

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-125-138

### УПРАВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИМИ ПУЧКАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗАИМНО ДОПОЛНЯЮЩИХ СКАНАТОРОВ

**В.Г. Выскуб**, гл. научн. сотр. ФГБУ НИИ РИНКЦЭ, д-р техн. наук, проф.,  
vyskub08@mail.ru

Рецензент: В.Е. Болнокин

*Решением задач управления оптическим сканирующим пучком в ряде приложений могут быть устройства на основе сканаторов (дефлекторов, сканеров) со взаимно дополняющими характеристиками. В работе рассмотрены оптико-механические, электронные, акустооптические, электрооптические, а также микроэлектромеханические (MEMS), микрооптические электромеханические (MOEMS) сканаторы в качестве составляющих устройств комбинированного сканирования. Приведены качественные показатели составного сканирования, в том числе быстродействия, разрешения, точности управления оптическим пучком, размеры сканируемого пространства и др. Наряду с преимуществами отмечены сложности, возникающие при реализации комбинированного сканирования.*

**Ключевые слова:** составной сканатор, оптико-механический сканатор, акустооптический дефлектор, электрооптический дефлектор, магнитоэлектрический привод, оптическое согласование, динамические характеристики.

### CONTROLLING OPTICAL BEAMS USING MUTUALLY COMPLEMENTARY SCANNERS

**V.G. Vyskub**, Chief Researcher, SRI FRCEC, Ph. D., Professor, vyskub08@mail.ru

*Devices based on scanners (deflectors, scanning devices) with mutually complementary characteristics can be a solution to control problems of an optical scanning beam in a number of applications. The paper considers optical-mechanical, electronic, acousto-optical, electro-optical, as well as microelectromechanical (MEMS), micro-optical electromechanical (MOEMS) scanners as components of combined scanning devices. The qualitative indicators of composite scanning, including the speed, resolution, control accuracy of the optical beam, the dimensions of the scanned space, etc., are given. Along with the advantages, the difficulties arising in the implementation of combined scanning are noted.*

**Keywords:** composite scanner, optical-mechanical scanner, acousto-optical deflector, electro-optical deflector, magnetoelectric drive, optical matching, dynamic characteristics.

#### Введение

Инструментом управления оптическими пучками являются сканаторы, выбор которых определяется их достоинствами в отношении наиболее важных характеристик для решения задачи и удовлетворительными для этого решения остальными характеристиками. Анализ известных методов и устройств сканирования показывает сложность определения лучшего по всем характеристикам устройства и необходимость принятия в связи с этим компромиссных решений. Средством улучшения процессов сканирования может быть использование взаимно дополняющих сканаторов, основанных на различных принципах работы.

Избирательное сочетание сканаторов позволяет улучшить такие характеристики систем, в составе которых они работают, как пространственное разрешение и быстродействие, точность перемещения оптического пучка, расширить спектральный оптический диапазон и др. В то же время при организации составного сканирования необходимо учитывать особенности сопрягаемых устройств отклонения пучков, их приводов, измерительных систем, обеспечивать динамическое, точностное и алгоритмическое согласование, проводить в некоторых случаях сложную юстировку элементов оптических схем.

В статье рассматриваются технические решения составного сканирования для прикладных задач считывания и воспроизведения информации в научных исследованиях, медицине, биологии, технологиях материалообработки и др.

### **Основные характеристики типовых сканаторов**

Выбор комбинации сканаторов ограничен их предельными техническими характеристиками [1]. Для зеркальных систем предельная разрешающая способность достигается возможностями создания фокусирующей оптикой на заданном поле пятна минимального диаметра, исключением искажений, вносимых самим сканатором, путем повышения качества отражающей поверхности, увеличения размеров зеркала сканатора. В зависимости от привода (пьезоэлектрический, магнитоэлектрический, электростатический и др.) возникают ограничения быстродействия, размеров и массы отклоняющих зеркал. Величина максимального разрешения ограничена дифракционным пределом.

Преимущество зеркальных систем заключается в возможности одновременной работы в различных диапазонах спектра, высоком коэффициенте отражения, зависящем от зеркального покрытия и длины волны падающего излучения. При соответствующей обработке сверхгладких зеркальных поверхностей со средним квадратическим значением шероховатости до  $100 \text{ \AA}$  коэффициенты отражения составляют не менее 99 % [2]. Зеркальные системы позволяют работать с пучками широкого диапазона сечения. Для достижения высокой точности адресации и стабилизации светового пучка применяются замкнутые по углу системы с прецизионными измерителями и соответствующими законами управления. Ограничение световой мощности зеркальных устройств связано с возникающей тепловой неустойчивостью, которая зависит от длительности воздействия, параметров излучения и оптической среды. Так, по результатам экспериментов [3] стекло К8 с диэлектрическим покрытием имеет лучевую прочность до  $32 \text{ Дж/см}^2$  (длина волны – 1,054 мкм, длительность импульса излучения – 3 нс). Развитие технологий микроэлектроники привело к созданию микроэлектромеханических систем, элементами которых являются создаваемые в едином технологическом процессе микрзеркала, микроактюаторы, микролинзы, управляющие микросхемы и др. Одновременно формируются твердотельные источники излучения. Пленочные отражатели позволяют получить высокое быстродействие с временем переключения состояний до 20 нс [4]. Интегральная технология дает возможность создавать как одномерные, так и двумерные микросканеры.

В электрооптических и акустооптических дефлекторах (ЭОД, АОД) механические перемещения отсутствуют, что определяет их высокое быстродействие (угловые скорости отклонения пучка – в десятки тысяч рад/с) и, таким образом, существенное преимущество по сравнению с зеркальными сканаторами, но такие дефлекторы уступают им в угловых отклонениях и разрешении. Быстродействие ЭОД ограничено временем перезаряда емкости между управляющими электродами. Для управления ЭОД необходимо иметь высокие управляющие напряжения при значительной мощности устройства управления. Указанное обстоятельство приводит к нагреванию кристалла, дестабилизации дефлектора, уменьшению его разрешающей способности, ограничению реального быстродействия ЭОД. Погрешности отклонения пучков непрерывных электрооптических дефлекторов определяются точностью поддержания высоковольтного напряжения на управляющих электродах. Технические

характеристики ЭОД зависят от конструкции и типа электрооптического материала. Так, ЭОД на основе кристаллов танталат-ниобата калия (КТН) [5] в ближнем инфракрасном диапазоне имеют максимальный угол отклонения до 0,2 рад при напряжении 300 В, светопропускание – около 90 %, порог разрушения превышает 1 Дж/см<sup>2</sup> [6]. Область прозрачности – от 532 до 4000 нм. В КТН-кристаллах выявлена деформация формы пятна в зависимости от угла отклонения и плотности энергии лазерного излучения [7].

Физический предел увеличения апертуры АОД, необходимого для повышения разрешения, связан с временем установления акустической волны по всей апертуре светового пучка. Минимальный размер элемента разложения определяется дифракцией и зависит от ширины падающего пучка и длины световой волны. Возмущениями в работе АОД являются температурные градиенты вследствие выделения тепла в его элементах, что приводит к снижению разрешающей способности. Зависимость эффективности дифракции от акустической мощности дает возможность управлять энергией отклоняемого пучка. Погрешность отклонения пучка определяется точностными возможностями задающего частотного генератора. По данным [8], оптический диапазон пропускания разработанных АОД на основе парателлурита составляет 530–540; 630–850; 700–1100; 1064–1330 нм, оптическая апертура – до 20 мм, углы отклонения – до 60 мрад, эффективность дифракции – 70–85 %. Лучевая прочность кристалла – 200 МВт/см<sup>2</sup> (длина волны излучения – 1064 нм, длительность и частота импульсов – 12 нс и 1 Гц соответственно).

Матричные фотоприемники позволяют получить электронную развертку изображения и все изображение в целом, спектральную картину источников излучения. Основанные на общем физическом принципе преобразования световой энергии в электрический заряд приборы с зарядовой связью (ПЗС) и комплиментарные структуры «металл – оксид – полупроводник» (КМОП-структуры) выполняются с использованием различных принципов передачи информации и технологий изготовления, определяющих их технические возможности. Так, быстродействие широко распространенных ПЗС характеризуется частотами считывания в десятки мегагерц. Частота считывания информации в ПЗС ограничена скоростями работы регистров сдвига. Спектральный диапазон ПЗС определяется прохождением света через электроды и квантовой эффективностью применяемого материала. Чувствительность ПЗС на кремниевой подложке лежит приблизительно в диапазоне 0,4–1,1 мкм. Некоторые параметры ПЗС-сенсора Sony ICX 674 AQQ: размер активной области – 8,8×6,6 мм, разрешение – 1940×1460 пикселей, размер пикселя – 4,54 мкм, динамический диапазон – 71 дБ, отношение «сигнал/шум» – 44 дБ, частота кадров – 57 кадров в секунду [9].

КМОП-структуры потребляют меньше энергии, имеют возможность произвольного доступа к любому элементу, имеют более высокую, чем ПЗС, частоту кадров, позволяют создание датчика изображения на основе одного кристалла [10]. Уменьшение размеров фоточувствительных элементов и, соответственно, разрешение связаны с возможностями технологии. Спектральный диапазон КМОП-структур на кремнии такой же, как у ПЗС. Так, КМОП-сенсор компании OmniVision OV2710-1E имеет параметры: оптический формат – 1/2.7", разрешение – 1920×1080 px, размер пикселя – 3×3 мкм, частота кадров – 30 кадров в секунду. Сенсор имеет развитую функциональную структуру [11].

Для создания формирователей изображения в условиях плохой видимости, обнаружения скрытых объектов, ведения целеуказания активно разрабатываются и производятся инфракрасные болометрические фотоприемники, ведутся исследования перспективных материалов в части снижения размеров чувствительных элементов, стабильности и оптимальности характеристик, совместимости с КМОП-технологией. На основе оксида ванадия созданы матрицы форматом 2048×1536 px с размером пикселя 17 мкм (компания Raytheon, США). Преимущество таких матричных фотоприемников – возможность работы без охлаждения. Тепловая постоянная времени для микроболометров, разработанных на основе современных материалов и технологий, составляет величину порядка 10 мс [12].

Характеристики некоторых типов сканаторов, главным образом коммерческих, со взаимно дополняющими характеристиками приведены в табл. 1, составленной по материалам [5, 6, 13–18].

Таблица 1

Технология сканирования (тип сканатора)	ЭОД (КТН) [5]	АОД [6]	Гальванометры [13]	Зерк. барабаны [16]*	Пьезосканаторы [6]	MEMS DMD DLP4500 NIR (700–2500 нм) [14]
Апертура, мм	0,5–1,0	5–25	25–50	5×5 6×6 12,0×16,3 80×250	10–25	Матрица микрзеркал, диагональ 11,4
Максимальный угол отклонения, рад (разрешение в точках)	0,2 (50)	0,05 (500)	0,7	0,35–3,14 (1930, 3670, 4900, 7570)	0,01–0,1 (100–1000)	±0,2 (912×1140) (пиксель 7,6×7,6 мкм)
Временная характеристика	1 мкс	1 мкс	1–5 мс (0,1°)	11 000–81 000 об/мин	103 мкс	16 мкс
Светопропускание	~90 %	60–85 %	Более 99 % (9,3–10,6 мкм)	88 % (633 нм)	Более 95 %	96 %

\* Данные по экспериментальным образцам типа «барабан – призма».

Характеристики ЭОД, АОД, DMD (Digital Mirror Device) указаны для ближнего инфракрасного диапазона излучения и дают представление о возможностях сканаторов в указанном диапазоне, используемых технологиях для применения в комбинированном сканировании. Помимо приведенных, существенны и другие характеристики, такие как точность, закон и линейность сканирования и др.

#### Анализ задач и технических решений комбинированного сканирования

При обработке изображений, представленных в виде фотографий, в ряде областей науки и техники возникают задачи поиска и проведения измерительных операций на выделенных объектах, оцифровки получаемой визуальной информации [19]. В измерительной установке Sweepnik<sup>1</sup> для обработки фотоснимков физического эксперимента использован лазерный луч. Сформированный лазерный пучок отклоняется по ортогональным осям координат кадра зеркалами с магнитоэлектрическим приводом. Требования к погрешности измерений по носителю изображения в 2 мкм определили необходимую дискретность измерения углового положения зеркал – около 0,1 угл. с. Для автоматического слежения по линиям и контурам в оптическую схему введен дополнительный сканатор на основе вращающейся призмы Дове с астигматической оптикой, формирующей микрорастр в виде сканирующего штриха, что отвечает специфике исследуемых объектов – треков ядерного взаимодействия. Устройство управления позволяет выполнять фильтрацию считанной информации, рассчитывать направление перемещения в режиме слежения. Задача управления заключается в формировании согласованных координатных воздействий зеркал для выполнения слежения и в пространственном перемещении микрорастра. Процесс управления сканированием и сбором данных осуществляется с помощью ЭВМ. Расширение функциональных возможностей

<sup>1</sup> Davies D.J.M., Frish O.R., Street G.S.B. Sweepnik: A Fast Semi-automatic Track Measurements Mashine. NIM. 1972. № 82. P. 54–60.

комбинированного сканирования в данной задаче сопровождается проблемой устойчивости слежения, которая зависит от качества снимка, степени его «зашумленности».

Техника телевидения и дисплеев предъявляет существенно разные требования к строчной и кадровой развертке. Сочетание скоростного строчного развертывающего устройства в виде зеркальной призмы или пирамиды и гальванометра для кадровой развертки позволяет достичь дисперсионной независимости отклоняемых пучков. Необходимое сочетание интенсивностей накладываемых пучков и, соответственно, цвета изображения достигается согласованной работой модуляторов. Характерным для оптической архитектуры устройств является пространственное разделение перед модуляцией излучений разных длин волн, создаваемых соответствующими лазерами, посредством дихроичных зеркал и оптических фильтров. Помимо высокой скорости строчной развертки для достижения высокой четкости требуются также ее стабильность, прямолинейность и параллельность строк. Для воспроизведения телевизионных изображений с использованием лазерного сканирующего устройства необходимо обеспечить синхронное со строчными синхроимпульсами перемещение лазерного пучка. Для этого требуются стабилизация механической развертки, применение в конструкции надежных прецизионных опор, работающих при высоких скоростях устройства развертки. Так, цветной лазерный дисплей [20], соответствующий стандарту HDTV 1920×1080, выполнен на основе 25-гранной зеркальной призмы строчной развертки (скорость вращения – 75 000 об/мин) и гальванометра кадровой развертки с частотой 30 кадров в секунду. В качестве опор использованы газовые подшипники. Угловая погрешность воспроизведения строки в направлении, перпендикулярном строчному движению, составляет 0,25 угл. с, погрешность системы стабилизации скорости – менее 5 PPM. Задачи управления сканаторами и модуляцией излучения требуют применения соответствующего вычислительного устройства.

Развитие технологий управляемых микрозеркал привело к созданию новых схем составного сканирования и возможностей для развертывания изображений. Оптическая схема мобильного дисплея, описанного в [21], включает микрооптический модулятор SOM (Spatial Optical Modulator) дифракционного типа с микрозеркалами, приводимыми пьезоприводом, отдельный одномерный зеркальный сканатор, лазерные источники излучения и проекционную оптику. Лазерные лучи источников красного, синего и зеленого излучения в устройстве модулируются для последовательного воспроизведения основных цветов в столбцах изображения, которые разворачиваются затем зеркальным сканатором горизонтальной развертки в изображение кадра. Качественное воспроизведение изображений требует высокого быстродействия микрозеркал. Одномерный массив микрозеркал с 480 рх (телевизионный стандарт VGA (640×480) с частотой 60 Гц) должен иметь частоту срабатывания около 150 кГц. Количество уровней для каждого цвета составляет 256. Благодаря быстродействию устройства высокое качество одномерного дисплея может быть достигнуто с меньшим количеством пикселей по сравнению с двумерными пространственными модуляторами. Управление подсистемами и дисплеем в целом выполняется контроллером.

Корректирующая функция строчного сканирования одновременно с задачей кадровой развертки реализована в комбинации зеркальной призмы строчной развертки с одномерным оптико-механическим сканатором с магнитоэлектрическим приводом кадровой развертки [22]. Устройство, предназначенное для прорисовки фотошаблонов, реализует в графопостроителе планшетного типа растровый принцип развертки лазерного пучка с высокой скоростью, а также позволяет осуществить коррекцию системных искажений, в том числе погрешностей, вызываемых пирамидальностью призмы. Для этого выполняется сканирование тестового образца, а вычисленные поправки служат затем, во время движения зеркала, управляющими воздействиями для сканатора кадровой развертки. Контроль и управление устройством выполняются с использованием двух отсчетных систем – для строчной развертки с использованием опорной решетки (цена отсчета – 12,5 мкм в плоскости носителя изображения)

и для кадровой развертки с использованием интерферометра (цена отсчета – 7,1 мкм). Электромеханический привод призмы снабжен системой стабилизации скорости вращения приводного двигателя. Замкнутая по углу сервосистема обеспечивает стабилизацию положения зеркала кадрового сканатора относительно задаваемого управляющей ЭВМ. Включение или выключение луча технологического лазера выполняется модулятором под управлением ЭВМ по координатам лазерного луча в соответствии с воспроизводимым рисунком. Необходимое качество прорисовки достигнуто за счет согласованной работы автономных систем управления. Описанное сканирующее устройство может быть использовано не только для воспроизведения графической информации, но и для считывания изображения с прозрачных носителей. В этом случае в фокальной плоскости оптической схемы вместо фотоматериала располагается носитель изображения. Оптическая схема дополняется располагаемыми за кадровым окном фокусирующей оптикой и фотоприемником, связанным с регистрами измерительных каналов. Режим считывания используется также графопостроителем для периодической калибровки графопостроителя.

Сочетание инерционных зеркальных сканаторов с более быстродействующими дефлекторами позволяет расширить функциональные возможности и повысить быстродействие интегрированного устройства. Составной сканатор для формирования «широкой строки» на плоском кадре на основе сочетания однозеркального двухкоординатного оптико-механического сканатора (ОЗС) исследован в работе [23]. Исследованная оптическая схема сканатора включала ОЗС и дополнительный магнитоэлектрический дефлектор. Отличительной особенностью ОЗС являются большие размеры зеркала (диаметр – около 100 мм), позволяющие работать с широкими пучками, фокусировать пучок на значительном расстоянии от выходной апертуры фокусирующей системы. Зеркало закреплено в кардановом подвесе и оснащено магнитоэлектрическим приводом. Контроль и управление ОЗС выполняются высокоточными автономными системами с интерференционными измерителями угловых перемещений (чувствительность ~0,1 угл. с в диапазоне до десятка угл. град.) [19]. Одномерный дополнительный магнитоэлектрический дефлектор осуществляет линейное микросканирование перпендикулярно основной строке. Высокоточные перемещения микроастро по командам системы управления выполняет ОЗС. При этом повышаются требования к формирующей оптике. Оптическая схема должна учитывать возникающее смещение пучка по поверхности зеркала ОЗС, а также расфокусировку пятна на сканируемой поверхности. В состав оптической схемы для коррекции расфокусировки включена короткофокусная линза с электроприводом. Объектами системы управления являются, помимо ОЗС, дополнительного дефлектора, также модулятор и блок фокусировки. В результате комбинированное устройство приобрело функцию микросканирования и быстродействие, близкое к быстродействию дополнительного дефлектора.

Комбинированное сканирование лазерным пучком реализовано в устройстве формирования изображения полосы или полноформатного печатного листа, зарегистрированных на фото или термочувствительном материале, для потребностей полиграфии [24]. Оптико-механический дефлектор обеспечивает одномерный растр, модулированный по яркости. Акустооптический дефлектор осуществляет отклонение луча на высоту текстовой строки и тем самым обеспечивает прорисовку линий шрифтовых знаков. Двумерное изображение создается за счет равномерного перемещения светочувствительного или термочувствительного материала ортогонально к оси растра. Система управления выводного устройства выполняет в числе задач также синхронизацию положения лазерного луча с интенсивностью луча в заданной точке.

Сочетание сканаторов электромеханического и «электронного» привода является эффективным средством взаимного дополнения и расширения возможностей сканаторов в отношении различных режимов развертки в технологических приложениях. Так, в установке формирования импульсным лазером топологии рисунка многослойной печатной платы

[25, 26] использовано комбинированное векторное сканирование, которое выполняется гальванометрами совместно с акустооптическими дефлекторами. Дефлекторы регулируют мощность облучения, выполняют дополнительное отклонение луча для формирования элементов топологии и исправляют ошибки гальванометров на участках излома траектории. Описанная схема основана на динамике АОД, а также на превышении динамического диапазона АОД диапазона возможных ошибок гальванометра. В процессе сканирования, регулируя мощность излучения технологического лазера, можно в реальном времени изменять ширину, глубину и форму прокладываемых в печатной плате трасс. Предложенная архитектура позволила формировать в диэлектрике микронную топологию, достичь на рабочей поверхности предельных для гальванометра скоростей сканирующего элемента – более 2 м/с, снизить ограничения на радиус поворота при сохранении повторяемости. Исследования [5] различных вариантов решения задачи обработки материалов ультракороткими лазерными импульсами с использованием «электронных» дефлекторов также показали, что комбинация АОД или ЭОД с гальванометром имеет большие возможности в отношении точности и скорости обработки, чем в случае однотипных дефлекторов.

Особенностями оптических схем лазерных технологических сканирующих систем для микрообработки материалов являются необходимость высокой концентрации энергии в зоне обработки и локального регулирования параметров лазерного нагрева, а также обратное воздействие продуктов обработки на качество пучка. В технологических целях может сочетаться совмещение энергетического воздействия мощным излучением и процесса диагностики оптическим пучком малой мощности, выполняемого более быстрым дефлектором. Сложность, многофакторность и высокая скорость технологических процессов обуславливают необходимость высокоточных систем синхронизированного управления модуляцией, перемещением, формой и ориентацией сканирующего пятна.

Специфика дистанционного зондирования земной поверхности – значительная удаленность сканатора от объектов зондирования, рассеяние, поглощение электромагнитного излучения от исследуемых объектов при прохождении в атмосфере. В задачу сканирующего устройства телевизионного спектрорадиометра космического аппарата входит высокое пространственное разрешение (менее 1 м при съемках суши с высоты 400–700 км), его адаптация к полосе обзора, спектральный анализ в широком диапазоне (0,4–12,0 мкм) [27]. Условия эксплуатации сканирующего устройства обуславливают необходимость минимизации его массы, габаритов и повышения надежности. Решением для соответствия высоким требованиям к оптической системе и фотоприемнику в [27] стало использование комбинированной системы сканирования изображения, в которой сочетаются двухкоординатный зеркальный сканатор и матричный фотоприемник, выполняющий электронную развертку в плоскости изображения. Особенность конструкции сканатора – большие размеры сканирующего зеркала ( $430 \times 80 \text{ мм}^2$ ), закрепленного в кардановом подвесе, приводимого электродвигателями-маховиками. Угловой диапазон сканирующего зеркала равен  $\pm 15$  угл. град., частота сканирования – около 1 Гц. Для получения качественного изображения предложена дополнительная система контроля положения визирной линии на основе позиционно-чувствительного элемента, использующая интерференционные измерители. Угловая чувствительность контроля положения сканирующего зеркала составляет величину менее 0,05 угл. с. Предельное разрешение оптико-электронной системы определяется разрешением объектива и размерами пикселя матричного фотоприемника.

Комбинация сканаторов нашла эффективное применение и в технике лазерной микроскопии. Так, в конфокальном лазерном сканирующем микроскопе выполняется процесс сканирования биологического образца в целях исследования потенциалов нейронов в живой ткани мозга, что требует высокого пространственного и временного разрешения [28]. Оптическая схема микроскопа включает двухкоординатный АОД и массив микрозеркал DMD. Искомая информация выделяется при сканировании АОД поверхности образца

последующим направлением линейкой микрозеркал флуоресцентного излучения зондируемых точек в детектор. При этом длина волны флуоресценции отлична от длины волны возбуждающего излучения. Следует отметить согласованность работы всей оптической системы, которая обеспечивается алгоритмом управления микрозеркалами и АОД. Управляющее устройство позволяет задавать для различных волн возбуждения положение луча на выходе АОД, которое наилучшим образом соответствует положению одного из микрозеркал массива. Выбранное микрозеркало во включенном состоянии направляет излучение образца в фотоприемник, в то время как остальные микрозеркала находятся в выключенном состоянии и отклоняют падающее излучение. Разработанная оптическая схема позволила достичь дисперсионной «развязки» сканаторов, пространственной фильтрации флуоресценции исследуемого образца, высокой световой эффективности, необходимых быстродействия и разрешения. В сравнении с конфокальной микроскопией, в которой селекция отраженных лучей образца выполняется с помощью точечной диафрагмы, в данной установке ее роль выполняет одно из микрозеркал матричной линейки.

Аналогичная по составу комбинация АОД и линейки микрозеркал предложена в устройстве считывания голографической памяти [29]. Одномерный АОД сканирует лазерным лучом линейку микрозеркал, которые открывают доступ к соответствующим ячейкам информации. Контроллер выполняет необходимые расчеты координат микрозеркал, работающих в колебательном режиме, выбор микрозеркал, на которые АОД направляет луч, и обеспечивает синхронизацию сканирующих устройств.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) предоставила возможность получения оптических изображений внутренней микроструктуры в материалах и биологических образцах с высоким разрешением в режиме реального времени. В ОКТ по методу измерения во временной области сочетаются перемещение пучка по поверхности образца и дополнительное интерференционное сканирование (осевое сканирование). В качестве источника излучения используется широкополосный источник излучения. Отражающие или рассеивающие свойства образца фиксируются в виде соответствующих интерферограмм при определенных положениях колеблющегося референтного зеркала интерферометра. В одном из вариантов ОКТ по методу спектральной интерферометрии используется оптическая схема, включающая интерферометр с перестраиваемым по частоте источником излучения. Двумерное изображение поперечного сечения формируется путем перемещения оптического пучка по плоскости, по координате среза, с последовательной регистрацией фотоприемником получаемого в результате осевого сканирования интерференционного сигнала. Механическое изменение оптической разности хода в опорном канале отсутствует. Искомая амплитуда отраженного от неоднородностей микроструктуры излучения рассчитывается путем преобразования Фурье, примененного к интерферограмме. Результатом сканирования является двумерный массив данных, в котором каждый срез представляет интенсивность отраженного или рассеянного оптического светового пучка в зависимости от глубины исследуемого объекта. На основе таких массивов данных создаются объемные изображения. Механизм перестройки частоты источника излучения обеспечивает сканирование по глубине. Источники излучения с широким спектром и малой длиной когерентности дают возможность получить разрешение в осевом направлении порядка единиц мкм [30]. Высокая разрешающая способность ОКТ обуславливает необходимость обработки больших объемов информации, что требует от системы сканирования повышенного быстродействия. Весь процесс управления сканированием, сбором и обработкой данных производится с помощью компьютера.

При реализации ОКТ получают активное применение MEMS- и MOEMS-технологии, один из вариантов трехмерной оптической когерентной томографической системы на основе MEMS-зеркала описан в [31]. Микрозеркало размером  $600 \times 600$  мкм выполняет сканирование поверхности образца, имеет резонансные частоты по двум координатам 3,5 и 8,0 кГц.



Источник излучения имеет центральную длину волны 1310 нм и ширину полосы 80 нм. В оптической схеме ОКТ использована высокоскоростная оптическая линия задержки. Разрешение по оси и поверхности сканирования – 10 и 20 мкм соответственно. Применение MEMS-технологии дает преимущество по компактности устройства и его цене.

### **Результаты анализа**

Условия задачи и требования к сканирующему устройству ограничивают выбор сканаторов составного устройства. Практика применения комбинированного сканирования показывает, что рациональный выбор из имеющегося многообразия взаимно дополняющих сканаторов и их сочетание в оптической схеме позволяют обеспечить достижение желаемых характеристик сканирования реальных объектов, минимизировать по сложности аппаратные и алгоритмические решения.

Распространенным решением задачи по критерию «разрешение – быстродействие» является сочетание быстродействующего сканатора и более инерционного, но имеющего лучшее разрешение, что позволяет получить в составном устройстве выигрыш и в разрешении, и в быстродействии. В конфигурации электронного и электромеханического сканаторов появляется возможность быстро и в режиме реального времени компенсировать ошибку движения более инерционного электромеханического сканатора. Это может увеличить диапазон максимальных скоростей движения интегрированного устройства по сравнению с электромеханическими.

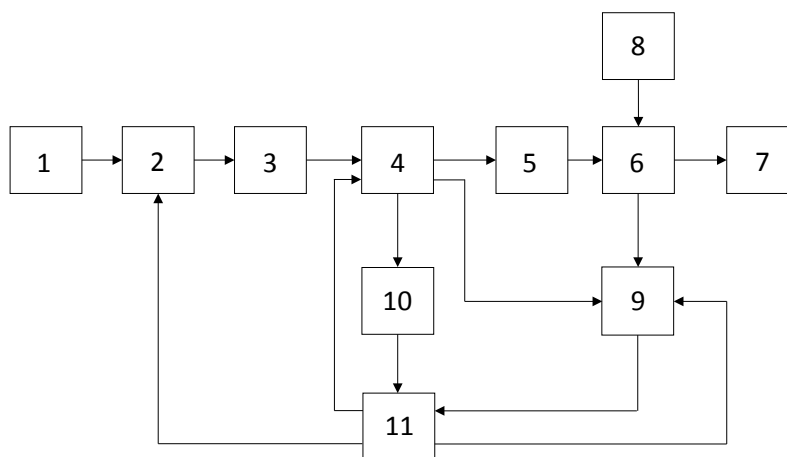
Сочетание двух режимов – сканирования исследуемого поля высокоточным сканатором с большим динамическим диапазоном и микросканирования более быстродействующим, с малым динамическим диапазоном, – является средством адаптации составного сканатора к обзорному полю, его объектам за счет изменения параметров микрорастра. Возможность адаптации облегчает обработку изображений, извлечение содержащейся в них информации, обнаружение и точную локализацию положения исследуемых объектов. Сочетание сканирующих устройств разного принципа действия может упростить пространственную фильтрацию излучения исследуемого поля, разделение излучений разных длин волн, снизить световые потери. Появление MEMS-, MOEMS-технологий расширило возможности комбинированного сканирования, позволило найти новые решения построения сканирующих систем. Современная вычислительная техника в составе комбинированных сканирующих устройств позволяет гибко учитывать особенности и реализовать возможности каждого сканатора, согласовывать и оптимизировать их совместное движение, выполнять контроль и управление рядом параметров. Наиболее распространенные сочетания взаимно дополняющих сканаторов: зеркальный барабан – гальванометр (зеркальный сканатор с магнитоэлектрическим приводом), АОД – гальванометр, АОД – микрозеркала, сканирующий интерферометр – микрозеркала и др.

Достижение преимуществ комбинированного использования сканаторов разных принципов влечет также и новые задачи и может привести дополнительные трудности. При создании составного устройства возникают задачи выбора составляющих составных сканаторов, разработки оптической схемы и устройства управления. Сочетание сканаторов порой требует разработки более сложной оптической схемы устройства и юстировки ее элементов. При объединении оптических пучков в схеме составного сканатора возникают вопросы пропускания и отражения излучений с разными длинами волн, лучевой прочности оптических элементов, световой эффективности. Приводы сканаторов разного принципа отличаются энергетическими требованиями, многорежимностью управления, а их совместное применение должно быть согласовано в динамическом, точностном и алгоритмическом отношении. Для выполнения измерительных операций, контроля и управления могут потребоваться различные измерительные и управляющие системы. Приведенные соображения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Преимущества составного сканирования	Дополнительные задачи и трудности составного сканирования
Повышение качественных показателей; компенсация погрешностей и возмущений; адаптация к полю и объектам сканирования; гибкость режимов сканирования; расширение функций	Оптическое согласование; усложнение оптической схемы, ее юстировки, системы управления, привода с различными характеристиками; различные измерительные преобразователи

Несмотря на большое разнообразие сканирующих систем и по назначению, и по оптическим схемам, можно выделить общие элементы, входящие во многие системы. На основании анализа известных структурных решений, ориентируясь на распространенные задачи считывания и воспроизведения визуальной информации, можно предложить обобщенную функциональную схему комбинированной сканирующей системы (рисунок).



**Обобщенная функциональная схема составного сканирования**

- 1 – источник излучения; 2 – модулятор; 3, 5 – формирующая оптика;
- 4 – блок сканаторов; 6 – объект сканирования; 7 – проекционный экран;
- 8 – осветитель; 9 – устройство выделения сканируемой информации;
- 10 – блок измерительных устройств; 11 – устройство управления и регистрации

Блок 4 включает сканаторы разных принципов, оптические элементы их сопряжения и фокусировки, формирует опорное излучение. Блок выделения сканируемой информации 9 предназначен для приема световых сигналов объекта сканирования, фильтрации, направления их на фотоприемники, оцифровки и передачи сигналов фотоприемников для дальнейшей обработки в устройство управления и регистрации 11. Измерительный канал позволяет контролировать перемещение пучка в пространстве, его положение, скорость, а также привязать выделяемую блоком 9 информацию к конкретным координатам объекта 6. Для формирования сканирующего пучка предусмотрены формирующие оптические элементы 3, 5. Для наблюдения оператором предусмотрен проекционный канал с выводом изображения на экран оператора 7. Управление всей системой сканирования, а также обработку и предоставление пользователю необходимой информации выполняет устройство управления и регистрации 11. Это устройство должно обеспечить синхронизированную работу сканаторов по координатам для заданного закона перемещения сканирующего пучка, на это же устрой-

ство могут возлагаться задачи управления источниками излучения и процессами модуляции. В устройстве объединяются результаты фотометрических, геометрических и спектральных измерений, выполняются синтез и анализ изображений. Для конкретных приложений отдельных блоков и связей приведенной схемы может и не быть, и напротив, могут быть дополнительные, специфические для них элементы.

### **Выводы**

Комбинирование сканаторов со взаимно дополняющими характеристиками является эффективным методом решения задач считывания, преобразования и воспроизведения информации, улучшения характеристик составного устройства. Комбинированное сканирование позволяет интегрировать различные принципы сканирования, расширить границы качественных показателей сканирующих устройств, получить решение задач конкретных приложений более рациональным путем. Достижение преимуществ комбинированного использования сканаторов разных принципов влечет также и новые задачи. Сочетание сканаторов может потребовать разработки более сложной оптической схемы устройства, необходимости юстировки элементов, их оптического согласования. Усложняются задачи моделирования, структурные решения и алгоритмы автоматического управления составными сканаторами.

*Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, проводимой ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по государственному заданию № 075-01394-20-02 на 2020 г. Министерства образования и науки РФ в сфере экспертизы по проекту 730000Ф.99.1.БВ15АА00003.*

### **Список литературы**

1. Выскуб В.Г. Возможности и ограничения составных сканаторов // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 74–82.
2. Любарский С.В., Химич Ю.П. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 76–83.
3. Бабаянц Г.И., Гаранин С.Г., Жупанов В.Г. и др. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 7. С. 663–666.
4. Bloom D.M. Grating Light Valve: revolutionizing display technology, Proc. of SPIE. Vol. 3013. Projection Displays III, 165 (May 8, 1997). P. 165–171.
5. Heberle J., Bechtold P., Straub J., Schmidt M. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Proc. of SPIE, 2016. Vol. 9736, P. 97360L-1-97360L-10.
6. Römer G., Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Physics Procedia, 2014. Vol. 56. P. 29–39.
7. Bechtold P., Bauer D., Schmidt M. Beam profile deformation of fs-laser pulses during electro-optic scanning with KTN crystals. Physics Procedia, 2012. Vol. 39, p. 683–692.
8. Сайт компании «Элент А». URL: <http://www.elent-a.net> (дата обращения: 27.08.2020)].
9. Сайт компании «Азимут Фотоникс». URL: [http://azimp.ru/catalogue/ccd\\_cameras](http://azimp.ru/catalogue/ccd_cameras) (дата обращения: 27.08.2020)].
10. Горбачев А.А., Коротаев В.В., Ярыгиев С.Н. Твердотельные матричные преобразователи и камеры на их основе. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 98 с.
11. Сайт OmniVision. URL: <https://www.ovt.com/image-sensors> (дата обращения: 27.08.2020)].
12. Кульчицкий Н., Наумов А., Старцев В. Рынок неохлаждаемых микроболометров для ИК-камер: тенденции и перспективы // Электроника: НТБ. 2019. № 1 (00182). С. 156–164.
13. Сайт Cambridge Technology. URL: <https://www.cambridgetechnology.com/products/galvanometer-scanner> (дата обращения: 27.08.2020)].
14. Сайт Cambridge Technology. URL: <https://www.cambridgetechnology.com/products/polygon-laser-scanner> (дата обращения: 27.08.2020)].
15. Сайт Cambridge Technology. URL: <https://www.cambridgetechnology.com/products/-laser-beam-components-specialty-products#polygon-mirrors> (дата обращения: 27.08.2020)].

16. Ребрин Ю.К., Сидоров В.И. Оптические дефлекторы. Киев: Техника, 1988. 135 с.
17. Norton Andrew et al. Preliminary characterization of Boston Micromachines 4096-actuator deformable mirror // SPIE 7209, MEMS Adaptive Optics III, 2009. P. 720901-1-720901-7.
18. Сайт Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/product/DLP4500NIR?qqpn=dlp4500nir> (дата обращения: 27.08.2020)].
19. Розов Б.С., Выскуб В.Г., Канцеров В.А. и др. Измерительные сканирующие приборы / под ред. Б.С. Розова. М.: Машиностроение, 1980. 198 с.
20. Mehrdad Ketabchi, Mikael Bering. Polygonal scanner subsystem for laser display. SPIE. Vol. 3131, 1997. P. 20–29.
21. Yun S.K., Song J.H., An S.D., et al. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications, Proc. of SPIE. 2008. Vol. 6887. P. 688702-1-688702-11.
22. Иванов А.А. Сканирующие системы для считывания и записи графической информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Протвино: ИФВЭ. 1992. 30 с.
23. Галуев С.В. Прецизионное управление оптическим пучком составными сканаторами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ. 1982. 17 с.
24. Самарин Ю.Н. Проектирование и расчет лазерных выводных устройств полиграфических машин. М.: Наука. 2004. 142 с.
25. Matsumoto H., Unrath M., Kleinert J., Zhang H. Laser direct ablation for patterning printed wiring boards using ultrafast lasers and high speed beam delivery architectures. CLEO: 2014, OSA, Technical digest (on line) (Optical society of America, 2014), paper ATu2L.4.
26. Unrath M., Jordens W., Ismail J., at all. Acousto-optic deflector applications in laser processing of dielectric or other materials. US patent 8,404,998 B2.
27. Медушев С.В., Ремизов В.Е., Шичков В.В. Перспективные варианты построения программируемого двухкоординатного привода сканирующего зеркала // Вопросы электромеханики. 2008. Т. 107. С. 32–37.
28. Bansal V., Patel S., Saggau P. High-speed confocal laser scanning microscopy using acousto-optic deflectors and a digital micromirror device. Proc. of SPIE, 2004. Vol. 5324. P. 47–54.
29. Kiefer R., Takakura Y., Fontaine J., at all. Association of acousto-optic and micro-scanning mirrors for diffractive memory high speed reading. SPIE, 2003. Vol. 4948. P. 236–242.
30. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2004. С. 6–30.
31. Woonggyu Jung, Daniel T. McCormick, Jun Zhang, at all. Optical coherence tomography based on high-speed scanning MEMS mirror. Proc. of SPIE. Vol. 5690, 2005. P. 342–348.

## References

1. Vyskub V.G. (2018) *Vozможности i ogranicheniya sostavnykh skanatorov* [Possibilities and limitations of composite scanners] *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics]. No. 5. P. 74–82.
2. Lyubarskiy S.V., Khimich Yu.P. (1994) *Opticheskie zerkala iz netraditsionnykh materialov* [Optical mirrors from unconventional materials] *Opticheskiy zhurnal* [Optical journal]. No. 1. P. 76–83.
3. Babayants G.I., Garanin S.G., Zhupanov V.G. et al. (2005) *Razrabotka i issledovanie dielektricheskikh pokrytiy s vysokoy luchevoy prochnost'yu* [Development and research of dielectric coatings with high beam strength] *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics]. T. 35. No. 7. P. 663–666.
4. Bloom D.M. (1997) Grating Light Valve: revolutionizing display technology. Proc. of SPIE. Vol. 3013. Projection Displays III, 165. May 8. P. 165–171.
5. Heberle J., Bechtold P., Straub J., Schmidt M. (2016) Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Proc. of SPIE. Vol. 9736. P. 97360L-1-97360L-10.
6. Römer G., Bechtold P. (2014) Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Physics Procedia, Vol. 56. P. 29–39.

7. Bechtold P., Bauer D., Schmidt M. (2012) Beam profile deformation of fs-laser pulses during electro-scanning with KTN crystals. *Physics Procedia*. Vol. 39. P. 683–692.
8. *Sayt kompanii «Elent A»* [Site of Elent a company]. Available at: <http://www.elent-a.net> (date of access: 27.08.2020).
9. *Sayt kompanii «Azimut Fotoniks»* [Site of the company «Azimut Photonics»]. Available at: [http://azimp.ru/catalogue/ccd\\_cameras](http://azimp.ru/catalogue/ccd_cameras) (date of access: 27.08.2020).
10. Gorbachev A.A., Korotaev V.V., Yarygiev S.N. (2013) *Tverdotel'nye matrichnye preobrazovateli i kamery na ikh osnove* [Solid-state matrix transducers and cameras based on them] *NIU ITMO* [NIU ITMO]. P. 98.
11. Sayt OmniVision [OmniVision website]. Available at: <https://www.ovt.com/image-sensors> (date of access: 27.08.2020).
12. Kulchitskiy N., Naumov A., Startsev V. (2019) *Rynok neokhlazhdaemykh mikrobolometrov dlya IK-kamer: tendentsii i perspektivy* [Market of uncooled microbolometers for IR cameras: trends and prospects] *Elektronika* [Electronics] NTB. No. 1 (00182). С. 156–164.
13. *Sayt Cambridge Technology* [Cambridge Technology website]. Available at: <https://www.cambridgetechnology.com/products/galva-nometer-scanner> (date accessed: 27.08.2020).
14. *Sayt Cambridge Technology* [Cambridge Technology website]. Available at: <https://www.cambridgetechnology.com/products/poly-gon-laser-scanner> (date accessed: 27.08.2020).
15. *Sayt Cambridge Technology* [Cambridge Technology website]. Available at: <https://www.cambridgetechnology.com/products/laser-beam-components-specialty-products#polygon-mirrors> (date accessed: 27.08.2020).
16. Rebrin Yu.K., Sidorov V.I. (1988) *Opticheskie deflektory* [Tekhnika Optical deflectors]. Technics. Kiev. P. 135.
17. Norton A. et al. (2009) Preliminary characterization of Boston Micromachines 4096-actuator deformable mirror. *SPIE 7209, MEMS Adaptive Optics III*. P. 720901-1-720901-7.
18. *Sayt Texas Instrument* [Texas Instruments website]. Available at: <http://www.ti.com/product/DLP4500NIR?qqpn=dlp4500nir> (date of access: 27.08.2020).
19. Rozov B.S., Vyskub V.G., Kantserov V.A., et al. (1980) *Izmeritel'nye skaniruyushchie pribory. Pod red. B.S. Rozova* [Measuring scanning devices. Ed. B.S. Rozova] *Mashinostroenie* [Mashinostroenie]. Moscow. P. 198.
20. Ketabchi M., Bering M. (1997) Polygonal scanner subsystem for laser display. *SPIE*. Vol. 3131. P. 20–29.
21. Yun S.K., Song J.H., An S.D., et al. (2008) A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications, *Proc. of SPIE*. Vol. 6887. P. 688702-1-688702-11.
22. Ivanov A.A. (1992) *Skanirovaniye sistem dlya schityvaniya i zapisi graficheskoy informatsii: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Scanning systems for reading and writing graphic information: author. dis. Dr. Tech. sciences] *IFVE* [IHEP]. Protvino. P. 30.
23. Galuev S.V. (1982) *Pretsizionnoe upravlenie opticheskim puchkom sostavnymi skanatorami: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Precision control of an optical beam by composite scanners: Author. Thesis for Degree of Doctor of Engineering] *MIFI* [MIFI]. Moscow P. 17.
24. Samarin Yu.N. (2004) *Proektirovaniye i raschet lazernykh vyvodnykh ustroystv poligraficheskikh mashin* [Design and calculation of laser output devices for printing machines] *Nauka* [Nauka]. Moscow. P. 142.
25. Matsumoto H., Unrath M., Kleinert J., Zhang H. (2014) Laser direct ablation for patterning printed wiring boards using ultrafast lasers and high speed beam delivery architectures. *CLEO: 2014, OSA, Technical digest (on line)* (Optical society of America). P. ATu2L.4.
26. Unrath M., Jordens W., Ismail J., et al. Acousto-optic deflector applications in laser processing of dielectric or other materials. US patent 8,404,998 B2.
27. Medushev S.V., Remizov V.E., Shichkov V.V. (2008) *Perspektivnye varianty postroeniya programmirovannogo dvukhkoordinatnogo privoda skaniruyushchego zerkala* [Promising options for constructing a programmable two-coordinate scanning mirror drive] *Voprosy elektromekhaniki* [Questions of electromechanics]. Vol. 107. P. 32–37.

28. Bansal V., Patel S., Saggau P. (2004) High-speed confocal laser scanning microscopy using acousto-optic deflectors and a digital micromirror device. Proc. of SPIE. Vol. 5324. P. 47–54.

29. Kiefer R., Takakura Y., Fontaine J., at all. (2003) Association of acousto-optic and micro-scanning mirrors for diffractive memory high speed reading. SPIE. Vol. 4948. P. 236–242.

30. Gurov I.P. (2004) *Opticheskaya kogerentnaya tomografiya: printsipy, problemy i perspektivy. Problemy kogerentnoy i nelineynoy optiki. Pod red. I.P. Gurova i S.A. Kozlova* [Optical coherence tomography: principles, problems and prospects. Problems of coherent and nonlinear optics. Ed. I.P. Gurov and S.A. Kozlova] *SPb GU ITMO* [SPb. GU ITMO]. P. 6–30.

31. Woonggyu Jung, Daniel T. McCormick, Jun Zhang, at all. (2005) Optical coherence tomography based on high-speed scanning MEMS mirror. Proc. of SPIE. Vol. 5690. P. 342–348.