

КОЛЛИМАТОРНЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНДИКАТОР С ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ ФОРМИРОВАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ И СИСТЕМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПОДСВЕТКИ

А. А. Кишалов¹, В. М. Журба¹, Ю. Д. Пименов¹,
Д. А. Третьяков, Л. Ю. Харбергер²

¹ООО „НПП ВОЛО“, 199034, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: mail@volo.ru

²Филиал АО „РПКБ“, 195009, Санкт-Петербург, Россия

Предложена оптическая схема перспективного коллиматорного авиационного индикатора с жидкокристаллическим формирователем изображения и системой лазерной подсветки. Разработана система лазерной подсветки LCD-матрицы на базе лазерных диодов зеленой области спектра и микролинзовых массивов. Разработана коллиматорная головка с полным полем зрения $26 \times 17^\circ$ с исправленными аберрациями. Изготовлен макет коллиматорного авиационного индикатора, формирующего изображение с яркостью до $1,6 \cdot 10^4$ кд/м². Описан макет, приведены его оптические характеристики.

Ключевые слова: коллиматорный авиационный индикатор, индикатор на лобовом стекле, лазерная подсветка, микролинзовый массив

Коллиматорные авиационные индикаторы (КАИ, также известные как оптоэлектронные индикаторы на лобовом стекле и Head Up Display, HUD), относятся к числу сложных высокотехнологичных устройств авиационного приборостроения и являются центральной частью бортовых систем отображения визуальной информации [1]. Индикаторы обеспечивают наложение на реальную картину внешнего пространства различной символической информации, которая воспринимается пилотом за счет положительного яркостного контраста [2]. Поэтому актуальной задачей является создание коллиматорных авиационных индикаторов с высокой максимальной яркостью формируемого изображения, широким диапазоном регулировки яркости и равномерной яркостью по полю зрения.

На сегодняшний момент формирователем изображения в КАИ обычно служит высокояркостная проекционная электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), экран которой совмещен с передней фокальной поверхностью оптической системы, проецирующей изображение в бесконечность [2]. При этом ЭЛТ обладает рядом существенных недостатков, таких как: недостаточная яркость формируемого изображения, уменьшение яркости при формировании растрового изображения, зависимость положения нулевой точки от конфигурации электромагнитных полей (дрейф нуля), быстрая деградация люминофора, большая длина и низкая стойкость к ударам и вибрациям. Последнее приводит к полной потере изображения даже в случае небольших повреждений. В настоящее время в перспективных КАИ вместо ЭЛТ используются матричные формирователи изображения: матрицы LCD, LCoS и FLCoS, дисплеи OLED и AMOLED, устройства DLP и MEMS.

Другой ключевой характеристикой КАИ является размер полного и мгновенного поля зрения. Большой размер поля зрения существенно увеличивает возможности КАИ, поскольку позволяют разместить больше информации, следовательно не переводить взгляд на шкалы и индикаторы оперативно реагировать на изменение внешней обстановки. Необходимость увеличения поля зрения, как пути развития КАИ, отмечена во многих источниках [2, 3].

В настоящей статье приведены результаты разработки КАИ с жидкокристаллическим формирователем изображения и системой лазерной подсветки, обладающего высокими значениями максимальной яркости формируемого изображения и большим размером поля зрения, как полного, так и мгновенного.

Принцип создания коллиматорного авиационного индикатора с жидкокристаллическим формирователем изображения и системой лазерной подсветки. Как отмечалось выше, размеры полей зрения являются одной из ключевых характеристик, следовательно, для создания широкоугольного КАИ необходимо минимизировать фокусное расстояние коллиматорной головки и использовать формирователь изображения большого размера. Эти требования находятся в противоречии, так как уменьшение фокусного расстояния коллиматорной головки с плоским комбинером равнозначно увеличению ее апертурного угла, что ведет к катастрофическому снижению качества изображения вследствие увеличения aberrаций, в первую очередь дисторсии. Необходимость устранения aberrаций ведет к усложнению оптической схемы коллиматорной головки, что наряду с большими габаритами оптических элементов и требуемой большой светосилой ведет к непреодолимым трудностям. Ограничения, налагаемые на светосильные объективы с большим апертурным углом, подробно описаны в [4].

Из наиболее короткофокусных КАИ известен прибор с двойным плоским комбинером и фокусным расстоянием коллиматорной головки 104,8 мм [5], что для обеспечения полного поля диаметром в 30° требует использования формирователя изображения размером 56 мм. Высокая яркостные матричные формирователи изображения такого размера не производятся.

Одним из способов преодоления описанной проблемы является переход на двухкомпонентную оптическую схему с использованием светосильного по отношению к ходу лучей комбинером. Комбинер такого типа принято называть силовым. Он представляет собой вогнутый сферический либо асферический оптический элемент, который при работе на отражение имеет положительную оптическую силу, а при работе на просвет — нулевую. Схематично устройство КАИ внеосевого типа с силовым комбинером представлено на рис. 1. В состав КАИ входят формирователь изображения 1, объектив 2, зеркало 3 и комбинер 4 (5 — глаза наблюдателя (пилота), 6 — внешнее (закабинное) пространство). В данном случае формирователь изображения располагается в фокальной плоскости не объектива, а двухкомпонентной оптической системы, состоящей из объектива и силового комбинера. Эквивалентный фокус системы такого типа может быть меньше фокуса описанной выше оптической системы, однако комбинер, являясь внеосевым оптическим элементом, вносит различные aberrации, в первую очередь, дисторсию и астигматизм, которые могут быть исправлены в оптической системе или при формировании изображения. Кроме того, полное поле зрения в данной схеме близко к мгновенному.

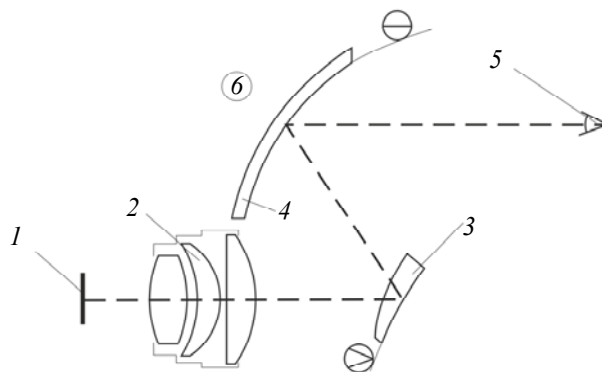


Рис. 1

Опыт разработки авиационных индикаторов [2, 6—8] продемонстрировал возможность расчета и изготовления сложных оптических систем указанного типа с децентрированной оптикой и асферическими линзами.

Подберем формирователь изображения, подходящий для использования в составе КАИ. Известно много работ, посвященных описанию и сравнению матричных формирователей изображения, например [9, 10]. Однако к формирователям, используемым в составе КАИ, предъявляются особые требования. Ключевыми требованиями являются: высокая яркость формируемого изображения, высокий контраст, максимальные размеры и стойкость к ударам и вибрациям. На второй план отходят размеры пикселей, эффективность использования площади формирователя изображения и частота кадровой развертки, возможность работы в полноцветном режиме также является несущественной.

Несмотря на техническую возможность достижения яркости в 10^5 кд/м² на дисплеях OLED и AMOLED, производители рекомендуют использовать такие дисплеи при низких уровнях яркости — до 10^3 кд/м², так как срок службы дисплея обратно пропорционален его яркости. DLP и MEMS устройства используют электромеханический принцип перемещения зеркальных элементов, поэтому обладают низкой стойкостью к ударам и вибрациям.

Поэтому наиболее перспективными формирователями изображения являются матрицы LCD, LCoS и FLCoS, используемые в цифровых кинопроекторах — видеопроекторах с высокой разрешающей способностью и мощным световым потоком. Так как в качестве формирователя изображения предпочтительно использовать матрицу максимально доступного размера, для создания КАИ была выбрана LCD-матрица SONY диагональю 1,8' (36,8×27,6 мм) с разнесенными поляризаторами.

Для работы LCD-матрицы требуется подсветка всей ее площади поляризованным излучением высокой интенсивности с высокой равномерностью по площади, а для работы в составе КАИ требуется узкополосное излучение в видимой области спектра. В связи с этим перспективно использование в качестве источника излучения лазерных диодов с длиной волны 520 нм. Преимуществами лазерных диодов является их высокая монохроматичность, поляризованность излучения, высокая яркость, а также возможность формирования пучков с точно заданными угловыми характеристиками.

Таким образом, в состав КАИ должны войти внеосевая коллиматорная головка с силовым сферическим комбинером, LCD-матрица в качестве жидкокристаллического формирователя изображения и осветитель на базе лазерных диодов.

Устройство коллиматорного авиационного индикатора. Рассмотрим устройство осветителя более подробно. Для создания яркого и равномерного изображения на поверхности выбранной матрицы требуется сформировать пятно линейно поляризованного излучения с высокой равномерностью по его поперечному сечению и перекрывающего всю площадь. Поскольку матрица имеет прямоугольную форму с соотношением сторон 4:3, пятно круглой формы будет виньетироваться на оправе матрицы. Поэтому в осветителе использован принцип формирования квадратного пятна с равномерным распределением мощности по его сечению при помощи микролинзовых массивов. Для уменьшения продольного размера осветителя целесообразно использовать короткофокусные микролинзовые массивы.

Микролинзовый массив (рис. 2) гомогенизирует пучок в направлении, перпендикулярном образующей цилиндрического элемента раstra. Следовательно, для гомогенизации пучка в обоих направлениях необходимо использовать два взаимно скрещенных микролинзовых массива данного типа. Принцип работы микролинзового массива подробно описан в [11]. На выходе наблюдается равномерный по сечению пучок лазерного излучения, если задняя поверхность элемента микролинзового массива находится в фокальной плоскости передней поверхности элемента массива (в парааксиальном приближении). В этом случае числовая апертура растрового элемента определяется как:

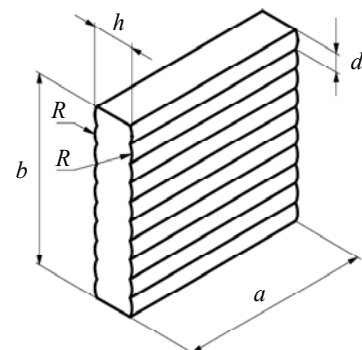


Рис. 2

$$NA = \frac{d}{2f} = \frac{d(n-1)}{2R} \quad (1)$$

где d — размер элемента микролинзового массива, f — эквивалентное фокусное расстояние поверхности элемента, R — радиус кривизны элемента, n — показатель преломления массива.

Числовая апертура характеризует угол на выходе из массива и угол, под которым допустимо вводить сколлимированный пучок лазерного излучения в массив.

Нами были выбраны цилиндрические микролинзовые массивы с параболическим профилем образующей цилиндра (рис. 3), параметры которых представлены ниже. Согласно (1), числовая апертура этих массивов составляет 0,23. Данное значение числовой апертуры соответствует половине угла на выходе и входе массива в 13° .

Параметры микролинзовых массивов

Тип растрового элемента.....	Двояковыпуклый
Профиль поверхности элемента.....	Параболический
Размер раstra $a \times b$, мм.....	10×10
Толщина h , мм.....	0,75
Шаг d , мм.....	0,3
Эквивалентный радиус кривизны R , (мм).....	0,293
Материал.....	Кварц ($n_{546}=1,46$)

В качестве источников излучения нами выбраны лазерные диоды с длиной волны излучения $\lambda=520$ нм, выходной мощностью 1 Вт, размером излучающей площадки 1×16 мкм и расходимостью 46 и 11° по быстрой и медленной оси соответственно. По стандарту КТ-8055 яркость изображения, формируемого КАИ, должна быть не менее 6000 кд/м². Исходя из компоновки изделия и требований к его высокой яркости, было использовано 6 лазерных диодов. Общий принцип работы осветителя проиллюстрирован на рис. 3, а. Излучение лазерных диодов (1) коллимируется асферическими линзами (2) с фокусным расстоянием 8 мм. Далее излучение проходит через систему клиньев (3), которые направляют лучи на гомогенизатор (4), под углами, меньшими NA. Гомогенизатор состоит из двух перпендикулярных микролинзовых массивов. Далее гомогенизированное лазерное излучение при помощи конденсора (5), расположенного таким образом, чтобы спроецировать изображение гомогенизатора во входной зрачок коллиматорной головки (7), направляется на матрицу (6). На рис. 3, б показана 3D-модель расположения оптических элементов осветителя внутри изделия, где помимо элементов, указанных на рис. 3, а, указаны зеркала (9), необходимые для излома оптических осей и рассеиватель (8). Рассеиватель необходим для устранения эффекта Галбота, заключающегося в формировании характерной мелкопериодической картины при интерференции света, прошедшего через периодическую преломляющую или рассеивающую структуру. Как отмечено в [12], при взаимодействии когерентного света с периодическими структурами, такими как микролинзовый массив, всегда будут сохраняться следы периодической структуры при дальнейшем распространении света, что является основным недостатком использования микролинзовых массивов совместно с когерентным и хорошо сколлимированным лазерным излучением.

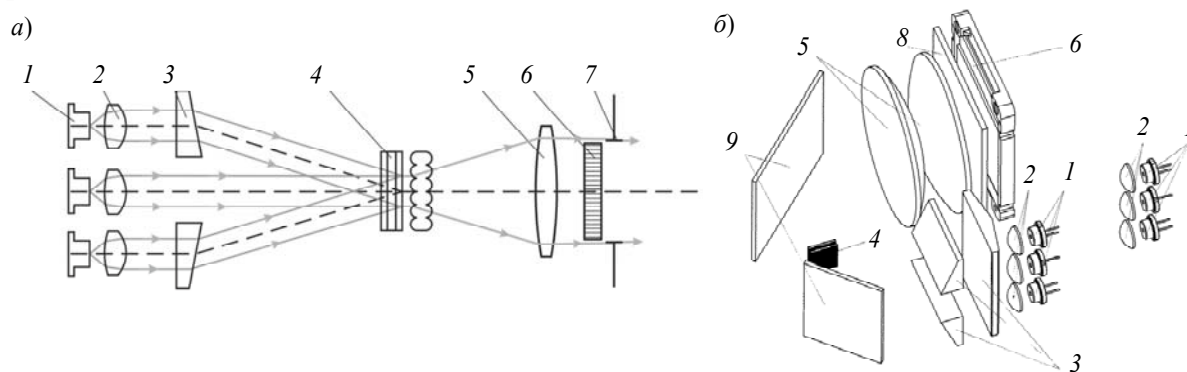


Рис. 3

Коллиматорная головка (рис. 4) представляет собой двухканальную коллимирующую оптическую систему с каналом LCD-матрицы (1) и каналом сетки (2), которые совмещаются по двум ортогональным поляризациям при помощи светоделительного куба (3). Далее свет проходит через объектив (4) и, отражаясь от светосильного клина (5) и комбинера (6) с нанесенным на нем узкополосным отражающим покрытием, направляется вдоль линии визирования в глаза пилота. В результате пилот воспринимает сколлимированное изображение матрицы (сетки) на фоне внешнего пространства. Следует отметить, что в оптической системе приняты меры для устранения aberrаций: дисторсии и астигматизма. Коллимирующая система имеет эквивалентное фокусное расстояние 77,8 мм и остаточную дисторсию в поле $20 \times 17^\circ$ менее 4 %. В схеме использованы две асферические и одна цилиндрическая оптические поверхности, всего схема содержит 21 оптическую поверхность. Для подсветки сетки используются светодиоды зеленой области спектра.

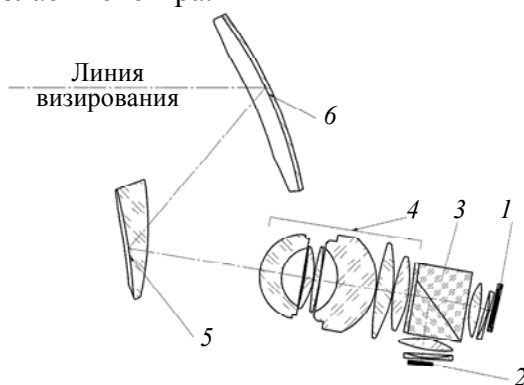


Рис. 4

Макет коллиматорного авиационного индикатора. На рис. 5 представлен внешний вид макета КАИ с жидкокристаллическим формирователем изображения и системой лазерной подсветки. Макет индикатора представляет собой прибор, собранный в едином блоке, в состав которого помимо коллиматорной головки, LCD-матрицы и системы лазерной подсветки входят система электропитания и драйвер LCD-матрицы. Макет подключается к персональному компьютеру по HDMI-интерфейсу и выводит сколлимированное изображение на ПК. На рис. 6 представлено изображение, сформированное через комбинер макетом, на фоне внешней обстановки. Размер макета КАИ: длина 580 мм, ширина 200 мм и высота 190 мм (без учета комбинера). Размер комбинера составляет 270×215 мм, расстояние от центра комбинера до точки расположения глаз пилота 620 мм.



Рис. 5

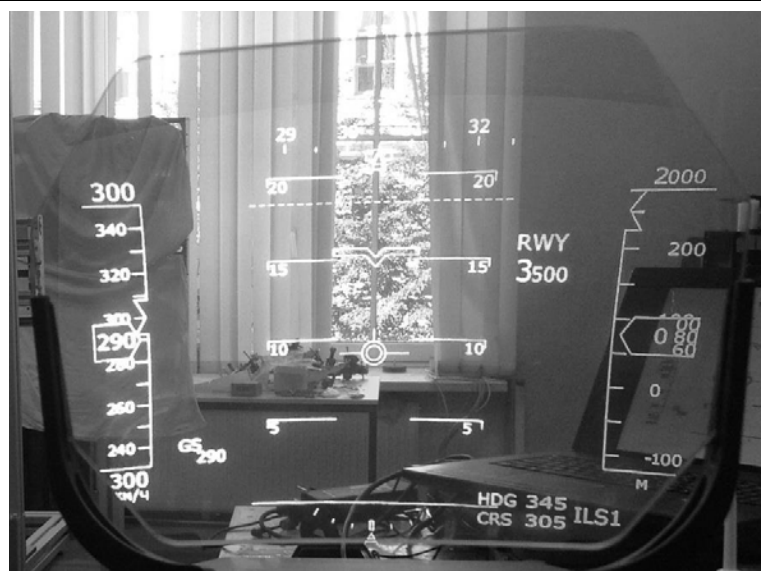


Рис. 6

Макет КАИ формирует четкое изображение, не вызывающее дискомфорта при наблюдении, мерцание изображения отсутствует. Заметна спекл-структура, характерная для когерентного излучения, однако субъективно ее наличие не вызывает повышенной утомляемости глаз и не приводит к ошибочному восприятию информации. Измеренные оптические характеристики макета приведены ниже. В таблице основные характеристики макета КАИ сопоставлены с характеристиками серийно выпускаемых коллиматорных индикаторов и требованиями стандарта КТ-8055.

Оптические характеристики макета КАИ

Размер зоны видимости изображения, мм	
по высоте	100
по ширине	110
по глубине	210
Размер полного поля зрения, ...°	26×17
Размер мгновенного поля зрения, ...°	24×16
Яркость изображения, кд/м ²	
в центре	16000
по краю	11000
Неравномерность яркости изображения, %	18,5
Собственный контраст изображения	150:1
Дисторсия, %	
в поле 10×10°	< 2
в поле 20×17°	< 4
Ошибки параллакса, мрад	
конвергенция	2
дивергенция	1
дипвергенция	1

Основные характеристики индикаторов

Индикатор	Размер зоны видимости, В×Ш×Г, мм	Размер полного поля зрения, ...°	Яркость изображения кд/м ²
Макет КАИ	100×110×210	26×17	16000
Digital light engine (BAE SYSTEMS)	Нет данных	25×22	6000
LiteHUD (BAE SYSTEMS)	8×177,8 не ограничено по глубине	25×20	8500
СМА-7100Digital SparrowHawk	Ø127 не ограничено по глубине	Ø28	6000
ШКАИ (ОКБ Электроавтоматика)	Нет данных	30×20	10000
Требования КТ-8055	50,8×76,2×101,6	Не регламентируется	≥6000

Выводы. В работе предложена оптическая схема широкоугольного КАИ с жидкокристаллическим формирователем изображения и системой лазерной подсветки. Создан макет КАИ, проверены технические решения и измерены оптические характеристики КАИ. Показано, что макет КАИ не уступает по оптическим характеристикам, а по яркости существенно превосходит как требования стандартов (например, КТ-8055), так и существующие российские и мировые аналоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О.* Бортовые средства отображения информации современных пилотируемых летательных аппаратов // *Современные технологии: Сборник статей.* СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 154—165.
2. *Никифоров О. В., Пименов Ю. Д., Сокольский М. Н.* и др. Оптическая система широкоугольного коллиматорного авиационного индикатора // *Оптический журнал.* 2009. Т. 76, № 10. С. 37—41.
3. *Бахолдин А. В., Васильев В. Н., Гримм В. А.* и др. Оптические устройства виртуальных дисплеев // *Оптический журнал.* 2013. Т. 80, № 4. С. 5.
4. *Волосов Д. С.* Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 670 с.
5. Пат. РФ 2358302. Индикатор коллиматорный широкоугольный / *П. А. Благов, Л. И. Лесман, П. П. Парамонов* и др. 2009.
6. *Багдасаров А. А., Пименов Ю. Д., Филатов А. А.* и др. Современные тенденции и проблемы композиции оптических схем надголовных дисплеев авиационного базирования // *Тр. 11 Междунар. конф. „Прикладная оптика—2014“.* СПб, 21—24 октября 2014.
7. *Пименов Ю. Д., Дрягин Д. М., Никандров Г. В.* и др. Малогабаритный надголовный (Head-Up) без дисторсии // *Междунар. конф. „Прикладная оптика—2016“.* СПб, 15—18 ноября 2016.
8. Пат. РФ 63559. Оптическая система проекционного бортового индикатора / *Л. О. Краснова, В. О. Никифоров, Ю. Д. Пименов* и др. 2007.
9. *Шишкин И. П.* Разработка и исследование малогабаритных проекционных оптических систем высокого разрешения: автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МИИГАиК, 2017.
10. *Чистобаев Д. В., Краснобаев Е. А.* Анализ современных технологий в проекционных оптических системах индикации // *Вестн. ВДУ.* 2016. № 4(93). С. 12—15.
11. *Schreiber P., Kudaev S. Dannberg P.* et al. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays // *Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems II.* Intern. Society for Optics and Photonics. 2005.
12. *Voelkel R., Weible K. J.* Laser beam homogenizing: limitations and constraints // *Optical Fabrication, Testing, and Metrology III.* Intern. Society for Optics and Photonics. 2008.

Сведения об авторах

- Антон Александрович Кишалов** — ООО „НПП ВОЛО“; начальник лаборатории оптоэлектронных систем; E-mail: grinfo@mail.ru
- Владимир Михайлович Журба** — ООО „НПП ВОЛО“; генеральный директор; E-mail: mail@volo.ru
- Юрий Дмитриевич Пименов** — канд. техн. наук; ООО „НПП ВОЛО“; старший научный сотрудник; E-mail: youripim@yandex.ru
- Дмитрий Александрович Третьяков** — E-mail: xeserv178@gmail.com
- Лев Юрьевич Харбергер** — филиал АО „РПКБ“; начальник отдела оптики; E-mail: luharberger@spb.rpkb.ru

Поступила в редакцию
09.06.2020 г.

Ссылка для цитирования: *Кишалов А. А., Журба В. М., Пименов Ю. Д., Третьяков Д. А., Харбергер Л. Ю.* Коллиматорный авиационный индикатор с жидкокристаллическим формирователем изображения и системой лазерной подсветки // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2020. Т. 63, № 10. С. 938—945.

AIRBORNE COLLIMATOR DISPLAY WITH LIQUID CRYSTAL IMAGING DEVICE AND LASER BACKLIGHT SYSTEM

A. A. Kishalov¹, V. M. Zhurba¹, Y. D. Pimenov¹, D. A. Tretyakov², L. Yu. Harberger²

¹ JSC Scientific Industrial Enterprise of Fiber Optics and Laser Equipment, Ltd, 199034, St. Petersburg, Russia
E-mail: mail@volo.ru

² JSC Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, St. Petersburg Branch, 195009, St. Petersburg, Russia

Optical design of a new airborne head-up display with liquid crystal imager and laser backlight is presented. The laser backlight system for LCD matrix is based on green laser diodes and micro-lens arrays. A head-up display with 26×17° field of view and aberration correction is developed. A prototype of the head-up display with image brightness of up to 1.6×10⁴ cd/m² is manufactured. The prototype description is presented, its optical properties are listed.

Keywords: airborne collimator display, head-up display, laser backlight, micro-lens array

REFERENCES

1. Koporskiy N.S., Vidin B.V., Zharinov I.O. *Sovremennyye tekhnologii* (Modern Technologies), Collection of articles, St. Petersburg, 2004, pp. 154–165. (in Russ.)
2. Nikiforov O.V., Pimenov Yu.D., Sokol'skiĭ M.N., Stroganov A.A., Éfros A.I. *Journal of Optical Technology*, 2009, no. 10(76), pp. 620–623.
3. Bakholdin A.V., Vasil'yev V.N., Grimm V.A. et al. *Opticheskiĭ Zhurnal*, 2013, no. 4(80), pp. 17–24. (in Russ.)
4. Volosov D.S. *Fotograficheskaya optika* (Photographic Optics), Moscow, 670 p, 1971. (in Russ.)
5. Patent RU 2358302, *Indikator kollimatornyĭ shirokougol'nyĭ* (Wide-angle Collimator Indicator), P.A. Blagov, L.I. Lesman, P.P. Paramonov et al., 2009. (in Russ.)
6. Bagdasarov A.A., Pimenov Yu.D., Filatov A.A. et al. *Prikladnaya optika-2014* (Applied Optics-2014), Proceedings of the 11th International Conference, October 21–24, 2014. (in Russ.)
7. Pimenov Yu.D., Dryagin D.M., Nikandrov G.V. et al. *Prikladnaya optika-2016* (Applied Optics-2016), Proceedings of the International Conference, St. Petersburg, November 15–18, 2016. (in Russ.)
8. Patent RU 63559, *Opticheskaya sistema proyeksionnogo bortovogo indikatora* (On-board Projection Display Optical System), L.O. Krasnova, V.O. Nikiforov, Yu.D. Pimenov et al., 2007. (in Russ.)
9. Shishkin I.P. *Razrabotka i issledovaniye malogabaritnykh proyeksionnykh opticheskikh sistem vysokogo razresheniya* (Development and Research of Small-Sized High-Resolution Projection Optical Systems), Extended abstract of candidate's thesis, Moscow, 2017. (in Russ.)
10. Chystabayev D.V., Krasnobayev E.A. *Bulletin of Vitebsk State University*, 2016, no. 4(93), pp. 12–15. (in Russ.)
11. Schreiber P., Kudaev S. Dannberg P. et al. *Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems II*, International Society for Optics and Photonics, 2005.
12. Voelkel R., Weible K.J. *Optical Fabrication, Testing, and Metrology III*, International Society for Optics and Photonics, 2008.

Data on authors

- | | |
|----------------------------|---|
| Anton A. Kishalov | — JSC Scientific Industrial Enterprise of Fiber Optics and Laser Equipment; Head of Optoelectronic Systems Laboratory;
E-mail: grinfo@mail.ru |
| Vladimir M. Zhurba | — JSC Scientific Industrial Enterprise of Fiber Optics and Laser Equipment; General Manager; E-mail: mail@volo.ru |
| Yury D. Pimenov | — PhD; JSC Scientific Industrial Enterprise of Fiber Optics and Laser Equipment; senior researcher;
E-mail: youripim@yandex.ru |
| Dmitry A. Tretyakov | — JSC Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, St. Petersburg Branch; E-mail: xeserv178@gmail.com |
| Lev Yu. Harberger | — JSC Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, St. Petersburg Branch, Department of Optics; Head of the Department;
E-mail: luharberger@spb.rpkb.ru |

For citation: Kishalov A. A., Zhurba V. M., Pimenov Y. D., Tretyakov D. A., Harberger L. Yu. Airborne collimator display with liquid crystal imaging device and laser backlight system. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 10. P. 938–945 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-938-945