

УДК 681.7.01:535.313

**РАСЧЕТ И ИСПРАВЛЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ЛАЗЕРНОЙ РАЗВЕРТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ С ПАРАБОЛОИДНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ**

Канделинский С. Л., Ткаченко В. В., Утехин С. И.

*ГНУ «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получена оценка aberrаций, ограничивающих разрешающую способность зеркальной системы формирования строчной развертки на основе параболического отражателя, и намечены варианты технических решений для их коррекции с целью приближения к теоретически предельному разрешению.

Ключевые слова: строчная развертка, параболический отражатель, дефлектор, оптические aberrации.

**CALCULATION AND CORRECTION OF ABERRATIONS IN LASER SCAN SYSTEM FOR
SCANNING DEVICES WITH A PARABOLOID REFLECTOR**

Kandelinsky S., Tkachenko V., Utekhin S.

*United Institute of Informatics Problems of NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. An estimate of the aberrations limiting the resolution of byline scan mirror system based on a paraboloid reflector is obtained, and technical solutions for their correction are outlined in order to approach the theoretically maximum resolution.

Key words: byline scan, paraboloid reflector, deflector, optical aberrations.

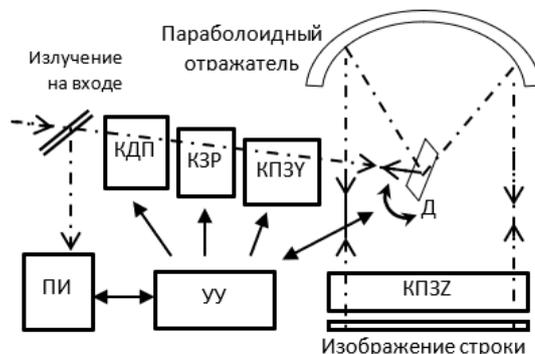
*Адрес для переписки: Ткаченко В. В., ул. Сурганова, 6, г. Минск 220012, Республика Беларусь
e-mail: tkach@newman.bas-net.by*

Контроль и измерение параметров полей при решении различных приборостроительных задач в ряде случаев реализуется с использованием сканирующего лазерного пучка. Высокое быстродействие и точность контроля (измерения) достигается при этом в оптико-механической развертывающей системе, например, с целью получения электронных и цифровых описаний этих изображений для последующей обработки, передачи и использования. В частном случае, для получения растрового изображения, волновой пучок излучения формируется в процессе сканирования одной фиксированной строки, заданной линией пересечения сканируемой поверхности с плоскостью развертки [1].

В развертывающей системе с зеркальными дефлекторами формирование сканирующего волнового пучка имеет различные варианты реализации в зависимости от положения и конструкции объектива, с помощью которого мгновенное поле зрения объектива (или прибора в целом) из плоскости сканирования переносится в апертуру фотоприемного устройства, образуя строки телевизионного раstra. В настоящей работе представлена оценка возможностей использования в системе формирования пучка с параболического зеркального отражателя, с помощью которого достигается при развертке пучка его телецентрический ход, что важно при построении прецизионных систем, и которому в ряде случаев может быть отдано предпочтение по сравнению с линзовым $F\theta$ -объективом [2].

Система строчной развертки. Общая схема формирования и управления сканирующим лазер-

ным пучком в развертывающей системе с параболическим зеркалом представлена на рисунке 1. В основе концептуального технического решения использован оптико-геометрический эффект системы коникоидов конус-параболоид, расчетно-математическая модель которого рассмотрена нами в [1].



УУ – устройство управления; ПИ – приемник излучения; Д – дефлектор; КДП – коллимирование и диафрагмирование пучка; КЗР – коррекция зоны резкости; КПЗУ – коррекция поля зрения вдоль строки; КПЗЗ – коррекция поля зрения поперек строки

Рисунок 1 – Система развертки луча для активного сканирования строки изображения

В результате анализа решений системы уравнений для конуса и парабоида получены условия, при которых обеспечивается телецентрический ход оси пучка в плоскости развертки, а именно: конус, поверхность которого представляет собой геометрическое место положений оси пучка, отраженного от зеркала дефлектора, своей вершиной должен

быть совмещен с фокусом параболоида, а своей образующей – с осью параболоида.

В практической реализации такой системы необходимо учитывать ее особенности, определяющие диапазон углов развертки, при которых сфокусированное пятно не превышает заданный размер и, соответственно, разрешающую способность в поле сканирования. Для безабберационных систем теоретический предел разрешающей способности определяется с учетом дифракционной расходимости γ волнового пучка по критерию Рэля:

$$N = Lnsin\gamma/0,61\lambda = Ld/1,22\lambda F \quad (1)$$

где N – число разрешимых элементов (пикселей); λ – длина волны излучения, $nsin\gamma$ – расходимость пучка в среде с показателем преломления n ; d – поперечный размер сечения пучка в апертуре фокусирующего элемента; L – длина строки, пропорциональная углу и плечу развертки пучка; F – рабочее расстояние элемента, фокусирующего (коллимирующего) волновой пучок. Наилучшее разрешение для системы с телецентрическим ходом пучка при отсутствии его виньетирования в крайних угловых положениях при развертке достигается, когда $d = L = D/2$, где D – апертура собирающего излучение объектива.

Численное моделирование сканирующего волнового пучка. Для оценки абберационных искажений и определения путей их коррекции проведено компьютерное моделирование хода лучей по законам геометрической оптики, представленных уравнениями в векторном виде:

– для виртуального конуса с внутренним углом 2β , образуемого при сканировании строки с помощью зеркального дефлектора

$$s \cdot v \pm \cos\beta = 0, \quad (2)$$

где v и s – орты оси вращения зеркала и осей падающих на него пучков от отражателя;

– для параболоида, совмещенного фокусом f с вершиной конуса на своей оси, заданной ортом i

$$((s \cdot i + 2f)i)^2 = s^2. \quad (3)$$

Моделированием с помощью инструментов MatCAD установлено, что зона наилучшей резкости в плоскости строчной развертки, секущей параболоид по линии параболы $y^2 = 4f(x - f)$, где x – значение координаты вдоль оси i , описывается уравнением

$$y^2 = 8fx, \quad (4)$$

а автоматическую коррекцию зоны резкости для совмещения ее с плоскостью сканируемого изображения можно выполнить с применением централированных оптических компонент, например, с помощью панкратического объектива. Однако этого не достаточно для получения разрешения, близкого к безабберационным системам (1), из-за поперечных

искажений в поле зрения зеркально-линзового объектива, которые по результатам моделирования иллюстрируются на рисунке 2.

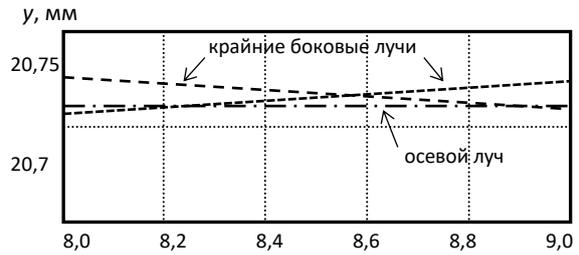


Рисунок 2 – Ход лучей в зоне резкости (расстояния x и y в мм относительно фокуса при $f = 25$ мм и $\beta = 45^\circ$)

В зеркально-линзовой системе с параболоидным отражателем абберации пучка не могут быть скомпенсированы достаточно эффективно с применением центрированных компонент формирования пучка – в системе с угловой разверткой этого пучка само условие ее центрированности уже нарушается. Возможные варианты решения этой проблемы рассматриваются с введением в схему управления сканирующим лазерным пучком как показано на рисунке 1 двух контуров коррекции, разделенных по двум сечениям пучка вдоль и поперек строки и, соответственно, пространственно разнесенных оптических элементов для компенсации продольных и поперечных аббераций пучка.

Обсуждение результатов. Результаты проведенного анализа системы строчной развертки с параболоидным отражателем актуальны в проектировании оборудования для производства микроэлектроники нано- и микроуровня с использованием литографии в спектре экстремального ультрафиолета. Это значительный отход от традиционных литографических процессов, так как для работы требуется вакуум (вещество поглощает EUV-излучение, стекло и даже воздух). Вместо линз для фокусировки лучей света потребуются применение зеркал. Дополнительные варианты с введением канала управления формой и положением профилирующей диафрагмы для сканирующего пучка в зоне его коллимирования анализируются из условий оптимизации энергетических потерь в лазерном пучке и технико-экономических затрат в практической реализации приборов с заданными требованиями по назначению.

Литература

1. Канделинский, С. Л. Оптико-геометрический эффект пересечения согласованных коникоидов на примере строчной развертки луча / С. Л. Канделинский, В. В. Ткаченко // Оптический журнал. – 2023. – № 10. – С. 3–12.
2. Хацевич, Т. Н. Телецентрические объективы F-Theta для сканирующих систем / Т. Н. Хацевич, А. И. Боднарчук // Автометрия. – 2022. – Т 58, № 3. – С. 32–40.