

## Перспективы создания лазерного нанолитографа для задач дифракционной оптики и нанофотоники

**В.П. Корольков<sup>1</sup>, Р.В. Шиманский<sup>1</sup>, В.Н. Хомутов<sup>1</sup>, А.Г. Седухин<sup>1</sup>, Р.К. Насыров<sup>1</sup>,  
В.П. Кирьянов<sup>1</sup>, А.В. Кирьянов<sup>1</sup>, М.А. Завьялова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт автоматизации и электротехники СО РАН, пр. академика Коптюга 1, Новосибирск, Россия, 630090

<sup>2</sup>Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Русская 41, Новосибирск, Россия, 630058

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены некоторые перспективные задачи, решение которых позволит решить проблему синтеза новых типов дифракционных оптических элементов с применением прямой лазерной записи. Рассматривается концепция построения лазерного нанолитографа. Рассмотрены подходы к реализации оптико-механических, оптических и электронных блоков системы и функциональной структуры их управления. Обсуждаются возможности использования различных материалов для записи.

### 1. Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) находят всё более широкое применение в современной науке и технике. Существующие методы расчета ДОЭ, основанные на точной теории дифракции, позволяют рассчитывать ДОЭ с субволновой наноструктурой, имеющие световую эффективность близкую к 100% и обладающие способностью работать в широком диапазоне длин волн, что позволяет надеяться на существенное расширение области применения дифракционной оптики. Однако технические и технологические ограничения процесса записи ДОЭ значительно ограничивают характеристики элементов, пригодных для экономически эффективного производства. Поэтому перспективным направлением является дальнейшее развитие технологий записи ДОЭ.

В настоящее время существует две основные группы технологий изготовления сложных неперiodических ДОЭ – электронно-лучевая и лазерная. Потенциально разрешающая способность электронно-лучевой технологии значительно выше, чем у лазерной записи (десятки нанометров против сотен). Но в случае типичного для производства многоуровневых ДОЭ использования толстого слоя резиста эта разница почти нивелируется из-за рассеяния в нём электронов. Точность позиционирования пучка электронно-лучевой установки внутри одного элементарного поля растрового сканирования размером порядка 100 мкм может достигать 0.1 нм, но при стыковке элементарных полей погрешность механического позиционирования увеличивается до величины порядка 10-30 нм, характерной для систем прецизионной лазерной литографии. При этом электронно-лучевые установки обладают существенно более низкой скоростью записи, чем лазерные системы, при стоимости в разы больше, что делает их применение нерентабельным для малых предприятий, занимающихся

выпуском высокотехнологичной продукции. Лазерные литографические системы особенно выигрывают в случае необходимости записи крупногабаритных ДОЭ на нестандартных тяжелых подложках.

Потенциал технических возможностей современных технологий и лазерных литографических систем (ЛЛС) для записи ДОЭ далеко не реализован и здесь можно ожидать существенного прогресса в случае приближения их разрешающей способности к показателям электронно-лучевой литографии для тонкопленочных процессов.

Как правило, ЛЛС можно разделить на три основных функциональных блока: оптико-механический блок (ОМБ), электронный блок (ЭБ), программное обеспечение (ПО). Каждый из этих блоков, так или иначе, влияет на разрешение, точность и скорость записи ЛЛС. Развитие каждого из этих блоков в перспективе приведёт к значительному повышению характеристик ЛЛС, упростит её конструкцию, что позволит значительно снизить затраты на построение аналогичных систем. Кроме того, улучшения, описываемые в данной работе, должны обеспечить значительную степень автоматизации ЛЛС и упростить работу оператора.

Технология записи оказывает существенное влияние на параметры и предельные характеристики изготавливаемых ДОЭ, поэтому развитие существующих и разработка новых технологий прямой записи во многом определяют требования к блокам ЛЛС. В предлагаемой работе рассмотрена концепция построения высокоразрешающей ЛЛС - лазерного нанолитографа (ЛНЛ), рассчитанного в первую очередь на безрезистную прямую лазерную запись дифракционных структур с минимальными размерами элементов на уровне сотен нанометров, но также предоставляющего возможность записи на традиционных фоторезистах.

## 2. Оптико-механический блок

Конструктивно ОМБ можно разделить на две подсистемы: оптический канал и система сканирования. Именно эти подсистемы в значительной степени влияют на основные характеристики ЛНЛ.

Система двухкоординатного сканирования ЛНЛ может быть реализована на основе движения пучка относительно заготовки в двух ортогональных направлениях (X-Y сканирование), либо на основе вращения заготовки и перемещения пучка вдоль радиуса (круговое сканирование). Для установок, ориентированных на изготовление ДОЭ и предназначенных для задач интерферометрического контроля, использование кругового сканирования оказалось весьма эффективным [1]. Это связано не только с преобладанием аксиальной симметрии в оптических схемах с ДОЭ, но и с тем, что востребованными являются ДОЭ большого диаметра (100–300 мм). Запись на подложках такой площади с использования X-Y сканирования будет требовать существенно большего времени, чем запись в полярной системе координат, что приводит к росту ошибок, связанных с тепловым дрейфом механических узлов и изменением давления окружающего воздуха, влияющего на длину волны интерферометров контроля перемещения. Данная работа основана на нашем опыте создания ЛНЛ с круговым сканированием (ЛНЛКС), поэтому в первую очередь рассматриваются проблемы, связанные именно с такой базовой конструкцией системы.

Угловая координата ЛНЛКС, как правило, строится на базе аэростатического шпиндельного узла, оснащённого оптическим угловым датчиком. Современные высокоскоростные оптические угловые датчики способны обеспечивать точность до 0.2–0.5 угл. сек [2]. Точность измерения положения сканируемого по круговой траектории лазерного пучка при этом падает обратно пропорционально его радиальной координате. Погрешность измерения координаты пучка по угловому направлению порядка 10–20 нм (типичная для позиционеров линейного прецизионного сканирования) достигается при упомянутой угловой погрешности только в области диаметром порядка 20–50 мм. Это является существенным недостатком кругового сканирования. Поэтому необходимо снижать угловую погрешность, чтобы приблизиться по точности к X-Y сканированию. В то же время, если учитывать ошибку выставления ортогональности осей и, погрешность порядка 1–2 мкм, связанную с отклонением от прямолинейности движения по каждой из осей при X-Y сканировании, то реальная погрешность кругового и X-Y вариантов сканирования становятся весьма близкими. Остается

неоспоримое преимущество X-Y систем за счет малой дискретности фиксации координаты по обеим осям.

Для достижения высокой точности синтеза оптических элементов и обеспечения высокой стабильности параметров ЛНЛКС во времени и при меняющихся внешних условиях в конструкции ОМБ целесообразно активное использование прецизионных поверхностей гранитной плиты в качестве рабочих направляющих плоскостей. В этом случае при проектировании кинематической схемы ОМБ нетрудно будет обеспечить соблюдение принципа симметрии в расположении ключевых элементов ЛНЛКС относительно главной плоскости установки, в том числе будет обеспечено симметричное относительно этой плоскости расположение точек приложения сил исполнительных механизмов генератора. Значительный выигрыш в снижении температурного дрейфа фокусирующего объектива нанолитографа относительно оси вращения заготовки даст использование дифференциального интерферометра с расщепленными плоскими отражателями в обоих плечах [3]. При такой конфигурации оптико-механического блока нанолитографа внешние изменяющиеся температурные условия не будут приводить к значительным дрейфам оптической оси объектива относительно оси вращения ротора шпинделя, несмотря на возникающие при этом значительные изменения размеров гранитной плиты, каретки линейных перемещений, что позволит обеспечить требуемые количественные показатели параметров, характерные для нанотехнологического оборудования (рисунок 1).

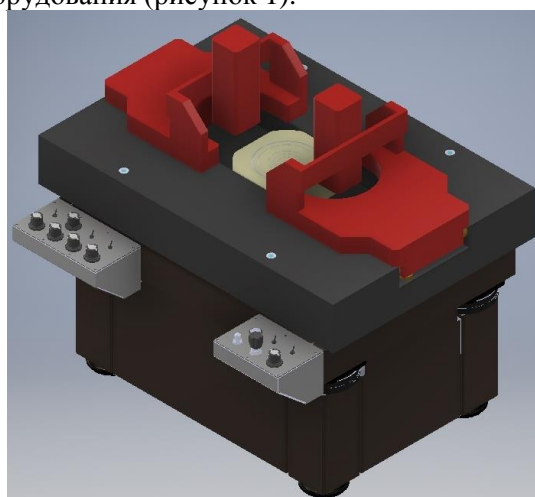


Рисунок 1. Один из вариантов компоновки ЛНЛКС.

Более того, такая компоновка ОМБ позволяет создать полноценный двухканальный ЛНЛКС для реализации отдельной записи на фото- и термочувствительных материалах с применением двух лазеров, один из которых генерирует излучение, например, в видимом диапазоне, а другой в УФ или ДУФ диапазоне. Для каждого канала используется свой портал линейных перемещений с собственным оптическим каналом и системой автофокусировки. Элементы каждого оптического канала размещаются на соответствующем портале. Переход на работу с одного канала на другой выполняется оператором из программы управления без каких-либо дополнительных юстировок в оптических каналах.

Достижение высокой точности угловой координаты ЛНЛКС возможно при использовании в её конструкции оптических угловых датчиков с самокалибровкой [4, 5]. Методы самокалибровки (self-calibration methods) являются самореферентными, поскольку основываются на считывании информации с радиальной решетки углового датчика несколькими головками для определения погрешности измерительного раstra. Поэтому, такой метод идеально подходит для быстрой и точной калибровки *in situ* угловых датчиков без использования каких-либо внешних стандартов или вспомогательных устройств, установленных на объект измерений.

Оптический канал ЛНЛКС – это сложная оптико-электронная система, определяющая пространственное разрешение процесса записи. Если задаваться целью максимального

приближения разрешения ЛНЛКС к электронно-лучевым литографическим установкам, то можно выделить два основных подхода к усовершенствованию оптического канала:

- уменьшение рабочей длины волны технологического лазера (в частности до ГУФ длины волны 266 нм), а также увеличение показателя преломления в зоне фокусировки (до 1.4) при записи в твердых и жидких средах;
- преодоление дифракционного предела по размеру сфокусированного лазерного пятна при дальнепольной (на расстоянии 0.2 – 1 мм) фокусировке.

Для преодоления дифракционного предела по размеру сфокусированного лазерного пятна предполагается использование следующих методов:

- применение фокусирующей оптики с кольцевой формой апертуры, а также поиск и применение методов дополнительного «обострения» фокусировки за счет специального перераспределения интенсивности света на апертуре фокусирующей оптики и аппаратного обострения так называемой функции аподизации;
- применение новых и уже традиционных видов лазерных пучков с неоднородным распределением поляризации по апертуре фокусирующей оптики;
- поиск и применение методов пространственно-частотной фильтрации лазерного пучка (фильтрации Торальдо).

Как показывают проведенные теоретические исследования [6], применение совокупности указанных методов по преодолению дифракционного предела, а также решение задачи по возможности работы на длине волны 266 нм позволяют получить размеры лазерного пятна в дальней зоне (с рабочим отрезком объектива порядка 1 мм) 105 и 70 нм (по критерию FWHM), соответственно, при записи в воздушной среде и в средах с показателем преломления 1,5. Вместе с тем, форма распределения интенсивности света в фокальной области (функция рассеяния точки) оказывается близка к возведенной в квадрат функции Бесселя первого рода и нулевого порядка. То есть сфокусированный пучок близок к идеальному пучку Бесселя с относительно высоким уровнем побочных максимумов и относительно низкой эффективностью в полезном центральном лепестке. Это обстоятельство необходимо согласовать далее с вышеуказанным выбором материалов, режимов, а также соответствующих тепловых расчетов при термохимической записи. Классические позитивные слабоконтрастные фоторезисты с почти линейной характеристической кривой не могут быть использованы в этом случае. Термочувствительные пленочные материалы могут решить проблемы за счет порогового механизма записи [7].

Повышение апертуры фокусирующего объектива предъявляет жесткие требования к датчику и исполнительному элементу системы автофокусировки, входящей в состав ОМБ. В настоящее время используется достаточно много вариантов схем оптических датчиков фокусировки [8, 9]. Важной особенностью оптических датчиков фокусировки, использующих пробный пучок, проходящий через тот же фокусирующий объектив, что и записывающий пучок, является повышение чувствительности с ростом апертуры объектива. Требования к исполнительному элементу с ростом апертуры объектива ужесточаются, так как увеличивается его вес за счет многолинзового дизайна. Применение иммерсии для круговых записывающих систем также ставит сложную задачу удержания иммерсионного контакта и удаления остатков жидкости. Такая задача решена для систем, используемых для записи дисков оптической памяти [10]. Но там нет необходимости производить запись вблизи оси вращения заготовки. К тому же задача проектирования датчиков автофокусировки усложняется для случаев записи дифракционной структуры на трехмерных поверхностях, что актуально на данном этапе развития высокотехнологичной элементной базы.

### 3. Электронный блок

В состав ЭБ ЛНЛКС входят следующие электронные модули:

- модули управления системой позиционирования, отвечающие за точность и скорость процесса сканирования. Как правило, каждый из этих модулей состоит из двух частей – драйвера, отвечающего за процесс управления, и преобразователя-усилителя,

формирующего сигналы, воздействующие на исполнительный элемент. основополагающими параметрами этого модуля являются быстродействие, скорость регулирования, точность интерпретации сигналов обратной связи.

- контроллеры пространственных датчиков (линейный и угловой датчики для ЛНЛКС) – устройства, считывающие и обрабатывающие сигналы датчиков с последующей передачей их модулям управления системы позиционирования. Ключевыми параметрами этого модуля являются рабочая частота и коэффициент интерполяции.
- контроллер управления системой автофокусировки – электронный модуль, позволяющий замкнуть петлю обратной связи между датчиками и исполняющими элементами системы автофокусировки. Как правило, логическим ядром контроллера служит высокоскоростной ПИД-регулятор. Ключевыми параметрами этого модуля являются точность и скорость регулирования.
- модуль генератора изображения (передача цифровой информации, описывающей формируемое изображение, и преобразование ее в аналоговый сигнал для управления модуляторами), обеспечивающий жёсткую, сквозную синхронизацию и стробирование всех остальных модулей ЛНЛКС, а также управляющий акустооптическими модуляторами (АОМ) оптического канала. Работа этого модуля отвечает за топологию записываемых ДОО. Базовыми параметрами этого модуля является пропускная способность передачи данных, объём оперативной памяти, быстродействие процессора, функциональные возможности по распаковке и преобразованию данных, частота сигналов управления АОМ и возможность расширения модуля подсоединением внешних дополнительных устройств и их интеграции в систему.
- вспомогательные периферийные модули – это целый класс дополнительных устройств, таких как датчики температуры, влажности, вспомогательные юстировочные камеры, системы управления опорами и виброразвязкой и т.д. Эти устройства оказывают незначительное влияние на процесс записи, но существенно упрощают работу оператора.



**Рисунок 2.** Структурная схема ЭБ ЛНЛКС.

Управление электронными модулями ЛНЛКС осуществляется непосредственно персональным компьютером под управлением операционной системы Microsoft Windows, с использованием различных характерных для ПК внешних, в том числе несинхронных, интерфейсов. Данная конфигурация ЭБ ЛНЛКС сложилась исторически и принципиально не изменялась на протяжении значительного времени. Структурная схема электронного блока ЛНЛКС показана на рисунке 2.

Очевидно, что данная реализация ЭБ обладает сразу рядом недостатков:

1. Электронные модули строго привязаны к интерфейсу, что существенно усложняет их модернизацию или замену. А в виду устаревания элементной базы и постепенного

выхода из обращения некоторых интерфейсов или замена их интерфейсами с отсутствующей обратной совместимостью, зачастую модернизация или замена электронного модуля становится невозможной в рамках данного ЭБ.

2. ЭБ связан внешней синхронизацией, однако в силу особенности конструкции ЛНЛКС электронные модули устанавливаются на значительном расстоянии друг от друга, что может привести к сбоям в результате воздействия внешних помех. Любые сбои в синхронизации приводят к непредсказуемым результатам, которые чаще всего отражаются в виде значительных локальных отклонениях топологии записываемого ДОЭ от расчётного, что в свою очередь ведёт к невозможности использования конечного изделия и повышает процент брака.
3. Быстро устаревающая элементная база электронных модулей и отсутствие преемственности. Этот критический недостаток существенно усложняет процессы обслуживания, модернизации или замены электронных модулей ЭБ.

Для решения описанных проблем ЭБ ЛНЛКС предлагается принципиально новый подход к реализации данной системы. Этот подход лежит в основе значительной части всех современных промышленных разработок. Принцип предполагает объединение всех логических модулей управления на кристалле одной микросхемы. Такое решение обеспечит синхронное и сверхбыстрое взаимодействия всех модулей ЭБ с минимальной вероятностью сбоев. Кроме того, данный подход позволяет отказаться от использования большого количества интерфейсов, что так же благоприятно сказывается на скорости работы, делает систему открытой для обновления логических модулей и существенно упрощает механизм интеграции новых модулей в систему. Так же используя этот подход, возникает возможность разделить физическую и программную реализацию ЭБ, что делает систему более универсальной и переносимой на другие платформы, что позволяет отказаться от использования определённой элементной базы.

Для реализации описанных возможностей наиболее целесообразным является использование систем на кристалле (SoC), построенных по принципу FPGA+ARM (гибридные процессоры). Ряд производителей предлагают типовые решения, построенные по этой схеме и обладающие различной производительностью. Все эти решения обладают очень продолжительным временем поддержки и, как правило, производители обеспечивают их преемственностью и обратной совместимостью, поэтому использование данного подхода к ЭБ ЛНЛКС не только позволит решить большую часть описанных проблем, но также позволит в долгосрочной перспективе развивать систему без необходимости кардинального обновления аппаратной среды.

#### **4. Программное обеспечение**

ПО ЛНЛКС – это сложный комплекс сервисных приложений и программ, необходимых для расчёта и записи ДОЭ. Кроме этого, в ПО входят службы диагностики, сервисного обслуживания и настройки ЛНЛКС. На рисунке 3 показана упрощённая функциональная схема актуального ПО и взаимодействия разработчиков и пользователей с ней. Ключевым объектом ПО является концепция интерфейсов устройства (КИУ). КИУ позволяет объединить в одну логическую связь неограниченное количество логических устройств и предоставляет широкие возможности для их взаимодействия разработчику.

Основной проблемой текущей версии ПО является жёсткая привязка к операционной системе и как следствие интерфейсам используемых устройств. Поэтому работа над развитием ПО должна происходить параллельно с модернизацией ЭБ. В перспективе это позволит интегрировать ПО частично или полностью в ЭБ, что позволит существенно снизить дальнейшие затраты на разработку и модернизацию и в перспективе устранил необходимость использования конкретного типа и версии используемой операционной системы.

#### **5. Заключение**

Предложенные в данной статье подходы к развитию основных узлов лазерного нанолитографа позволяют говорить о реальной перспективе создания такой системы, конкурентной с точки

зрения оптических применений системам электронно-лучевой литографии. При этом предлагаемый нанолитограф будет обеспечивать высокую производительность процесса записи, не требуя высоковакуумной инфраструктуры. Вполне реально получить пространственное разрешение, превышающее современный уровень 300 нм для коммерческих ЛНЛ [11, 12] с УФ диодными лазерами (длина волны 375-405 нм).

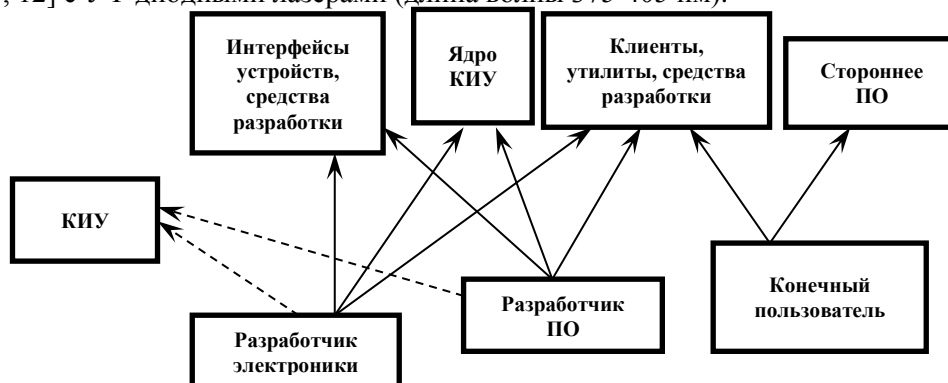


Рисунок 3. Упрощённая функциональная схема ПО.

## 6. Литература

- [1] Вейко, В.П. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. 1. Изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием / В.П. Вейко, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, Д.А. Синев, Е.А. Шахно // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 66-77.
- [2] [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.renishaw.com/en/renishaws-new-rexm-high-accuracy-angle-encoder-offers-the-ultimate-angular-metrology--7938>.
- [3] Кирьянов, А.В. Улучшение метрологических характеристик лазерных генераторов изображений с круговым сканированием / А.В. Кирьянов, В.П. Кирьянов // Автометрия. – 2010. – Т. 5, № 4). – С. 77-93.
- [4] Watanabe, T. Self-calibratable rotary encoder / T. Watanabe, H. Fujimoto, T. Masuda // Journal of Physics: Conference Series. – 2005. – Vol. 13(13). – P. 240-245.
- [5] Кирьянов, А.В. Повышение точности угловых измерений с помощью фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа / А.В. Кирьянов, В.П. Кирьянов // Автометрия. – 2012. – Т. 6, № 48. – С. 84-91.
- [6] Sedukhin, A.G. Efficient tight focusing of laser beams optimally matched to their thin-film linear-to-radial polarization conversion: Method, implementation, and field near focus / A.G. Sedukhin, A.G. Poleshchuk // Opt. Commun. – 2018. – Vol. 407. – P. 217-226.
- [7] Korolkov, V.P. High-resolution laser fabrication of amplitude diffractive structures on thin metal films / V.P. Korolkov, S.L. Mikerin, K.A. Okotrub, A.R. Sametov, A.I. Malyshev // Proc. SPIE Nanophotonics and Micro/NanoOptics IV. – 2018. – Vol. 10823. – P. 108230X.
- [8] Денк, Д.Э. Исследование методов увеличения точности работы системы автоматической фокусировки кругового лазерного записывающего устройства / Д.Э. Денк, А.Г. Полещук // Автометрия. – 2010. – №1. – С. 107-117.
- [9] Верхогляд, А.Г. Датчик автоматической фокусировки для круговых лазерных записывающих систем / А.Г. Верхогляд, М.А. Завьялова, В.П. Корольков // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 5. – С. 117-122.
- [10] Neijzen, J.H.M. Liquid Immersion Deep-UV Optical Disc Mastering for High Data Capacity ROM Discs / J.H.M. Neijzen, E.R. Meindersb, M.I. Boamfaa // Proc. SPIE. Seventh International Symposium on Optical Storage. – 2005. – Vol. 5966. – P. 59661V-1-6.
- [11] [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.himt.de/index.php/dwl66.html>.
- [12] [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.4pico.nl/direct-laser-writers>.

**Благодарности**

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 17-19-01721). В исследованиях использовано оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

## **Prospects for creating a laser nanolithography system for tasks of diffractive optics and nanophotonics**

**V.P. Korolkov<sup>1</sup>, R.V. Shimansky<sup>1</sup>, V.N. Khomutov<sup>1</sup>, A.G. Seduhin<sup>1</sup>, R.K. Nasyrov<sup>1</sup>,  
V.P. Kiryanov<sup>1</sup>, A.V. Kiryanov<sup>1</sup>, M.A. Zavyalova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>IA&E SB RAS, Academician Koptyug ave. 1, Novosibirsk, Russia, 630090

<sup>2</sup>TDI SIE SB RAS, Russkaya str. 41, Novosibirsk, Russia, 630058

**Abstract.** The paper considers the concept of building a laser nanolithography system, based on the requirements arising in solving the problems of high-resolution synthesis of elements of diffractive optics and nanophotonics. The approaches to the implementation of optical, electronic and mechanical units of the system and the functional structure for their controlling are considered. The possibilities of using various recording materials are also considered.