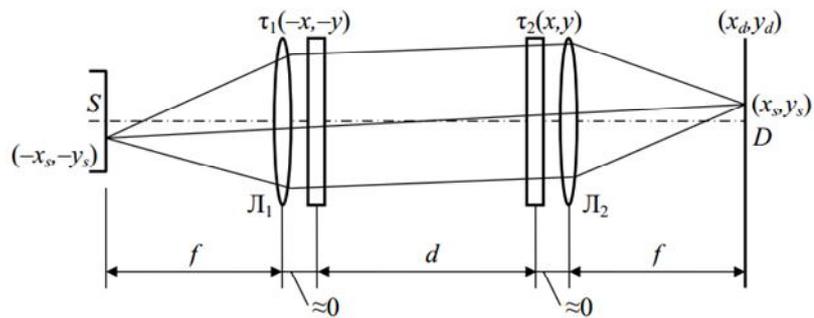


Рис. 9.10. Схема некогерентного конвольвера.

Глава 10. Акустооптические процессоры

Акустооптика - раздел физики, изучающий взаимодействие оптических и акустических волн (акустооптическое взаимодействие), а также раздел техники, в рамках которого разрабатываются и исследуются приборы, использующие акустооптическое взаимодействие (акустооптические приборы).

Акустооптические процессоры - осуществляют те или иные математические операции над оптическими и акустическими сигналами. В частности:

- корреляторы — вычисляют корреляцию двух сигналов;
- конвольверы — выполняют математическую операцию свёртки двух сигналов;
- матрично-векторные процессоры — выполняют операции линейной алгебры;

Модуляторы — позволяют управлять интенсивностью оптического излучения.

Дефлекторы — отклоняют оптический луч на определенный угол, а также осуществляют сканирование луча в пространстве.

Акустооптические анализаторы спектра

1. С пространственным интегрированием. Фурье-преобразование происходит по пространственным переменным (x, y) . Длительность сигнала определяется постоянной времени АО-ячейки, а полоса анализируемых частот свойствами АО-взаимодействия. $\tau \Delta f = 10^{*2} - 10^{*3}$

2. С временным интегрированием. Фурье-преобразование происходит по временной переменной (t) с помощью фотоприемника. $\tau \Delta f = 10^{*6} - 10^{*8}$

АО анализатора спектра (АОС) с пространственным интегрированием является самым изученным и применяемым вычислителем. Схема АОС

представлена на рис. 10.1 и рис. 10.2. В ней обрабатываемый сигнал $s(t)$ подается на АОМ. Из-за дифракции света на акустической волне $s(t - x/V_{ЗВ})$ – пространственной копии сигнала $s(t)$ в фокальной плоскости линзы Л формируется пространственное распределение интенсивности света $I(x)$, пропорциональное спектру мощности $|S(f)|^2$ сигнала $s(t)$. Здесь x – координата вдоль апертуры АОМ, а $V_{ЗВ}$ – скорость акустической волны. Это распределение $I(x)$ регистрируется многоэлементным ПЗС-фотоприемником, который располагается на фокусном расстоянии от линзы. Пространственный фильтр (ПФ) отсекает нулевой порядок дифракции в выходном распределении.

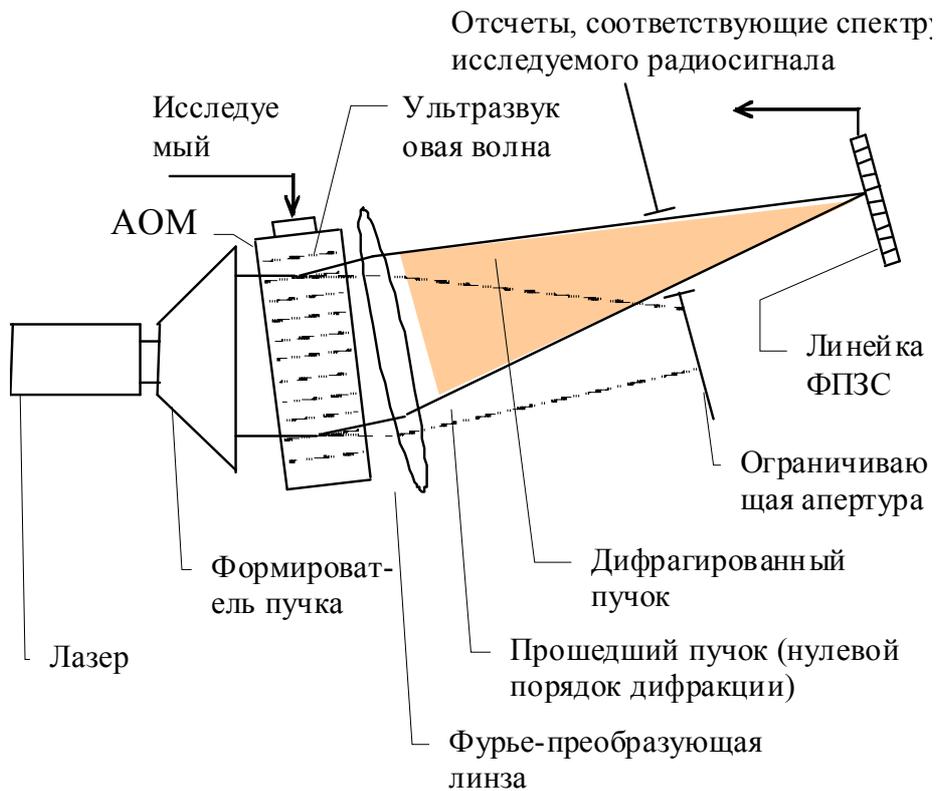


Рис. 10.1. Функциональная схема акустооптического анализатора спектра, работающего в режиме дифракции Брэгга - схема Ламберта.

Связь оптического сигнала $I(x)$ на выходе АОС со спектром входного электрического сигнала $S(f)$ выражается интегралом суперпозиции:

$$I(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega, t) \cdot h(x, \Omega) d\Omega.$$

Функция $h(x, f)$ является аппаратной функцией АОС. Физический смысл аппаратной функции соответствует распределению светового поля на выходе АОС при подаче на вход δ -образного (гармонического) сигнала.

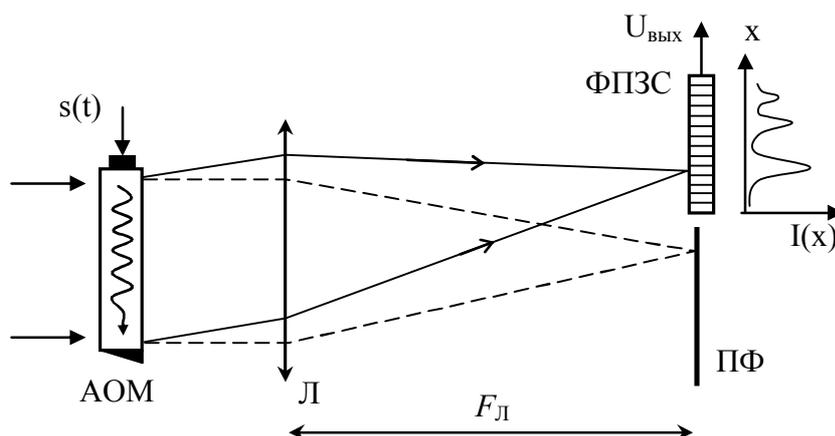


Рис. 10.2. Структурная схема акустооптического анализатора спектра.

Число разрешимых точек спектра ($\sim 10^3$) соответствует частотному разрешению δf_A АОС и определяется соотношением: $\delta f_A = \frac{V_{3B}}{w} = \frac{1}{\tau}$, где V_{3B} – скорость акустической волны; w – апертура (пространственный размер) АОМ; τ – временная апертура АОМ. Величина τ не превышает нескольких десятков микросекунд. Поэтому в настоящее время АОС с пространственным интегрированием имеют умеренное частотное разрешение, не превышающее нескольких десятков кГц. Широкую полосу анализа можно получить при использовании анизотропной дифракции с оптимальной геометрией взаимодействия АОМ. В этом случае рабочая полоса частот АОС Δf равна: $\Delta f = 1,9v \sqrt{\frac{n}{\lambda l}}$, где n – показатель преломления невозмущенной среды; l – ширина акустического пучка; λ – длина световой волны. Полное число анализируемых частот

можно записать в виде: $N_a = \frac{\Delta f}{\delta f_a} = \Delta f \cdot \tau$. Между координатой x и частотой

входного сигнала f имеется однозначное соответствие: $x = F_L(\theta_0 + 2\pi \cdot f/V_{зв} \cdot k)$.

Появление многоэлементных ПЗС-фотоприемников привело к созданию новых схем спектроанализаторов – спектроанализаторов с временным интегрированием. В этих процессорах в ФПЗС осуществляют не только детектирование оптических сигналов, но и их интегрирование в течение длительного времени. За счет Фурье-преобразования по временной переменной (t), проводимого в ФПЗС, преодолевается недостаток процессоров с пространственным интегрированием – ограниченность длительности обрабатываемого сигнала.

Акустооптические корреляторы и конвольверы

Оптические вычислители могут легко и быстро выполнять операцию свертки разными методами [8]. Особенно привлекательна временная свертка, так как она может выполняться с использованием доступных и надежных АО-модуляторов, а также с использованием ряд других подходов, включая интегральную оптику. Различают схемы с пространственным и временным интегрированием.

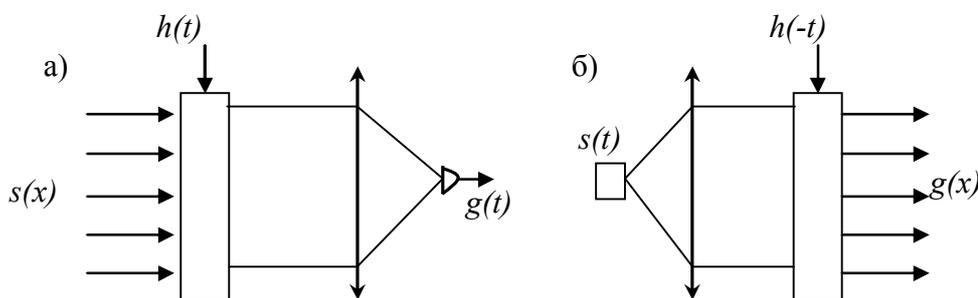


Рис. 10.3. Схемы выполнения свертки: а) - с пространственным интегрированием; б) - с временным интегрированием.

На рис. 10.3 показаны два основных типа устройств, выполняющих временную свертку. В схеме с пространственным интегрированием (рис. 10.3, а) функция $s(x)$ вводится в устройство в виде пространственно изменяющейся функции (возможно, с помощью фиксированной маски или матрицы светодиодов), а само устройство работает как сдвиговый регистр. В качестве такого устройства могут применяться АО-модулятор или даже сдвиговый ПЗС-регистр, выполняющий дискретный сдвиг функции. Функция $s(x)$ поддерживается постоянной, в то время как $h(t)$ сдвигается относительно нее. Свет, выходящий из сдвигового регистра, суммируется по пространству на одном фотоприемнике. Тогда временная зависимость $g(t)$ сигнала, выходящего из детектора, представляет собой функцию являющуюся сверткой s и h :

$$g(t) = \int s(x)h(vt - x)dx$$

На рис. 10.3.б показана схема временного интегрирования. Одна из функций, $s(t)$, подается в качестве зависящего от времени сигнала на источник света, например светодиод или полупроводниковый лазер. Другая функция, $h(-t)$, подается на сдвиговый регистр. Функция $s(t)$ равномерно «распределяется» по сдвиговому регистру с помощью линзы, в то время как $h(t)$ сдвигается относительно нее. Свет, выходящий из сдвигового регистра, суммируется по времени дискретными элементами или матрицей фотодетекторов. Сигнал в матрице фотодетекторов можно представить в виде

$$g(x) = \int s(t)h\left(\frac{x}{v} - t\right)dt .$$

где v — скорость сдвига функции h в сдвиговом регистре. Сигнал $g(x)$ представляет вариант пространственной выборки операций свертки от s и h . При рассмотрении рис. 10.3 становится очевидным, что устройства,

производящие пространственную и временную свертки, являются зеркальными образцами друг друга, где выходной и входной сигналы поменялись ролями.

На рис. 10.4. представлена схема акустооптического конвольвер с временным интегрированием и его компактная схема, предложенная Монтгомери.

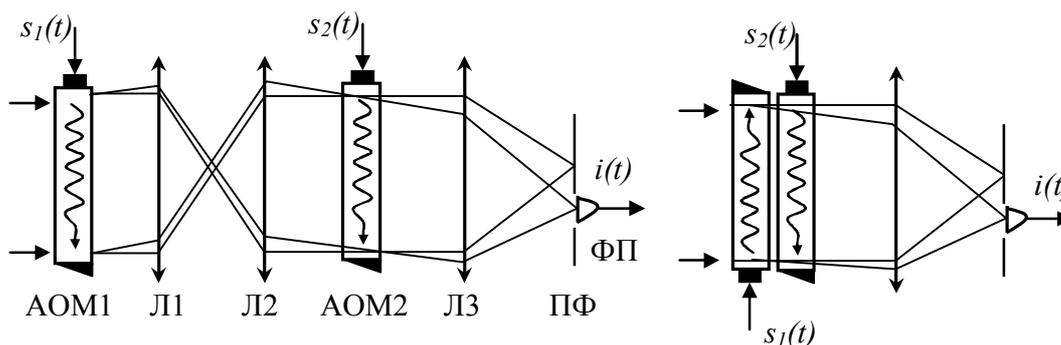


Рис. 10.4. Акустооптический конвольвер и его компактная схема (схема Монтгомери).

Схема содержит два АО-модулятора (АОМ1 и АОМ2), на которые поступают обрабатываемые сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$, три линзы и фотоприемник (ФП). Л1 и Л2 образуют телескопическую системы, с помощью которой изображение сигнала $s_1(t)$ проецируется в плоскость второго АО-модулятора. Это изображение вследствие производимой телескопом инверсии перемещается навстречу акустической волне (сигналу $s_2(t)$) в АОМ2. Пространственный фильтр (ПФ) пропускает на фотодетектор только +1 порядок АОМ1 и -1 порядок АОМ2.

После фильтрации сигнала с выхода фотоприемника можно выделить составляющую, которая представляет собой свертку двух сигналов

$$i(t) \subset \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \cdot s_2(\tau - t) dt ,$$

Схема коррелятора с пространственным интегрированием представлена на рис. 10.5. Процессор выполняет совместное

преобразование Фурье двух сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$, поступающих на два входа АОМ. На выходе процессора формируется двумерная картина с координатами частота – x и фаза – y . Вдоль оси x формируется распределение, определяемое результатом интерференции спектров сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$. Сечение интерференционной картины по фазовой координате (y) имеет вид:

$$I(y) = (\langle s_1^2 \rangle + \langle s_2^2 \rangle) \cdot [1 + A \cdot \cos(K \cdot L \cdot y + \varphi)]$$

где $A = \langle 2s_1s_2 \rangle$ - глубина модуляции, K - константа, определяемая оптическими элементами процессора, L - расстояние между осями каналов АОМ, φ - пространственный сдвиг интерференционных полос, скобки $\langle \dots \rangle$ показывают статистическое усреднение. Обработка распределения $I(y)$ позволяет определить соотношение амплитуд s_1 и s_2 и фазовый сдвиг φ сигналов.

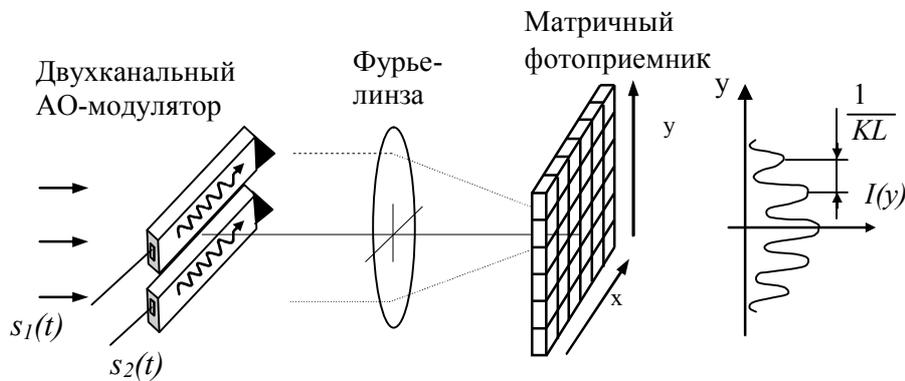


Рис. 10.5. Двухканальный акустооптический коррелятор.

Данную схему оптического узла мы использовали при построении 2D процессора для обработки сигналов пульсаров и для формирования диаграммы направленности на радиоинтерферометре с частотным сканированием [6].

В рассмотренных выше схемах с временным интегрированием элементы ФПЗС выполняют важную роль – они выступают как перемножители, интеграторы и дискретизаторы (по пространству).

Рассмотрим более подробно работу АО-процессоров.

Акустооптический процессор - конвольвер (режим Рамана-Ната)

Замечание 1:

При нормальном падении световой волны с λ_0 на среду с показателем преломления n_0 возникает продольная акустическая волна. При возбуждающем радиосигнале $u(t) = U_m(t) \cdot \sin(2\pi f t)$ сжатие и разрежение среды приводит к изменению n

$$n = n_0 + \Delta n \cdot \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{x}{V_A} \right) \right], \quad S(x, t) = S_m \cdot \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{x}{V_A} \right) \right].$$

Световая волна на выходе акустического пучка (при $z = L$) (пучок «тонкий» \Rightarrow луч не успевает отклониться)

$$a(x, t) = A \cdot \cos \left(2\pi \nu t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n z \right) = A \cdot \cos \left\{ 2\pi \nu t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0 L - \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n L \cdot \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{x}{V_A} \right) \right] \right\}$$

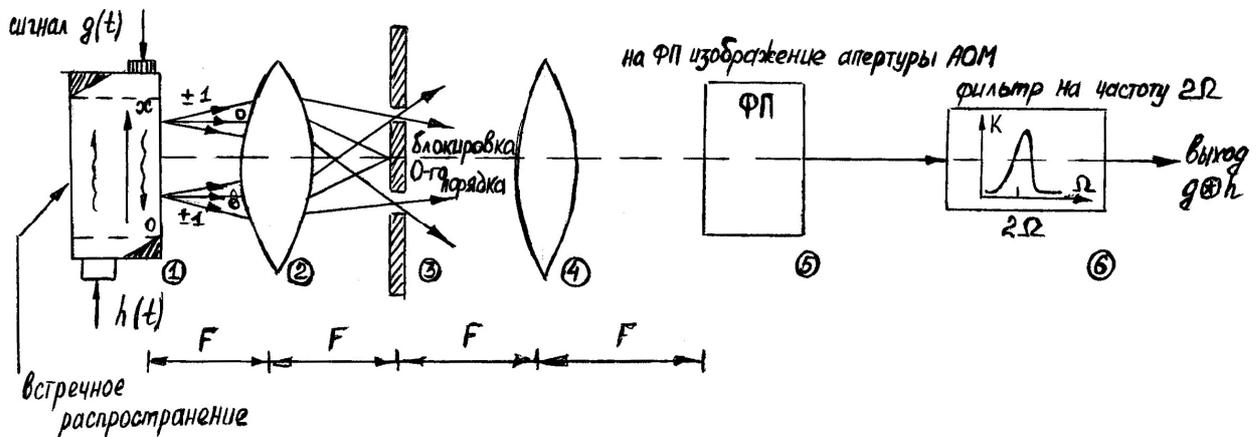


Рис. 10.6. Акустооптический процессор: 1 – двухканальный АОМ с встречным распространением акустических пучков; 2,4 – линзы; 3 – полосовой пространственный фильтр, блокировка нулевого порядка; 5 – фотоприемник; 6 – фильтр с центральной частотой 2Ω .

Замечание 2: В процессоре используются первые порядки дифракции,

следовательно, амплитуда оптической волны: $A_{\pm 1} = J_{\pm 1}(\phi)$

поэтому $\Phi = \frac{\Delta n \cdot L}{\lambda} \cdot 2\pi$, где Φ - фазовый набег (возмущение) на длине L

из-за изменения Δn . При малых возмущениях $\Phi \ll 1$ и $A_{\pm 1} \sim \pm \Phi$.

Если сигнал на выходе АОМ имеет сложный спектральный состав, то каждая из его составляющих дает свой вклад в дифракционное поле каждого из дифракционных порядков. На выходе АОМ существует 3 порядка: 0, +1, -1.

После прохождения последовательно через два тонких АОМ световая волна будет иметь вид:

$$A = \exp\{j[2\pi\nu t + \Phi_{\Sigma}(x, t)]\} \approx \exp(j2\pi\nu t) \cdot [1 + j\Phi_{\Sigma}(x, t)], \text{ где}$$

$$\Phi_{\Sigma}(x, t) = \Phi_0 \left\{ h\left(t - \frac{x}{V}\right) \cdot \cos\left[\Omega\left(t - \frac{x}{V}\right)\right] + g\left(t + \frac{x}{V}\right) \cdot \cos\left[\Omega\left(t + \frac{x}{V}\right)\right] \right\}$$

– фаза световой волны на выходе АОМ;

g – анализируемый сигнал, h – опорный сигнал, Φ_0 – постоянная, зависящая от мощности акустической волны, Ω – несущая частота сигналов.

С помощью пространственного фильтра (транспаранта) блокируется "0"-й порядок (в фокальной плоскости линзы Л1). Вторая линза Л2 осуществляет обратное преобразование Фурье и (поэтому) формируется изображение АОМ (в дифрагированном свете), с распределением интенсивности:

$$I(x, t) = \Phi_0^2 \left| h\left(t - \frac{x}{V}\right) \cdot \cos\left[2\Omega\left(t - \frac{x}{V}\right)\right] + g\left(t + \frac{x}{V}\right) \cdot \cos\left[2\Omega\left(t + \frac{x}{V}\right)\right] \right|^2$$

Фотоприемник с широкой апертурой X выполняет интегрирование этого распределения интенсивности по координате x :

$$i_{\phi n}(t) = \Phi_0^2 \int_0^X \left[\frac{1}{2} h^2 \left(t - \frac{x}{V} \right) \left\{ 1 + \cos \left[2\Omega \left(t - \frac{x}{V} \right) \right] \right\} + \frac{1}{2} \cdot g^2 \left(t + \frac{x}{V} \right) \left\{ 1 + \cos \left[2\Omega \left(t + \frac{x}{V} \right) \right] \right\} \right] dx + \\ + \Phi_0^2 \int_0^X g \left(t + \frac{x}{V} \right) \cdot h \left(t - \frac{x}{V} \right) \cdot \frac{1}{2} \cos(2\Omega t) dx + \Phi_0^2 \int_0^X g \left(t + \frac{x}{V} \right) \cdot h \left(t - \frac{x}{V} \right) \cdot \frac{1}{2} \cos \left(2\Omega \frac{x}{V} \right) dx$$

Примечание: Здесь было раскрыто произведение $h \cdot \cos(\dots) \cdot g \cdot \cos(\dots)$.

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \left[\cos \frac{\alpha + \beta}{2} + \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \right]; \quad \int_0^{X_{\phi n}} g \cdot h \cdot \cos \left(2\Omega \frac{x}{V} \right) dx \approx 0.$$

Когда $X \gg \Lambda$, все члены $i_{\phi n}$, содержащие сомножители вида $\cos \left(2\Omega \frac{x}{V} \right)$, при интегрировании дают значения, близкие к нулю. В этом случае из шести слагаемых останутся три:

$$i_{\phi n}(t) = \frac{\Phi_0^2}{2} \int_0^{X_{\phi n}} \left[h^2 \left(t - \frac{x}{V} \right) + g^2 \left(t + \frac{x}{V} \right) \right] dx + \frac{\Phi_0^2}{2} \cdot \cos 2\Omega t \cdot \int_0^{X_{\phi n}} g \left(t + \frac{x}{V} \right) \cdot h \left(t - \frac{x}{V} \right) dx.$$

Второе слагаемое представляет собой свертку сигналов g и h , наложенную на несущую частоту 2Ω . Фильтр на выходе ФП пропускает частоты, лежащие в окрестности 2Ω , поэтому свертка отделяется от медленно меняющегося первого слагаемого.

Это - процессор с интегрированием по пространству. Окно интегрирования: $T_{\text{экр}} = \frac{2 \cdot X_{\phi n}}{V}$.

Применение движения сигнала в АОМ позволяет реализовать свертку "естественным образом" - при движении акустической волны $s \left(t - \frac{x}{V} \right)$, являющейся копией радиосигнала $u(t)$. Для выполнения в процессоре корреляционной обработки один из сигналов g и h должен быть инвертирован во времени.

**Акустооптический коррелятор с временным интегрированием
(с двумя АО модуляторами и встречными акустическими пучками,
режим Брэгга).**

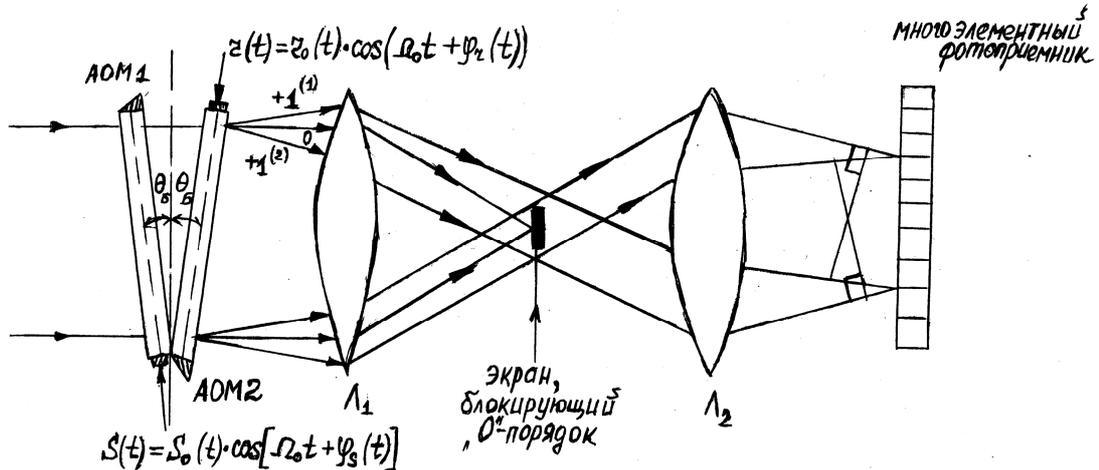


Рис. 10.6. Схема АО-процессора.

AOM1 и AOM2 – два одинаковых АО-модулятора, они работают в режиме дифракции Брэгга. АОМ развернуты на угол Брэгга, поэтому после каждого АОМ образуются только "+1"-ые порядки дифракции.

Линзы Л1 и Л2 формируют изображения апертур АОМ в дифрагированном свете в плоскости многоэлементного фотоприемника ФП (линейки). В процессоре используется ФП с интегрированием сигнала во времени (ПЗС - фотоприемник).

Световое поле в плоскости ФП:

$$a(x, t) = a_s \cdot s\left(t - \frac{x}{V}\right) \cdot e^{[j(\Omega_0 t - K_0 x)]} + a_r \cdot r\left(t + \frac{x}{V}\right) \cdot e^{[j(\Omega_0 t + K_0 x)]},$$

где a_s, a_r – некоторые константы, $K_0 = 2\pi \cdot \xi_0$, ξ_0 – пространственная

частота несущей, $\xi_0 = \frac{1}{\Lambda_0} = \frac{f_0}{V}$, $\Omega_0 = 2\pi \cdot f_0$

Сигнал (заряд), накопленный каждым элементом фотоприемника за

время T_H :
$$Q(x) \sim \int_0^{T_H} |a(x, t)|^2 dt.$$

$$Q(x) \approx a_s^2 \int_0^{T_H} s_0^2 \left(t - \frac{x}{V} \right) dt + a_r^2 \int_0^{T_H} r_0^2 \left(t + \frac{x}{V} \right) dt +$$

$$+ 2a_s a_r \cdot \operatorname{Re} \left\{ \exp(-j2k_0 \cdot x) \times \int_0^{T_H} \dot{s} \left(t - \frac{x}{V} \right) \cdot \dot{r}^* \left(t + \frac{x}{V} \right) dt \right\}.$$

Здесь $\dot{s}(t) = S_0(t) \cdot e^{j\varphi_s(t)} \cdot e^{j\Omega_0 t}$; $\dot{r}(t) = r_0(t) \cdot e^{j\varphi_r(t)} \cdot e^{j\Omega_0 t}$, где S_0 , r_0 – амплитуда сигналов; φ_s, φ_r – фаза сигналов; Ω_0 , – несущая частота.

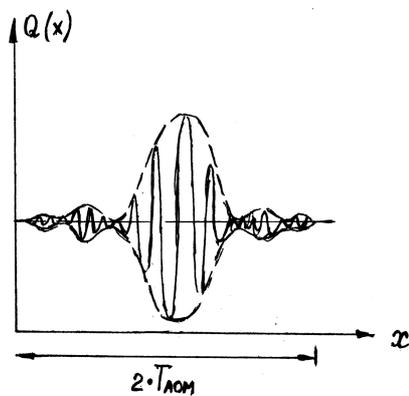
$$Q(x) = a_s^2 E_s + a_r^2 \cdot E_r + 2a_s a_r \operatorname{Re} \left[\exp(-j2K_0 x) R_{sr} \left(\frac{2x}{V} \right) \right],$$

где E_s и E_r – энергия сигналов, R_{sr} – ВКФ (взаимно корреляционная функция) сигналов. ВКФ "наложена" на пространственную несущую $\cos(2K_0 x)$, которая представляет собой интерференционные полосы, возникающие при регистрации суммы двух волн одинаковой частоты $\nu + f_0$, ориентированных под углом $4\theta_B$ друг относительно друга.

Два первых слагаемых обращаются в константы, если T_H – достаточно велико, т.е. $T_H \gg T_{АОМ}$. А третье слагаемое – это кросс-корреляция сигналов $s(t)$ и $r(t)$, вычисляемая во временном окне $2T_{АОМ}$. Вид зарегистрированного многоэлементным фотоприемником выходного распределения $Q(x)$ показан на рисунке ниже. Взаимно – корреляционная функция, наблюдается на ВЧ пространственной несущей $\cos\left(2\Omega \cdot \frac{x}{V}\right)$.

Длительность обрабатываемых сигналов в этой схеме не ограничена временной апертурой $T_{АОМ}$.

База обрабатываемых сигналов $B = \Delta f_{AOM} T_H \sim 10^4 \div 10^6$ и более. Если $T_H \sim 10^{-2} \text{ с}$ и $\Delta f \approx 100 \text{ МГц} \sim 10^8 \frac{1}{\text{с}}$, то $B \sim 10^6$.



Глава 11. Моделирование в среде GLAD

GLAD - General Laser Analysis and Design - <http://www.aor.com>

AOR - Applied Optics Research

Программные среды для моделирования и разработок оптических систем

1. Optical Research Associates, www.opticalres.com

Code V – программа расчета и проектирования оптических систем.

LightTools – программа 3D моделирования и анализа осветительных систем.

2. Lambda Research Corporation www.lambdares.com

Oslo – программа расчета и проектирования оптических систем. Программа OSLO (Optics Software for Layout and Optimization) предназначена для определения оптимальных размеров и форм элементов оптических систем фото- и видеотехники, систем связи, научных приборов и т.д. Кроме того, она используется для оценки качества оптических систем и для разработки специализированного программного обеспечения для оптического конструирования, тестирования и производства.

Trace Pro – программа оптико - механического моделирования и анализа оптических систем. Позволяет создавать трехмерные модели оптико-механических систем и проводить анализ распределения освещенности в системе, учитывая рассеяние, отражение, поглощение, дифракцию света. Трассировка лучей методом Монте-Карло. Поддерживает экспорт/импорт во все известные 3D форматы и импорт из Zemax, CodeV, Oslo.

3. ZEMAX Development Corporation

ZEMAX – программа расчета и проектирования оптических систем. ZEMAX содержит огромную базу данных по характеристикам различных видов стекол, способен рассчитать сложнейшую конструкцию из систем

линз, зеркал, дифракционных решеток, интерференционных и абсорбционных светофильтров и прочих элементов. Он отображает ход лучей в таких системах, наглядно изображая поведение лучей в различных участках спектра, рассчитывает aberrации системы, ее разрешающую способность, потери света и множество других параметров.

4. Optical System Design Inc. www.osdoptics.com

SYNOPSIS – Программа расчета оптических систем.

5. Breault Research Organization www.breault.com

ASAP – программа для моделирования и анализа оптических и осветительных систем

ReflectorCAD – программа для конструирования отражателей.

6. Focus Software Inc., USA www.focus-software.com

LensVIEW - Database of optical designs.

Во всех перечисленных программных средах моделирования и разработок оптических систем используются два метода расчета, основанные на применении теории волновой и геометрической оптики.

Методы распространяющихся пучков (beam propagation methods, BPM) представляют комплексную амплитуду оптического поля в поточечном базисе. **Они используют уравнения волновой оптики (функции дифракции Френеля) чаще всего в параксиальном приближении**, с учетом конечных апертур. Этот метод является основным в компьютерных программах при анализе распространяющихся лазерных пучков. Методы распространяющихся пучков может использоваться при расчете распространения с разложением по плоским волнам или с использованием метода конечных разностей. Такой подход позволяет наиболее полно исследовать оптический процессор. Метод распространяющихся пучков используется в программе GLAD.

Трассировка оптических лучей или лучевой метод, – излучение представлено набором лучей. Используются приближения геометрической оптики. Описание процессора сводится к построению матриц преобразований. Лучевые методы используются для традиционных оптических расчетов, где проектировщик меняет радиус, толщину, марку стекла, асферические коэффициенты и т.п. для минимизации и баланса оптических искажений. Сюда же можно отнести гибридный лучевой метод. Он дает дополнительную возможность учета интенсивности вдоль оптических лучей, так что можно анализировать рассеивание поверхностью, многогранные оптические сумматоры и другие оптические приложения.

Среда моделирования GLAD

GLAD является аббревиатурой General Laser Analysis and Design, разработан в компании Applied Optics Research (AOR). Целью при создании GLAD была разработка простой в применении программы, которая может моделировать любой тип системы, которая использует когерентный свет. GLAD может быть использован для анализа большого разнообразия оптических и лазерных систем. GLAD включает в себя большинство типов оптических элементов, в том числе линзы, зеркала, отверстия, многие виды решеток, светоделители и т.д.

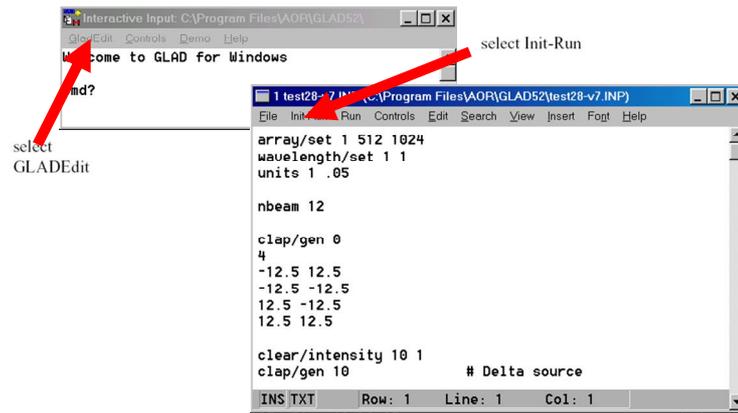
Распределение оптического излучения в оптических пучках представлено комплексным амплитудным распределением, что дает большую возможность анализа, чем геометрическая оптика - программы с представлением пучков набором (и трассировкой) лучей.

В пакете ПО представлено полное описание команд, элементов, примеров:

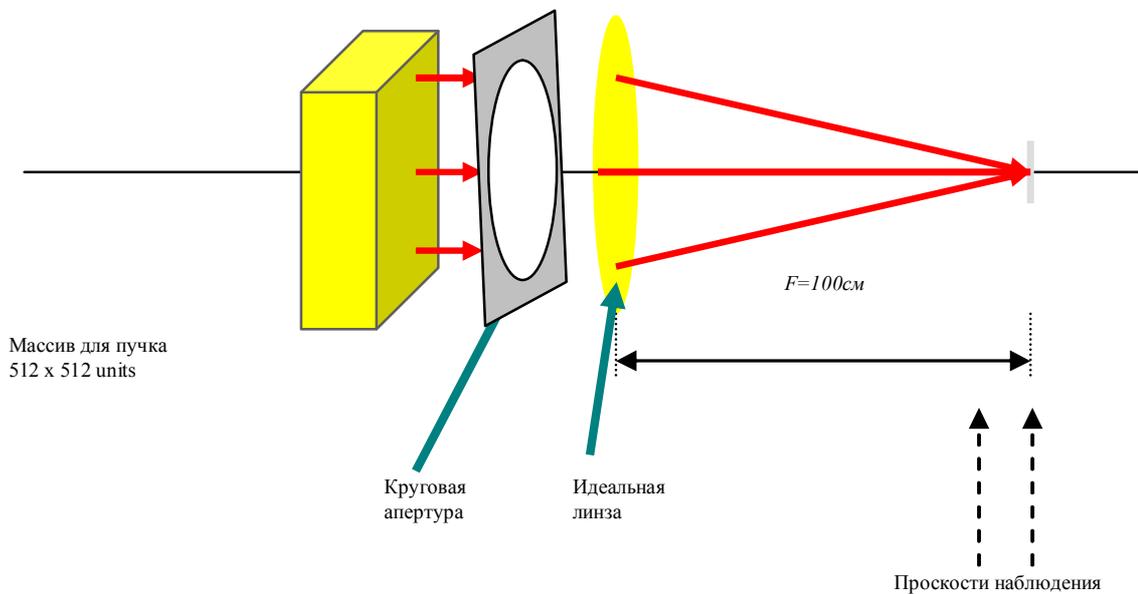
- commands
- examples
- guide
- license
- theory

- pdf
- pdf
- pdf
- txt
- pdf

Загрузка программы



Простой пример. Элементарный оптический процессор



array/set 1 512
wavelength 1 1.06

size of computer array to 512 x 512
set wavelength to 1.06 mkm

```

units/field 1 16      # set half-width of array to 16 cm
clap/cir/con 1 5.    # clear aperture of radius 5 cm
focallength = 100    # define and initialize a variable

lens 1 focallength    # set lens focal length using variable
set/window/rel 30 70 30 70 # set plot range for +-20% about center
title initial distribution
plot/bitmap/intensity/paintiso 1; pause

prop 99              # propagate 99 cm
title at 99 cm (1 cm from focus)
plot/bitmap/intensity/paintiso 1; pause
prop 1              # propagate 1cm
set/win/rel 48 52 48 52 # set plot range for +-2% about center
title at paraxial focus
plot/bitmap/intensity/paintiso 1

```

Пояснение команд

array/set 1 512 # Эта команда первая в программе. Она определяет размер массива для пучка 1 как 512 x 512. Массив любого размера должен быть определен.

wavelength 1 1.06 # Эта строка определяет длину волны для пучка 1 как 1.06 микрон.

units/field 1 16 # Устанавливает размер пучка - радиус 16 см. Команда `units 1 .005` устанавливает размер одной точки.

clap/cir/con 1 5. # Задаёт и очищает круговую апертуру радиусом 5 см (`clap/sqr` - квадратная апертура).

lens 1 focallength # Устанавливает линзу для пучка 1 с фокусным расстоянием `focallength`.

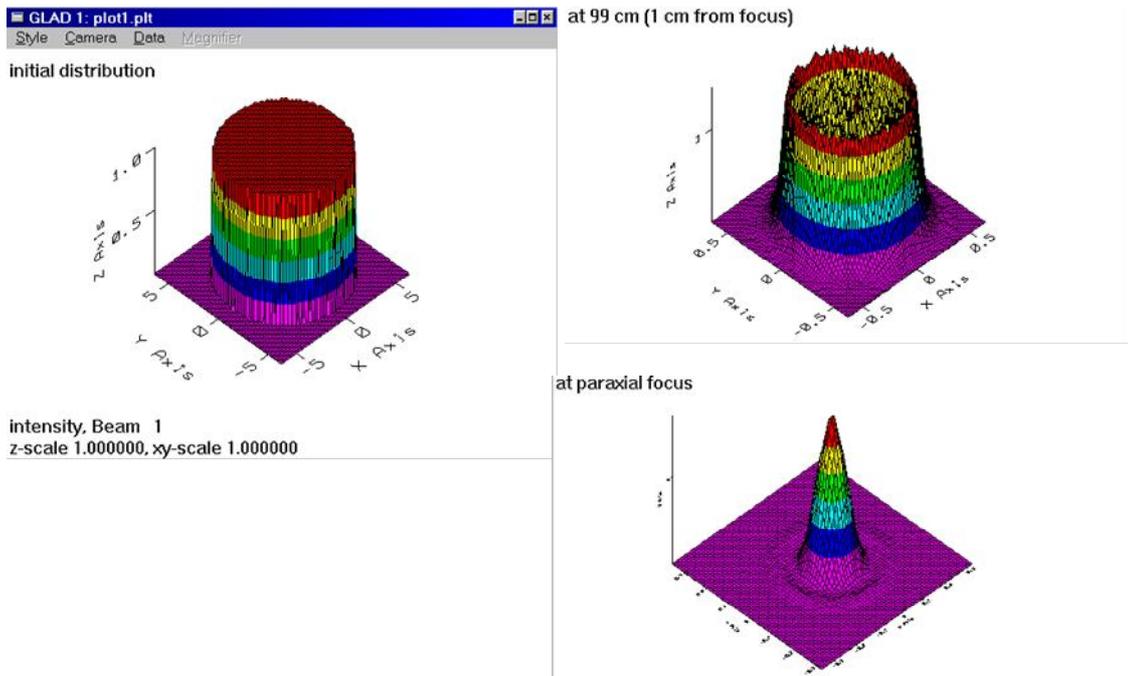
set/window/rel 30 70 30 70 # Устанавливает окно вывода в процентах от общей области.

title initial distribution

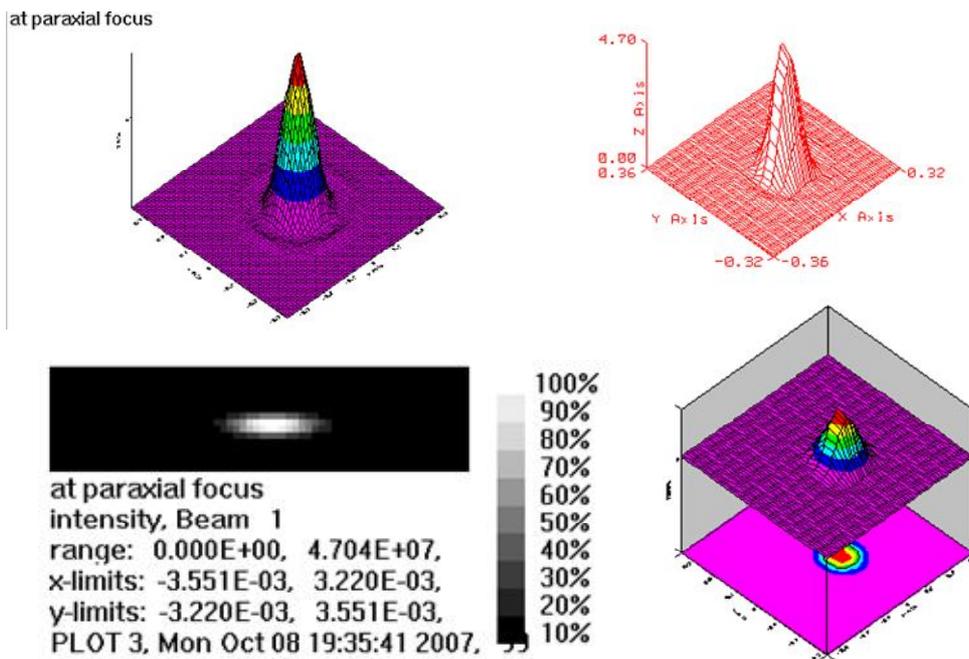
`plot/bitmap/intensity/paintiso 1 #` Выводит распределение интенсивности пучка из заданного окна.

`prop 99 #` Пучок распространяется на 99 см с учетом параксиального приближения.

Результаты моделирования



Форматы вывода



Некоторые оптические компоненты

ADAPT Adaptive mirror model.
 BINARY Binary optics.
 CLAP Implements a clear aperture
 CORNER Corner cube reflector
 CRYSTAL Anisotropic medium for propagation
 DOUBLE Frequency doubling.
 GLASS Properties of optical glass for Lensgroup
 GRATING Grating
 HIGHNA High numerical aperture lens
 HTML Control HTML viewer.
 JSURF Fresnel transmission and reflection coefficients
LENS Implements ideal lens.
 LENSARRAY Array of lenses
 MIRROR Ideal mirror
 NOISE Creates complex amplitude noise
 ROD Calculates wavefront rms.
 ROOF Roof prism

Команда установки линзы

```

lens/sph/element/(Modifier 3)    ibeams  f1
lens/xcyl/element/(Modifier 3)   ibeams  xf1
lens/ycyl/element/(Modifier 3)   ibeams  yf1
lens/toric/element/(Modifier 3)  ibeams  xf1 yf1
lens/sph/surface/(Modifier 3)    ibeams  radius index [(glass)]
lens/xcyl/surface/(Modifier 3)   ibeams  xradius index [(glass)]
lens/ycyl/surface/(Modifier 3)   ibeams  yradius index [(glass)]
lens/toric/surface/(Modifier 3)  ibeams  xradius yradius index [(glass)]
lens/flat/surface                ibeams  index
lens/grin                        ibeams  gamma zstep
  
```

Modifier 1	Definition		
/sph	Rotationally symmetric thin lens (2nd order accuracy).		
/xcyl	Cylindrical thin lens.		
/ycyl	Cylindrical thin lens.	ibeams	Beam number.
/toric	Toric thin lens (2nd order accuracy)	f1	Focal length of rotationally symmetric thin lens.
/flat	Surface element having a flat surface	xf1	Focal length of x-cylindrical thin lens.
/grin	Gradient index lens.	yf1	Focal length of y-cylindrical thin lens.
		radius	Surface radius
		xradius	X-radius of cylinder or toric surface.
		yradius	Y-radius of cylinder or toric surface.

Команды распространения излучения (Propagation)

- BEAMS Turns on/off beams for global commands.
- DIST Diffraction propagation step.
- PACK Packs data for some nonlinear optic commands
- PROP Diffraction propagation in global coordinates.
- RDIST Obsolete command.
- ZONE Exend region of constant units.
- ZREFF Current location of Beam along chief ray.

Формат представления амплитудно-фазового распределения в световом пучке

В пакете GLAD амплитудно-фазовое распределение (АФР) в световом пучке в заданной плоскости представляется в виде массива отсчетов размерностью $2^n \times 2^n$, где n – целое число. Числа, описывающие световое поле в дискретных точках выбранной плоскости, являются комплексными и представлены в пакете в виде суммы вещественной и мнимой частей, то есть $E_{i,j} = \text{Re}(E_{i,j}) + i \cdot \text{Im}(E_{i,j})$

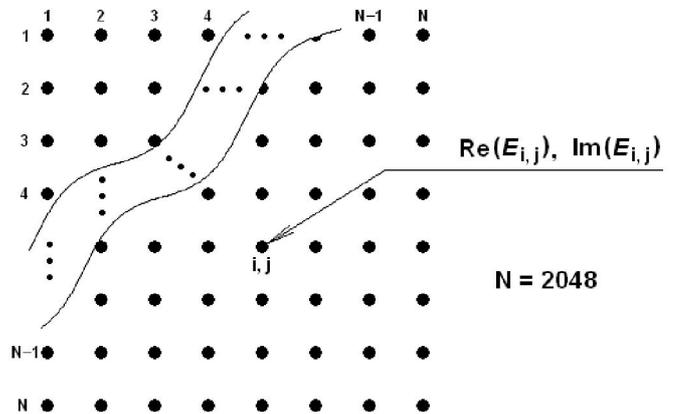
Замечание.

Представление комплексного числа:

$$Y = \text{Re} + j\text{Im} = A \cdot e^{j\varphi}$$

$$A^2 = \text{Re}^2 + \text{Im}^2 = A \cdot A^*$$

$$\varphi = \text{arctg}(\text{Im}/\text{Re})$$



Команды ввода/вывода данных амплитудно-фазового распределения

В GLAD предусмотрены команды ввода-вывода массивов данных в формате числа с плавающей точкой (float32). Формат числа в GLAD:

- бит 1. = 0, 1;
- биты 2-9= 0 .. 255;
- биты 10-32. = 0 .. 8 388 608;

Команды ввода вывода оптических распределений:

- CONNECT Reads beam data from an external file.
- DISCONNECT Copies beam data to external file.
- INFILE Reads beam data from an external file.
- OUTFILE Writes beam data to file.
- READ Select device from which to read commands.

connect/keep e:\sine1.bea 1 - связать 1-й пучок с внешним файлом без стирания входного файла. Необходимая последовательность команд:

```
array/set 1 64 64  
connect xxxx 1
```

Внешний файл должен содержать матрицу 64x64 элемента.

infile C:\Lab\letterA.dat 1 - чтение распределения из внешнего файла для 1-го пучка. Ключи, используемые в команде, позволяют читать разные форматы (в том числе BMP – 8бит) и для распределений: амплитуды, фазы, волнового фронта.

Пример формирования матрицы входного распределения и записи в файл

Формирование входных оптических распределений и вывод данных, полученных в GLAD, могут быть осуществлены в форматах пакетов MATLAB и Mathcad.

Пример записи матрицы распределения в MATLAB :

fid = fopen('e:\temp.mtl','wb'); ; Открытие файла на запись

for i = 1:SIZE

F = m*sin(i*200*pi/2048+Fi)*exp(-(i-C)*dx*log(k)); Задание закона изменения фазы.

fwrite(fid,cos(F),'float32') ; Запись вещественной и мнимой составляющих поля

fwrite(fid,sin(F),'float32') ; в файл для всех значений по координате x

end

Пример записи в файл матрицы выходного распределения

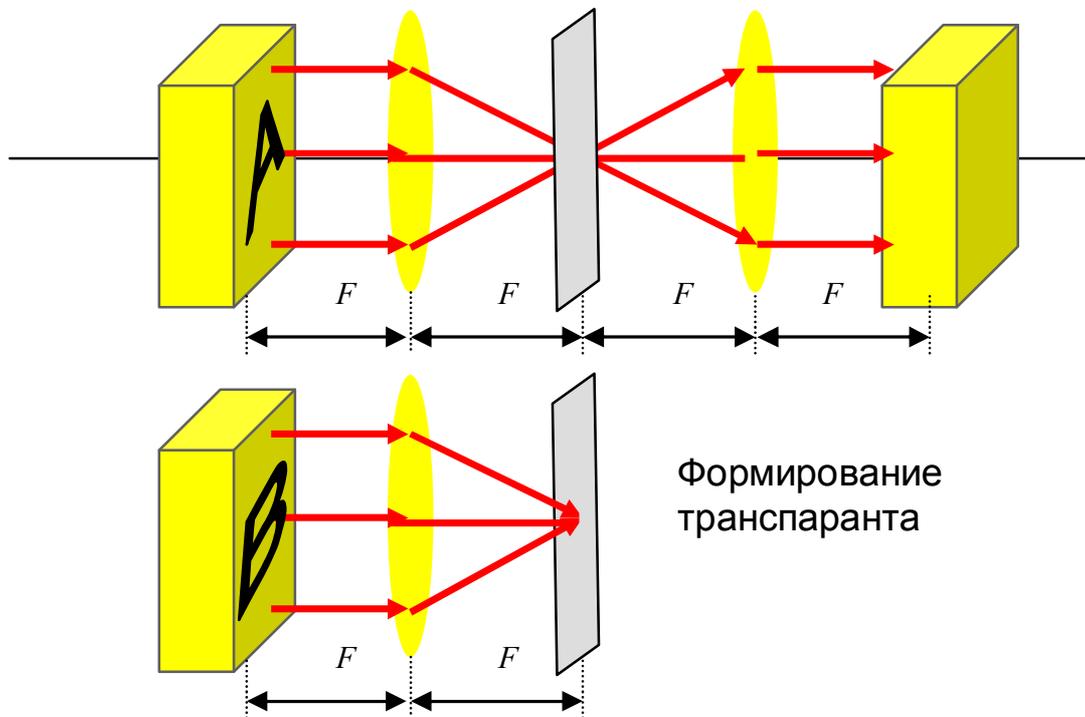
В пакете GLAD предусмотрена команда, записывающая массив интенсивности или фазы оптического пучка в выбранной плоскости в файл, формат записи которого совпадает с форматом PRN пакета Mathcad. Данная команда имеет следующий вид для записи значений интенсивности или фазы, соответственно:

outfile/intensity [имя файла]/noheader/excel [номер пучка]

outfile/phase [имя файла]/noheader/excel [номер пучка]

Оптический процессор свертки (пространственной фильтрации)

Транспарант -
перемножение



Программа вычисления свертки двух изображений, полученных из внешних файлов

```
array 1 128 128 1 # Создаем первый луч с картинкой
infile C:\Lab\letterA.dat/no/binary 1
array 2 128 128 1 # Создаем второй луч с картинкой
infile C:\Lab\letterA.dat/no/binary 2
plot/watch plot1.plt # Рисуем интенсивность первого луча
title Initial Ray1
plot/bitmap/intensity/paintiso 1
plot/watch plot2.plt # Рисуем интенсивность второго луча
title Initial Ray2
plot/bitmap/intensity/paintiso 2
convolve/front 1 # Преобразование Фурье для первого луча
convolve/front 2 # Преобразование Фурье для второго луча
plot/watch plot3.plt # Рисуем интенсивность преобразования Фурье
первого луча
```

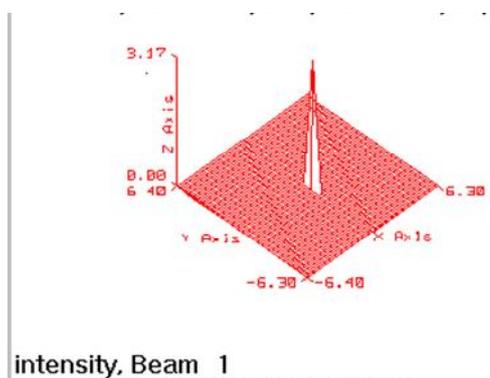
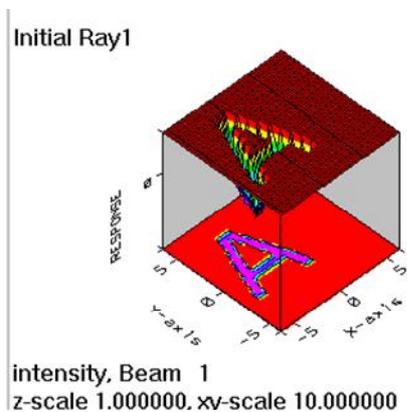
```

title Initial Ray1_intensity
plot/bitmap/intensity/paintiso 1
plot/watch plot4.plt # Рисуем интенсивность преобразования Фурье
второго луча
title Initial Ray2_intensity
plot/bitmap/intensity/paintiso 2
pause # Пауза
mult/beam 1 2 # Умножаем амплитуды лучей
#convolve/beam/fft 1 2
#add/coh 1 2
plot/watch plot3.plt
title Initial Ray1_intensity_Ray2_intensity_operation
plot/bitmap/intensity/paintiso 1
convolve/back 1 # Обратное преобразование Фурье
plot/watch plot4.plt
title Initial Result
plot/bitmap/intensity/paintiso 1

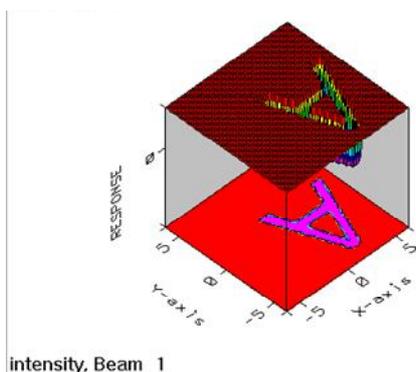
```

Результаты моделирования

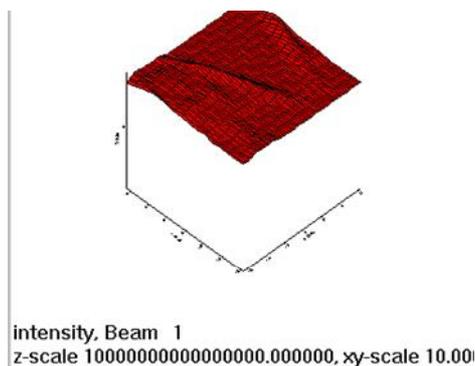
Преобразование Фурье



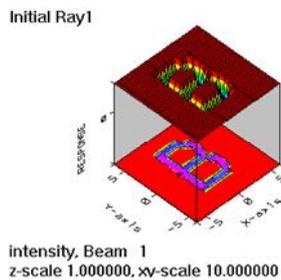
Обратное преобразование



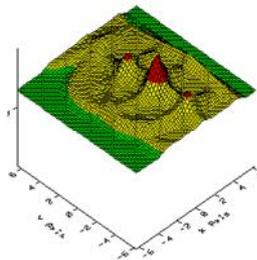
Свертка



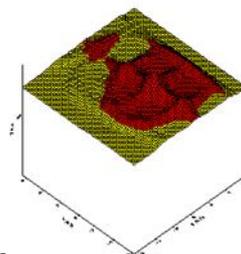
Первый и второй пучок



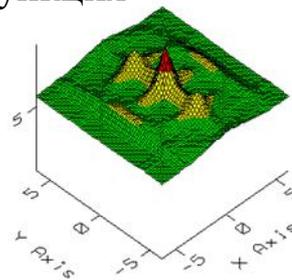
Интенсивность



Свертка



Корреляционная функция



В программе использованы команды:

irradiance kbeam - вычисление интенсивности света

$a(x,y) \rightarrow a(x,y)a(x,y)^*$

rotate kbeam theta - поворот на 180 градусов первого пучка

(корреляционная функция)

Для получения большей амплитуды корреляционного пика необходимо использовать согласованный или фазовый фильтры.

Согласованный фильтр — линейный оптимальный фильтр, построенный исходя из известных спектральных характеристик полезного сигнала и шума. Передаточная функция согласованного фильтра:

$$A^* \exp(-j\phi)$$

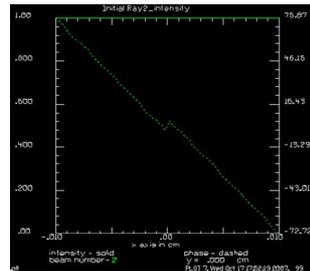
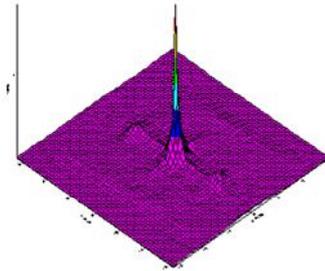
Фазовый фильтр — фильтр, пропускающий все частоты сигнала с равным усилением, однако изменяющий фазу сигнала. Происходит это при изменении задержки пропускания по частотам. Передаточная функция фазового фильтра: $1^* \exp(-j\phi)$. Вычисление фазового фильтра:

$$A^* \exp(-j\phi)/A$$

Вычисление в GLAD:

amplitude/abs	- взятие амплитуды A
inverse	- деление $1/A$
conjugate/amplitude	- преобразование в компл сопряж пучок
mult/beam	- умножение

Результаты свертки с фазовым фильтром



Список некоторых команд GLAD

1. Command: **ADD** Adds beams coherently or incoherently.
2. Command: **AMPLITUDE** Takes square root or real part of distribution.
3. Command: **ARRAY** Defines beam array size and polarization state.
4. Command: **CLAP** Implements a clear aperture.
5. Command: **CLAP/GEN** Implements a clear aperture of general shape.
6. Command: **CONJUGATE** Conjugates the beam.
7. Command: **CONNECT** Reads beam data from an external file.
8. Command: **CONVOLVE** Convolves beam with a smoothing function.
9. Command: **COPY** Copies one beam to another.
10. Command: **DISCONNECT** Copies beam data to external file.
11. Command: **ENERGY** Calculate the total energy (or power).
12. Command: **FIELD** Displays table of complex amplitude values.
13. Command: **GAUSSIAN** Set beam to gaussian function.
14. Command: **GRATING** Grating.
15. Command: **INFILE** Reads beam data from an external file.
16. Command: **INT2PHASE, INT2WAVES** Converts irradiance function to phase screen.
17. Command: **INTEGRATE** Integrates intensity or amplitude.
18. Command: **INVERSE** Calculates inverse of beam distribution.
19. Command: **MULT** Multiply the beam by a constant or another beam.
20. Command: **NOISE** Creates complex amplitude noise.
21. Command: **NORMALIZE** Normalizes non-zero values in beam.
22. Command: **OBS** Implement obstruction.
23. Command: **OPTIMIZE** Damples least squares optimization.
24. Command: **OUTFILE** Writes beam data to file.
25. Command: **PEAK** Sets and displays peak irradiance.

26.	Command:	PHASE	Piston and random phase aberration.
27.	Command:	PHASE/PISTON	Adds piston error.
28.	Command:	PHASE/RANDOM	Adds smoothed random phase.
29.	Command:	PHASE/SCREEN	Adds smoothed random phase (quick).
30.	Command:	PHASE2INT	Converts phase distribution to intensity distribution.
31.	Command:	PLOT	Various graphical plots. Diagnostics
32.	Command:	PLOT/XSLICE	Plot a slice through x-direction.
33.	Command:	RESCALE	Rescale the beam distribution in the array.
34.	Command:	ROTATE	Rotate distribution in the array.
35.	Command:	SINC	Define sinc function.
36.	Command:	TITLE	Defines the plot title.
37.	Command:	UDATA	Create and display summary plots
38.	Command:	UNIFORMITY	Calculate irradiance nonuniformity
39.	Command:	UNITS	Set and display sample spacing
40.	Command:	VARIABLES	Declare and set variable values.
41.	Command:	WAVELENGTH	Set and display beam wavelength
42.	Command:	WAVES2INT	Wavefront transformed to intensity

Библиографический список

1. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. М.: Высш. школа, 1988.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970
3. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М.:Изд-во Моск.ун-та, 1987. 142с.
4. Информационная оптика./ Н.Н. Евтихийев, О.А. Евтихьева, И.Н. Компанец и др.- М.Изд. МЭИ.- 2000.- 612с.
5. Holst G.C., Lomheim T.S. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems. SPIE Press, 2007.- 376p.
6. Молодяков С.А. Системное проектирование оптоэлектронных процессоров обработки сигналов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.- 226 с., ISBN 978-5-7422-3016-8.
7. Ушаков В.Н. Акустооптические процессоры корреляционного типа. – М.: Радиотехника, 2007.- 184с
8. Vanderlugt A. Optical Signal Processing.- New York.: Wiley-interscience, 2005.- 632p.
9. Богатырева В.В., Дмитриев А. Л. Оптические методы обработки информации / Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 74 с.

Электронные ресурсы

10. <http://www.cn.ru/edu/physics/optics/>
11. <http://www.thirdwave.de/3w/tech/optical/ EnLight256.pdf>
12. http://download.micron.com/pdf/flyers/mt9t111_flyer.pdf
13. <http://www.idtvision.com/imaging/m5.php>
14. <http://dvo.sut.ru/libr/rts/i143emdi/vved.htm>
15. <http://www.optics.ru/info/ooi/>
16. <http://dfe.karelia.ru/koi/posob/optproc/>
17. <http://www.optdesign.narod.ru/programs.htm>
18. www.aor.com
19. <http://lid.bmstu.ru/rus/links.html>
20. <http://www.wavesimsoft.ru/index.html>