

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 2

1997

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 681.327.12 : 681.78.01

Ю. В. Вовк, Л. В. Выдрин, П. Е. Твердохлеб, А. В. Трубецкой,
Ю. А. Щепеткин, И. Ш. Штейнберг

(Новосибирск)

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Разработана лазерная система для формирования трехмерных изображений на основе двухкоординатного акустооптического (АО) дефлектора и плоского подвижного по глубине пространства рассеивающего экрана. Даны оценки глубины отображаемого пространства и основных параметров АО-дефлектора в режиме формирования изображений. Экспериментально получены трехмерные изображения с разрешением в сечениях объектов 256×256 точек, числом сечений по глубине пространства 150 и частотой регенерации кадров 25 Гц.

Введение. Необходимость формирования объемных изображений возникает практически во всех сферах деятельности человека, что сопровождается стремительным развитием систем трехмерной компьютерной графики.

Известно, что для отображения объемных изображений в современных системах компьютерной графики используются электронные дисплеи с плоским экраном. Передача глубины пространства, формы и пространственного расположения предметов достигается путем формирования на экране проективных изображений объектов или сцен, воспринимаемых наблюдателем как условно объемные. В других случаях на экране воспроизводятся две проекции объемного изображения, которые воспринимаются левым и правым глазом наблюдателя попеременно с помощью специальных очков. Поскольку генерируемые компьютером изображения удовлетворяют условиям стереопары, то ощущение объемности возникает на уровне зрительного анализатора наблюдателя.

В настоящее время рядом научных центров мира ведется разработка новых методов пространственной визуализации, основанных на использовании лазерных технологий. Качественное отличие лазерных технологий визуализации от известных состоит в том, что наблюдателю выдаются не проективные изображения объемных объектов, а их трехмерные изображения, формируемые в физическом объеме светорассеивающей или светоизлучающей среды (газовой, жидкостной, твердотельной) рисующим лазерным пучком света. Осмотр таких изображений может вестись одним или несколькими наблюдателями с разных сторон и с сохранением ощущения объемности, что является фундаментальным свойством реальной трехмерности. Формирование трехмерных изображений может осуществляться в привычных цветах и в реальном времени.

Один из простейших лазерных методов формирования монохромных изображений в объеме пространства (X, Y, Z) продемонстрирован фирмой "Texas Instruments" (США) [1]. Принципиально важным элементом созданного устройства является вращающийся рассеивающий экран с винтообразной

(геликоидной) поверхностью. Синтез трехмерных изображений и управление работой элементов системы осуществляются компьютером. Сам метод построения изображения объекта предусматривает последовательный вывод на экран всех его сечений с некоторым шагом вдоль направления Z . Отображение на экране каждого из сечений ведется путем отклонения лазерного пучка по координатам X, Y с помощью зеркального дефлектора, а визуализация всей последовательности сечений — с помощью винтового экрана, развертывающего трехмерное изображение по глубине пространства Z . Вывод одного трехмерного кадра осуществляется за время, не превышающее 40 мс, что на частоте повторения кадров в 25 Гц позволяет наблюдать с внешней стороны экрана сравнительно устойчивые трехмерные изображения объектов (сцен).

О характеристиках других лазерных устройств формирования трехмерных изображений сообщается в публикациях [2, 3]. Однако здесь, как и в [1], экрана точки визуализируемого изображения будут иметь неодинаковые размер и яркость, особенно в той области, которая примыкает к оси вращения. Наконец, трудной также является задача изготовления геликоидной поверхности с требуемой точностью.

В данной статье сообщается о создании экспериментальной лазерной системы формирования объемных трехмерных изображений, лишенной указанных недостатков. Система реализована на основе акустооптического (АО) дефлектора лазерного пучка и плоского рассеивающего экрана и предназначена для изучения процесса формирования трехмерных изображений в реальном времени. Даются оценки предельному значению глубины отображаемого пространства и основным характеристикам АО-дефлектора в режиме построения изображений. Приведены сведения о качестве тестовых трехмерных изображений, их особенностях и направлении дальнейшей работы.

1. **Функциональная схема системы.** Схема системы, предназначенной для формирования трехмерных изображений, представлена на рис. 1, где 1 —

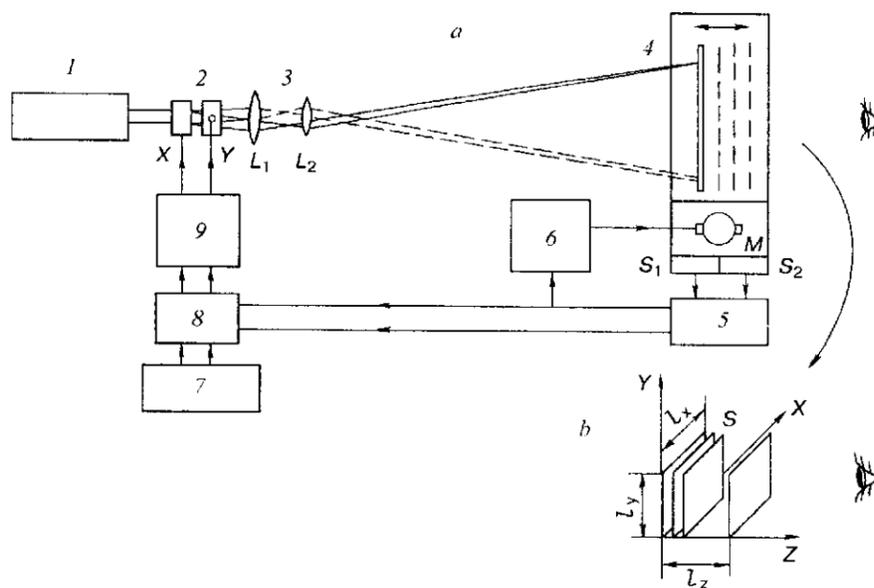


Рис. 1

источник лазерного излучения; 2 — двухкоординатный АО-дефлектор (ячейки X и Y); 3 — телескоп для увеличения углов отклонения лазерного пучка (линзы L_1 и L_2); 4 — плоский рассеивающий экран; M — электродвигатель привода экрана; S_1 — датчик положений вала электродвигателя M ; S_2 — датчик начального положения экрана; 5 — блок синхронизации; 6 — блок стабилизации скорости вращения электродвигателя; 7 — персональный компьютер IBM PC; 8 — параллельный интерфейс (адаптер); 9 — ВЧ-генераторы.

Изображения (X , Y)-сечений визуализируемых объектов последовательно воспроизводятся на подвижном светорассеивающем экране путем двухкоординатного отклонения лазерного пучка. Пучок, отклоненный АО-дефлектором, создает на рассеивающем экране изображение светящейся точки, видимое в широком диапазоне углов наблюдения. Экран совершает вдоль оси Z возвратно-поступательные движения с частотой 25 Гц, в результате чего в объеме пространства перемещения наблюдается слитное без мерцаний изображение.

Синтез трехмерных изображений выполняется с помощью компьютера. Координаты точек изображения в каждом сечении кодируются двоичными числами, которые через интерфейс 8 поступают на вход ВЧ-генераторов, а затем в виде синусоидальных напряжений соответствующих частот — на управляющие входы отклоняющих ячеек X и Y . АО-дефлектор отклоняет световой пучок на угол, пропорциональный частотам управляющих напряжений.

Датчики S_1 , S_2 и формирователь синхроимпульсов 5 служат для получения сигнала, соответствующего начальному положению экрана (начало кадра), и сигналов, соответствующих положению экрана в заданных сечениях вдоль оси Z . Эти сигналы через интерфейс 8 поступают в компьютер и используются для управления выдачей данных.

Каждое из сечений S визуализируемого трехмерного изображения (рис. 1, б) параллельно плоскости X , Y и имеет размеры l_x , l_y . Расстояние l_z между крайними сечениями вдоль направления Z равно максимальному расстоянию перемещения подвижного экрана.

2. Глубина отображаемого пространства. Глубина пространства ограничена дифракционным уширением сечения лазерного пучка при сдвиге экрана из плоскости наилучшей фокусировки.

При расчете воспользуемся известным для гауссовых пучков выражением

$$\omega = \omega_0 [1 + (\lambda Z / \pi \omega_0^2)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где λ — длина волны света; ω_0 — радиус сечения пучка в плоскости перетяжки; ω — радиус сечения пучка при сдвиге от перетяжки на расстояние Z [4].

Примем коэффициент уширения сечения пучка $K = \omega / \omega_0$, а радиус сечения $\omega_0 = l_x / (2N_x)$, где l_x — поперечный размер сформированного на экране изображения, а N_x — количество разрешимых положений пучка в этом направлении. Тогда из выражения (1) получим, что допустимый размер изображения l_z по глубине пространства, при котором коэффициент уширения сечения не превышает заданное значение K , равен

$$l_z = \pi l_x^2 (K^2 - 1)^{1/2} / (2\lambda N_x^2). \quad (2)$$

Зависимость l_z от поперечного размера l_x изображения при $\lambda = 0,63$ мкм и $K = 1,2$ приведена на рис. 2 для различных значений разрешения N_x . Можно видеть, что размер l_z резко возрастает с увеличением поперечного размера изображения и с уменьшением разрешения. Для разрешения $N_x = 512$ при $l_x = 100$ мм получим $l_z = 66$ мм, а при $l_x = 300$ мм — $l_z = 560$ мм. В свою очередь, для разрешения $N_x = 1024$ и $l_x = 100$ мм имеем $l_z = 16$ мм, а при $l_x = 300$ мм — $l_z = 141$ мм.

Таким образом, глубина отображаемого пространства при разрешении дефлектора $N_x < 512$ сопоставима с поперечным размером изображения, а при разрешении $N_x > 1024$, как правило, меньше его поперечных размеров. В последнем случае для увеличения глубины отображаемого пространства нуж-

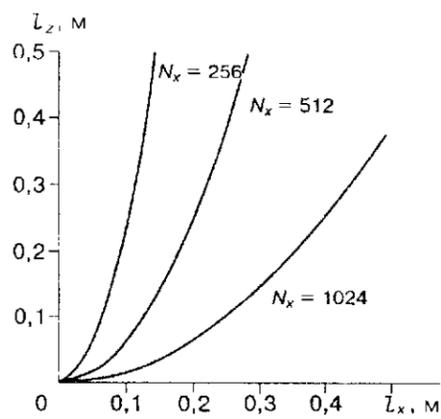


Рис. 2

но применять динамическую фокусировку. С этой целью линзу L_2 телескопа необходимо перемещать в соответствии с перемещением подвижного экрана вдоль оси Z . Заметим, что в случае применения вращающегося экрана с винтовой рассеивающей поверхностью динамическая фокусировка оказывается невозможной.

3. Характеристики АО-дефлектора в режиме построения изображений. Изображения сечений формируются последовательно по точкам путем подачи в АО-ячейки управляющих сигналов в виде прямоугольных радиоимпульсов, следующих с периодом $T_0 = T + \delta$, где T — длительность импульсов, а δ — длительность промежутка между ними. Для обеспечения максимальной скорости переключения лазерного пучка длительность управляющих импульсов выбирают равной $T = \tau = D/V$, где τ — время прохождения звуковой волны в ячейке через сечение лазерного пучка диаметром D , а V — скорость звука. Предположим, что дефлектор переключает пучок из точки x_1, y_1 в точку x_2, y_2 . На рис. 3, а в виде квадрата $ABCD$ условно изображены границы апертуры АО-ячеек. Заштрихованные квадраты 1—4 представляют собой участки апертуры, заполненные акустическими импульсами. Границы этих участков движутся вдоль осей X и Y со скоростью звука V . Участок 1 соответствует наложению акустических импульсов с частотами $f(x_1)$ и $f(y_1)$, формирующих в выходной плоскости световое пятно с координатами x_1, y_1 . Участок 2 соответствует наложению импульсов с частотами $f(x_2)$ и $f(y_2)$, формирующих пятно с координатами x_2, y_2 . В данный момент участок 1 входит в апертуру АО-ячеек, а участок 2 — выходит. Участки 3 и 4 соответствуют наложению импульсов с частотами $f(x_1), f(y_2)$ и $f(x_2), f(y_1)$. Они формируют в выходной плоскости

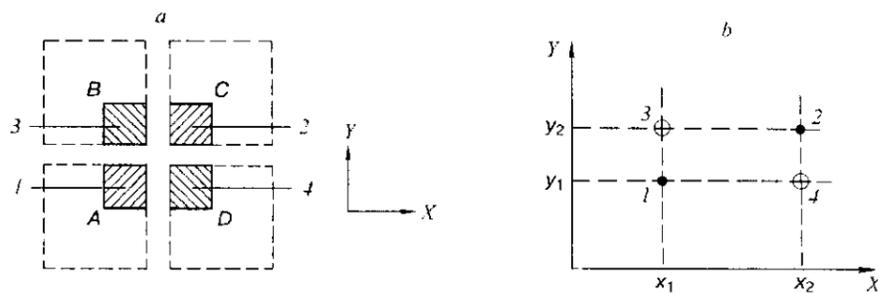


Рис. 3

паразитные световые пучки в точках x_1, y_2 и x_2, y_1 . Расположение сигнальных световых пучков 1, 2 и паразитных пучков 3, 4 показано на рис. 3, б. Ясно, что паразитные пучки не наблюдаются в случае, когда $\delta \geq \tau$. Найдем отношения световой энергии в центре симметрии сигнальных и паразитных пучков (т. е. S/F) в зависимости от параметра δ/τ . С этой целью будем полагать, что световой пучок в плоскости АО-ячеек имеет гауссов профиль, спадающий по интенсивности на краях апертуры ячеек в $1/e^2$ раз. Поскольку интенсивность света в сигнальных и паразитных пучках зависит от времени переходного процесса, то энергии этих пучков находились как результат интегрирования их интенсивностей за время τ . Результаты расчета представлены на рис. 4. Видно, что при увеличении значения δ/τ от 0 до 1 отношение S/F возрастает от 8,4 до ∞ . На практике минимальное значение δ/τ выбирается равным 1/2, так как в этом случае обеспечивается достаточно высокое отношение $S/F = 685$.

Переходный процесс приводит также к дифракционному уширению световых пятен в выходной плоскости дефлектора. Распределение энергии в световом пятне в зависимости от координаты x для переходного процесса, при котором $T = \tau$, показано на рис. 5 (кривая 1). Для сравнения приведено распределение энергии для стационарного случая, когда $T \gg \tau$ (кривая 2), и в пучке с равномерным распределением интенсивности в плоскости ячеек (кривая 3). Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что переходный процесс приводит к уширению гауссова светового пятна по уровню $1/e^2$ примерно в 1,35 раза. Для ясности отметим, что при расчете кривой 1 амплитудное распределение светового пятна в каждый момент времени переходного процесса находилось путем вычисления преобразования Фурье от распределения поля амплитуды в плоскости АО-ячейки, которое предполагалось гауссовым. Далее находилось распределение энергии светового пятна как результат интегрирования по времени квадрата амплитудного распределения.

Количество разрешимых положений светового пучка N , обеспечиваемое АО-дефлектором, определяется выражением

$$N = \tau \Delta f, \quad (3)$$

где Δf — полоса частот управляющего сигнала. Однако при этом необходимо учитывать, что соседние световые пучки не разрешаются по критерию Рэлея, а перекрываются по уровню яркости 0,7. Распределение яркости в соседнем световом пятне показано кривой 4 (см. рис. 5).

Дефлектор создан на основе двух АО-ячеек с анизотропной дифракцией света. В качестве материала светозвукопровода использован кристалл парателлурита (TeO_2). Полоса рабочих частот дефлектора $\Delta f = 60$ МГц, световая

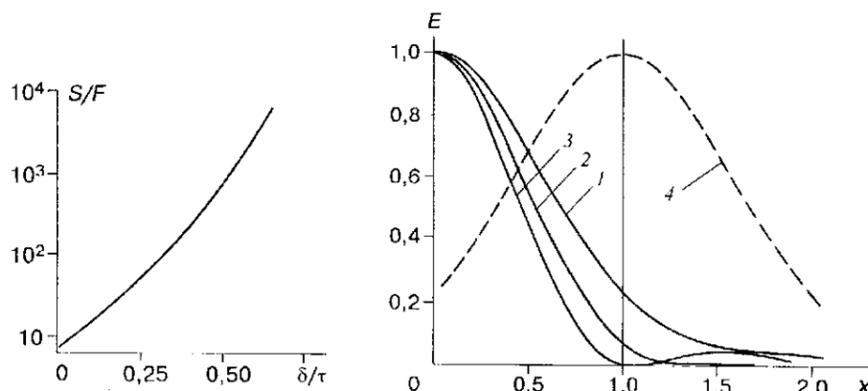


Рис. 4

Рис. 5

апертура 7×7 мм, дифракционная эффективность 50 % (для двух координат). С целью обеспечения $N = 256$ разрешающих позиций апертурное время в соответствии с (3) выбрано равным $\tau = 4,27$ мкс. При этом диаметр сечения светового пучка в плоскости АО-ячеек $D = V\tau = 2,8$ мм ($V = 0,65$ км/с). Параметры управляющих сигналов: длительность импульса $T = \tau = 4,27$ мкс, задержка $\delta = \tau/2 = 2,13$ мкс, период следования $T_0 = 6,4$ мкс.

Максимальное число точек трехмерного изображения, формируемых за время кадра t_k , равно $M = t_k/T_0$. Если $T_0 = 6,4$ мкс и $t_k = 40$ мс (соответствует частоте регенерации объемного изображения 25 Гц), то число точек в кадре $M = 6250$.

4. Лазерная система визуализации. Схема экспериментальной лазерной системы формирования трехмерных изображений показана на рис. 1. Элементы конструкции подвижного экрана приведены на схеме рис. 6, где M — электродвигатель, приводящий во вращение систему маховиков $1-4$ с закрепленным на подшипниках плоским экраном 5 . Маховики имеют противовесы для компенсации веса экрана и балансировки вращения. Во избежание «мертвой точки» в среднем положении экрана предусмотрен рычаг, установленный на маховиках $3, 4$ со сдвигом относительно экрана 5 на 90° (на рис. 6 рычаг не показан). Рассеивающий экран выполнен из оргстекла размером 150×100 мм и толщиной 2 мм. Максимальный размер перемещения экрана по оси Z 50 мм. Электродвигатель имеет встроенный электромагнитный датчик положения вала (S_1). Датчик S_1 вырабатывает 625 периодов синусоидального напряжения на оборот двигателя. Датчик начального положения S_2 смонтирован на оси вращения маховиков $3, 4$ и представляет собой пару «светодиод — фотодиод», между которыми перемещается узкая прозрачная щель. В качестве источника лазерного излучения применен гелий-неоновый лазер ($\lambda = 0,63$ мкм) мощностью 20 мВт.

Данные на управление АО-дефлектором передаются от компьютера IBM PC 486 в виде 16-разрядного двоичного кода (по 8 разрядов на каждую из координат X, Y).

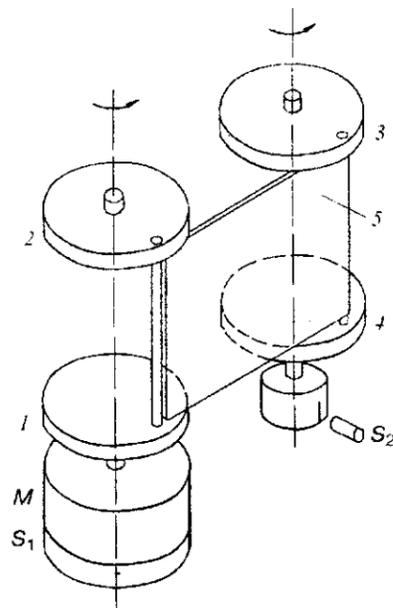


Рис. 6

АО-дефлектор на кристаллах TeO_2 обеспечивает отклонение светового пучка на 256×256 позиций. При указанном разрешении необходимости в динамической фокусировке изображения не возникает (см. разд. 2). Дефлектор обеспечивает время произвольной адресации лазерного пучка 6,4 мкс и, как уже отмечалось, формирует за время одного кадра регенерации 6250 точек объемного изображения (см. разд. 3).

Число отображаемых планов (сечений) трехмерных изображений равно 150. Сдвиг экрана по глубине в течение времени формирования одного сечения приводит к ошибке в положении точек изображения. Для ошибки, не превышающей расстояние между соседними сечениями, максимальное число отображаемых точек в каждом сечении 40.

Обеспечено формирование ряда тестовых трехмерных изображений в реальном времени. Исходные объекты представляли собой объемные геометрические фигуры, имеющие аналитическое описание (куб, пирамида, конус, шар и др.), а также сцены, формируемые из множества пространственных точек и линий. Объем отображаемого пространства составлял $256 \times 256 \times 150 = 10^7$ точек.

Иллюстрирована динамика изменения отображаемых объемных фигур во времени: их вращение, перемещение, случайное движение точечных объектов и т. д.

Частота регенерации изображений, формируемых только на прямом ходе экрана, равнялась частоте вращения электродвигателя и достигала 25 Гц. При формировании изображений на прямом и обратном ходе экрана частота регенерации может достигать 50 Гц. Слитное объемное изображение наблюдается при частотах регенерации, превышающих 12—14 Гц. Яркость изображения при его наблюдении со стороны оси Z достаточна для восприятия в освещенном помещении. При наблюдении изображения вдоль оси X яркость изображения существенно уменьшается, и оно может наблюдаться только в затемненном помещении. Причиной уменьшения яркости является малое рассеяние света в направлении, близком к плоскости экрана.

Заключение. Разработана экспериментальная лазерная система визуализации трехмерных изображений на основе двухкоординатного АО-дефлектора света и плоского рассеивающего экрана. Экран перемещается возвратно-поступательным способом параллельно самому себе и обеспечивает постоянный размер и яркость точек изображения в объеме пространства. Дополнительным преимуществом плоского экрана является то, что он позволяет применять динамическую фокусировку изображения в тех случаях, когда необходимо увеличивать глубину отображаемого пространства.

Показано, что глубина отображаемого пространства возрастает с увеличением поперечных размеров изображения и с уменьшением линейной разрешающей способности. Так, при разрешающей способности $N < 512$ (оси X, Y) глубина отображаемого пространства (по оси Z) сопоставима с поперечными размерами изображения, а при разрешении $N > 1024$ глубина пространства, как правило, меньше поперечных размеров изображения.

Показано также, что паразитные световые пучки перекрестного фона в АО-дефлекторе можно исключить путем введения задержки между управляющими импульсами, поступающими в АО-ячейки. Минимальное время задержки составляет $\tau/2$, где τ — время пробега акустической волны через апертуру АО-ячейки. Минимальное время адресации светового пучка равно $1,5\tau$.

Вследствие переходных процессов, возникающих при прохождении акустических импульсов в АО-ячейках, диаметр световых пятен в выходной плоскости дефлектора уширяется примерно в 1,35 раза.

Экспериментально подтверждены возможности формирования трехмерных изображений со следующими характеристиками: частота регенерации кадров 25 Гц; информативность объемных изображений (число точек изображения, формируемых за время кадра) 6250; угол обзора $\pm 75^\circ$.

Указанные результаты получены нами в 1994 г. В процессе дальнейшей работы информативность формируемых трехмерных изображений увеличена более чем на порядок [5].

Дальнейшие работы в области лазерных систем трехмерной визуализации будут вестись в направлении формирования трехмерных полутонных и цветных изображений, повышения их информативности, увеличения размеров экрана, развития программных средств визуализации и т. п.

Важным направлением исследований является также поиск путей создания экранов немеханического типа, например, в виде стопки плоских коммутируемых экранов, каждый из которых отображает свое сечение объекта. Такие экраны могут быть реализованы, в частности, на основе жидких кристаллов, диспергированных в слое полимера [6]; они способны переключаться из прозрачного состояния в состояние рассеяния света и наоборот за время порядка единиц миллисекунд. Другая возможность заключается в применении прозрачных объемных сред с двухфотонной люминесценцией. Здесь изображение светящейся точки в объеме среды получается в области пересечения двух лазерных световых пучков [7].

Авторы выражают искреннюю благодарность В. Н. Затолокину, Н. Н. Вьюхиной и И. Б. Рудакову за участие в работе и оказанную ими высококвалифицированную помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шендл Д. Наконец-то реальная трехмерность // Электроника: Пер. с англ. 1990. № 18. С. 7.
2. Solomon D. Volumetric imaging launches graphics into a 3-D world // Photonic Spectra. 1993. 27, N 6. P. 129.
3. Заявка 2134383 ФРГ. Способ оптического отображения трехмерно распределенных в пространстве точек. Оpubл. 13.02.75.
4. Джерард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.
5. Савельев В. В., Твердохлеб П. Е., Трубецкой А. В. и др. Формирование трехмерных изображений с помощью высокоскоростного каскадного акустооптического дефлектора // Автометрия. 1997. № 2. С. 11.
6. Жаркова Г. М., Стрельцов С. А., Хачатурян В. М. Пропускание света жидкокристаллическими композитами // ЖСХ. 1993. 34, № 6. С. 118.
7. Schwarz A. J., Blundell B. G. Consideration regarding voxel brightness in volumetric display utilizing two-step excitation processes // Opt. Eng. 1993. 32, N 11. P. 2818.

Поступила в редакцию 30 июля 1996 г.