

Н. А. Мжельский¹✉, Т. Н. Хацевич^{1,2}

Анализ оптических систем современных миниатюрных объективов для камер смартфонов

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² ООО «Оптическое Расчетное Бюро», г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: nikolayandreevi4@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается анализ оптических систем современных миниатюрных объективов для камер смартфонов, которые являются одним из ключевых направлений развития прикладной оптотехники. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения высокого качества изображения при крайне ограниченных габаритных размерах оптических модулей и росте требований к разрешающей способности, углу поля зрения и светосиле. Целью исследования является выявление закономерностей формирования параметров оптических систем и выбора оптических материалов на основе анализа современных патентных решений. В качестве методов исследования использован сравнительный анализ патентных разработок в области миниатюрных объективов, включающий систематизацию параметров оптических систем, исследование используемых оптических материалов. Обработка данных выполнялась с использованием табличных методов и компьютерного анализа. В результате исследования установлено, что фокусные расстояния объективов находятся в диапазоне от 1,46 до 5,59 мм; относительные отверстия – от 1:2,29 до 1:1,45; угловые поля – от 70 до 142 градусов; количество линз в объективах – от пяти до девяти. Выявлено 16 марок полимерных материалов, применяемых в объективах сформированной выборки. Среди марок флинтовой группы наиболее распространенной является материал с показателем преломления 1,68, коэффициентом средней дисперсии 19,2; среди марок кроновой группы – материал с показателем преломления 1,55; коэффициентом средней дисперсии 56,1.

Ключевые слова: миниатюрный объектив, камера смартфона, широкоугольный объектив, асферические поверхности, оптические полимерные материалы

N. A. Mzhelskiy¹✉, T. N. Khatsevich^{1,2}

Analysis of the Optical Systems of Modern Miniature Smartphone Camera Lenses

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Optical Design Office, LLC, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: nikolayandreevi4@mail.ru

Abstract. The article considers the analysis of optical systems of modern miniature lenses for smartphone cameras, which are one of the key areas of development of applied optical engineering. The relevance of the work is due to the need to ensure high image quality with extremely limited dimensions of optical modules and increasing requirements for resolution, field of view angle and aperture ratio. The aim of the study is to identify patterns in the formation of optical system parameters and the selection of optical materials based on the analysis of modern patent solutions.

The research methods used are a comparative analysis of patent developments in the field of miniature lenses, including the systematization of optical system parameters, and the study of the optical materials used. Data was processed using tabular methods and computer analysis. As a result of the study, it was established that the focal lengths of the lenses are in the range from 1,46 to 5,59 mm; relative apertures - from 1: 2,29 to 1: 1,45; angular fields - from 70 to 142 degrees; the number of lenses in the lenses is from five to nine. Sixteen grades of polymer materials used in the lenses in the sample were identified. Among the flint grades, the most common is a material with a refractive index of 1,68 and a mean dispersion coefficient of 19,2; among the crown grades, the most common is a material with a refractive index of 1,55 and a mean dispersion coefficient of 56,1.

Keywords: miniature optical lens, smartphone imaging system, wide-angle lens, aspheric surfaces, polymer optical materials

Введение

За четвертьвековую историю возникновения и совершенствования объективы для камер смартфонов вошли в число ключевых направлений развития прикладной оптотехники. К оптическим системам объективов современных смартфонов предъявляются высокие требования к качеству формируемого изображения, включая высокую разрешающую способность, широкое угловое поле зрения, низкий уровень aberrаций, при крайне ограниченных габаритных размерах оптического модуля. Это обуславливает необходимость разработки и совершенствования миниатюрных объективов, способных обеспечивать высокие оптические характеристики в условиях жестких конструктивных ограничений [1].

Развитие объективов для камер смартфонов сопровождается активной патентной деятельностью ведущих мировых компаний, что отражает интенсивный поиск оптимальных конструктивных и оптических решений. В современных патентных документах [2-12] целевыми показателями разработок выступают: поиск оптимального дизайна асферических линз, образующих оптическую систему, включая их количество и используемые материалы, повышение качества изображения, уменьшение габаритных размеров оптической системы, повышении углового поля и относительного отверстия.

Учитывая большое количество существующих решений, нашедших отражение в патентной литературе, представляется актуальным провести их сравнительный анализ, позволяющий выявить общие тенденции развития, определить наиболее часто применяемые материалы для линз объективов, эффективные конструктивные приемы в дизайне оптических схем. В частности, представляет интерес сопоставление таких параметров, как фокусное расстояние, размер изображения, размер используемого совместно с объективом приемника излучений, сопоставление частотно-контрастных характеристик и дисторсии.

Цель статьи – представить результаты анализа оптических систем миниатюрных объективов для камер смартфонов по ограниченной выборке патентных решений.

Методы и материалы

В качестве исходных данных для проведения сравнительного анализа использованы современные патентные разработки в области миниатюрных объек-

тивов для камер смартфонов, опубликованные в 2019–2024 гг. [3, 4], [7-10], [12-15]. Отбор патентов осуществлялся по критерию принадлежности к классу МПК G02B (оптические системы и элементы), а также наличия описания оптической схемы и параметров системы.

Для анализа была сформирована выборка из 11 патентов, в которой анализировались основные параметры оптических систем, включая фокусное расстояние, формат фотоприемника, конструктивные особенности объективов. Обработка данных выполнялась с использованием табличного процессора Microsoft Excel. Для удобства анализа основные характеристики объективов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические характеристики миниатюрных объективов

№	f' , мм	$f':D$	2ω , градус	Формат приемника излучений	Общая длина, мм	Количество линз	Год	Источник
1	2,4	2,00	95,0	—	4,80	5	2019	[15]
2	5,29	1,45	79,4	1/1,79"	7,25	7	2022	[3]
3	4,5	1,90	78,6	1/1,46"	4,07	5	2022	[13]
4	4,53	—	78,6	1/2,12"	5,50	8	2022	[4]
5	6,61	—	82,4	1/1,34"	7,80	8	2023	[7]
6	1,46	2,29	142,2	1/2,37"	5,74	6	2023	[6]
7	5,49	1,85	79,0	1/2,32"	6,10	6	2023	[12]
8	6,92	—	85,3	1/1,28"	8,00	9	2024	[14]
9	3,51	—	70,0	1/2,38"	3,98	7	2024	[10]
10	3,39	1,78	82,2	—	4,28	5	2024	[8]
11	4,92	—	77,4	1/2,02"	5,55	7	2024	[9]

Оценка изображающих характеристик объективов проводилась на основе анализа графиков частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) и дисторсии, представленных в патентных документах [3, 4], [6-10], [12-15]. Для обеспечения сопоставимости результатов выполнено сравнение характеристик для различных оптических систем при близких значениях поля зрения и формата матрицы.

Сравнительный анализ включал сопоставление параметров оптических систем и оценку влияния конструктивных решений на качество изображения. Особое внимание уделялось применению асферических поверхностей, распределению оптической силы между линзовыми элементами и особенностям построения многолинзовых систем.

Для анализа используемых оптических материалов были изучены патентные источники, содержащие данные о параметрах линзовых элементов миниатюрных объективов. Из описаний оптических систем извлекались значения показателя преломления и коэффициента средней дисперсии (числа Аббе), применяемых в линзах материалов. На основе полученных данных была сформирована выборка, включающая уникальные комбинации оптических параметров материалов. В случаях повторения одинаковых значений показателя преломления и

числа Аббе в различных патентных решениях такие материалы учитывались как идентичные по своим оптическим характеристикам. Для наглядного представления распределения материалов построен график зависимости показателя преломления и коэффициента средней дисперсии (диаграмма Аббе). Полученная выборка отражает совокупность материалов, применяемых в современных миниатюрных объективах.

Результаты и обсуждения

В табл.2 представлены основные оптические характеристики органических оптических стекол (полимерных материалов), используемых в оптических системах миниатюрных объективов для смартфонов, включенных в исследуемую патентную выборку [2-15].

Таблица 2 – Оптические характеристики полимерных материалов

Материал	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
Показатель преломления	1,55	1,68	1,54	1,70	1,62	1,61	1,75	1,72
Число Аббе	56,10	19,2	55,9	30,3	60,3	61,2	44,9	29,6
Материал	m9	m10	m11	m12	m13	m14	m15	m16
Показатель преломления	1,65	1,67	1,64	1,54	1,62	1,64	1,60	1,59
Число Аббе	23,5	20,4	23,5	55,7	25,9	24,0	29,89	32,92

Поскольку в описании патентов часто отсутствуют названия марок полимерных материалов, а приводятся только их основные оптические характеристики, то в табл.2 используемым материалам присвоены условные обозначения: m1...m16. Положение материалов на диаграмме Аббе иллюстрирует рис.1.

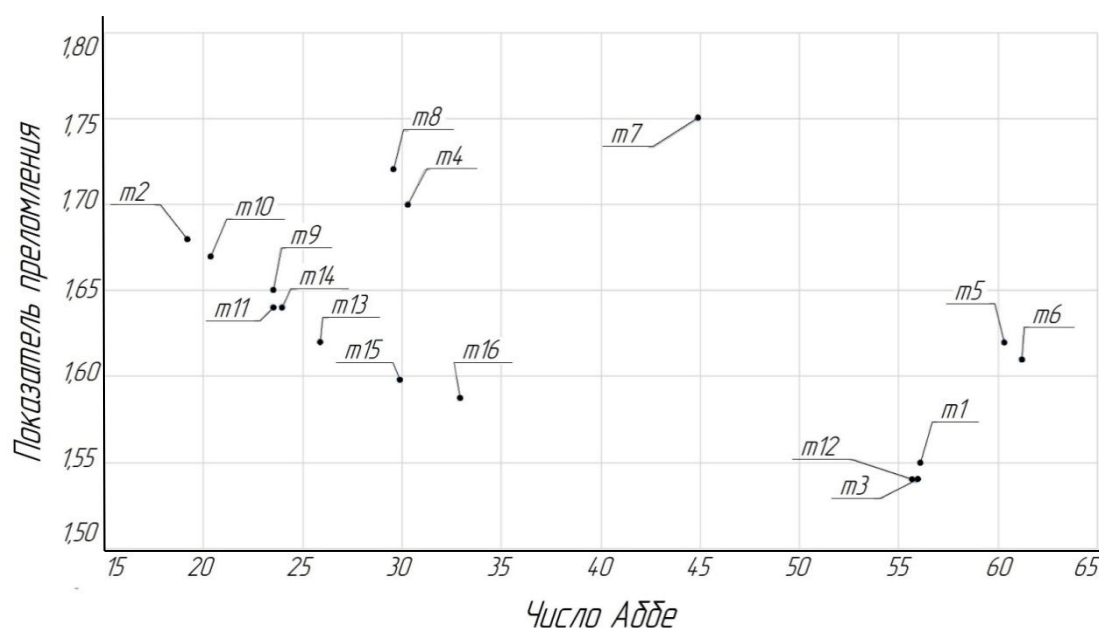


Рис. 1. Оптические характеристики 16 полимерных материалов, применяемых в оптических системах объективов для смартфонов по патентам [2-12]

Распределение материалов на диаграмме Аббе позволяет четко выделить среди них две группы: кроновую группу из 5 марок, и флинттовую группу из 11 марок материалов. При этом показатели преломления материалов находятся в диапазоне от 1,55 до 1,72, а диапазон коэффициентов средней дисперсии составляет от 19,2 до 61,2.

В целом при общем количестве оптических элементов, превышающем 66, число материалов составляет 16. Установлено, что одни и те же комбинации марок материалов повторяются в различных патентных решениях. Диаграмма, приведенная на рис.2, иллюстрирует частоту использования конкретных материалов в анализируемой выборке патентов.

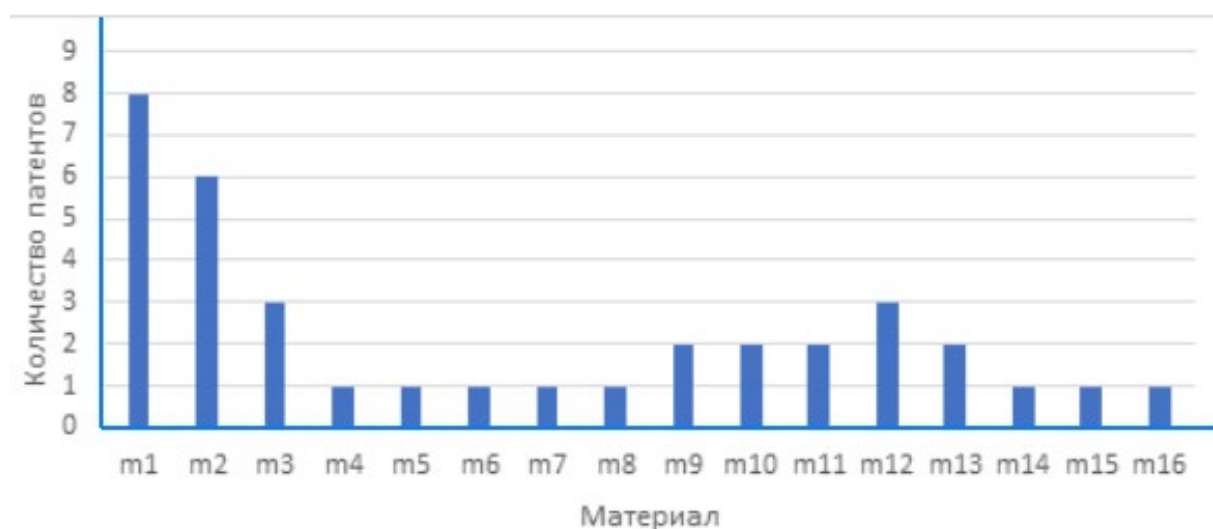


Рис. 2. Частота использования материалов в оптических системах

Положение марок материалов m1, m2, наиболее часто используемых в исследуемой выборке патентов, на диаграмме, приведенной на рис.1, свидетельствует о том, что они составляют устойчивую ахроматическую пару среди полимерных материалов, применяемых в оптических системах миниатюрных объективов. Общее количество марок материалов в конкретной оптической системе в 80% патентных решений составляет четыре-пять, но имеются оптические системы, построенные только из марок m1 и m2 [2, 4]. Сопоставление оптических характеристик марок m1 и m2 с известными марками полимерных материалов различных производителей позволило найти наиболее близкие к ним: это EP10000 и APL5014C (Япония).

Таким образом, в современных миниатюрных объективах применяется ограниченный набор марок полимерных оптических материалов, обусловленный их технологическими свойствами и оптическими характеристиками. Наблюдаемая повторяемость параметров материалов указывает на наличие устойчивых оптимальных решений, используемых при проектировании объективов для камер смартфонов.

В работе [1] приведен ретроспективный анализ оптических систем миниатюрных объективов для мобильных телефонов, на основании которого составлена табл.3, отражающая изменение оптических характеристик объективов.

Таблица 3 – Развитие оптических схем миниатюрных объективов

Тип объектива	Год	Эквивалентное фокусное расстояние, мм	Угловое поле зрения, градус	Диафрагменное число	Количество линз
Широкоугольный	2004	35	62	2,9	3
Широкоугольный	2008	28	75	2,6	5
Широкоугольный	2012	28	75	2,2	6
Телеобъектив	2016	55	42	2,4	5
Широкоугольный	2016	28	75	1,7	6
Телеобъектив	2020	28	38	2,8	5
Широкоугольный	2020	65	75	1,7	6
Сверхширокоугольный	2020	15	120	2,1	6

В качестве фокусного расстояния в табл. 3 приведены значения, эквивалентные по угловым полям объективу, сопрягаемому с традиционным для фотографической оптики приемником – пленкой формата 35 мм.

Информация, приведенная в табл.3, подтверждает, что развитие оптических систем миниатюрных объективов направлено на расширение углового поля и светосилы объективов. В оптических системах до 2020 г. количество линз в объективах не превышало 6. По мере применения в камерах мобильных телефонов приемников большого размера количество линз увеличивается до девяти из-за необходимости коррекции аберраций при расширении углового поля в пространстве предметов.

Оптический дизайн объективов для смартфонов отражает смену парадигмы в фундаментальной компоновке объективов фотографической оптики [1]. Разработчик оптических систем Д. Шейфер в [16] отмечает следующее: «Мой вывод из этого исследования заключается в том, что в обычных моделях мобильных телефонов с очень волнистой асферикой используются аберрации чрезвычайно высокого порядка для компенсации неисправимых аберраций более низкого порядка из-за неоптимального распределения третьего и пятого порядков внутри конструкций».

Анализ оптических систем, приведенных в анализируемой выборке (табл.1), свидетельствует, что при проектировании особое внимание уделяется развитию широкоугольных объективов, что приводит к увеличению углов поля зрения при одновременном росте аберраций. Это требует применения более сложных многолинзовых схем и использования асферических поверхностей. В современных оптических системах миниатюрных объективов большинство преломляющих поверхностей являются асферическими, многие из которых имеют немонотонный профиль с несколькими точками перегиба.

На рис. 3 представлены результаты моделирования оптических систем двух объективов, представленных в патентах [6, 15].

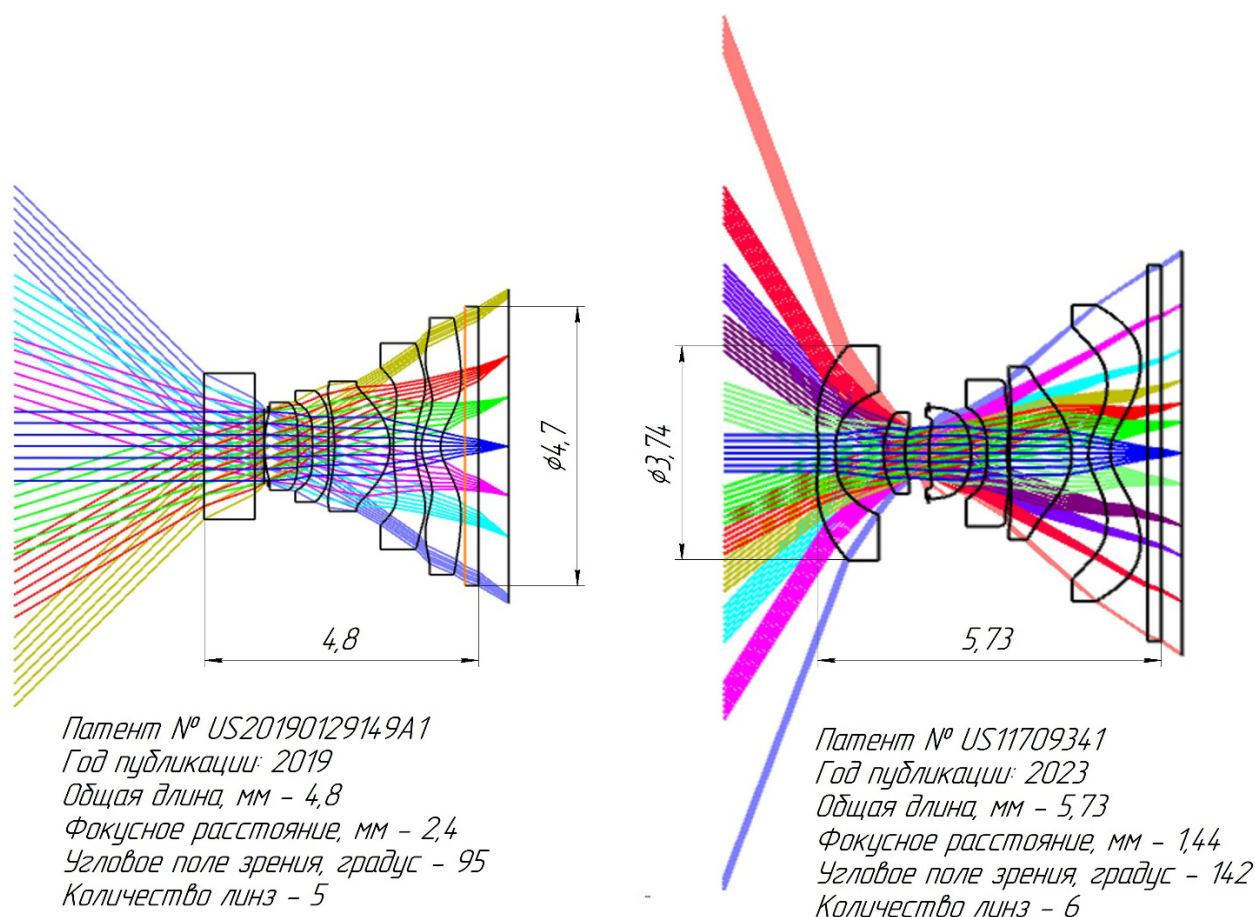


Рис.3. Примеры оптических схем миниатюрных объективов:
 а) US 2019/01,291,49 A1 [15]; б) US 11,709,341 B2 [6]

Для уменьшения диаметра первой линзы в оптической системе, приведенной на рис. 3 а, апертурная диафрагма расположена на первой линзе, что приводит к несимметричному расположению линзовых компонентов относительно апертурной диафрагмы и требует дополнительных усилий по коррекции хроматизма увеличения и aberrаций широких наклонных пучков. Все преломляющие поверхности являются асферическими с коэффициентами асферик до двадцатого порядка. Форма последних линз в системе такова, что их оптическая сила по мере удаления от оптической оси меняет знак: от отрицательной в центре до положительной на зоне и краю линзы. Такая форма линз получила образное название «крыло чайки». Общая длина вдоль оптической оси от первой поверхности защитного стекла до плоскости чувствительных элементов приемника излучений составляет 4,8 мм.

В оптической системе, приведенной на рис. 3 б, со сверхширокоугольным полем зрения апертурная диафрагма расположена внутри системы, что привело к увеличению диаметра первой линзы до 3,74 мм. Общая длина вдоль оптической оси от первой поверхности защитного стекла до плоскости чувствительных элементов приемника излучений составляет 5,73 мм. Для коррекции полевых aberrаций также используется профиль типа «крыла чайки». Все преломляющие поверхности в системе являются асферическими.

Асферический профиль поверхностей становится более сложным, что позволяет компенсировать монохроматические aberrации (такие как сферическую aberrацию, кому, астигматизм, кривизну поля) более высоких порядков. Это особенно важно, когда речь идет о широкоугольных или сверхширокоугольных объективах, которые на текущий момент активно используются в современных смартфонах и с каждым годом требования к ним становятся все более жестче.

На основании анализа качества изображения, формируемого оптическими системами миниатюрных объективов для мобильных телефонов, приведенных в исследуемой выборке патентов, установлено, что оценка качества изображения проводится по ЧКХ в диапазоне пространственных частот до 200 лин/мм. Коэффициент передачи контраста на указанной пространственной частоте составляет от 0,25 до 0,65.

Можно отметить, что развитие оптических систем объективов камер смартфонов характеризуется переходом к более сложным многолинзовым системам, обеспечивающим баланс между компактностью конструкции и высоким качеством изображения.

Заключение

На основании проведенного анализа оптических систем объективов для камер смартфонов, включенных в составленную ограниченную выборку патентных решений, датированных 2019–2024 гг., установлено, что фокусные расстояния объективов находятся в диапазоне от 1,46 до 5,59 мм; относительные отверстия – от 1:2,29 до 1:1,45; угловые поля – от 70 до 142 градусов; количество линз в объективах – от пяти до девяти. При этом все преломляющие поверхности являются асферическими, профиль которых является немонотонным с несколькими точками перегибов. Все линзы в оптических системах являются одиночными, без наличия склеенных линз. Выявлено 16 марок полимерных материалов, применяемых в объективах сформированной выборки. Среди марок флинтовой группы наиболее распространенной является материал с показателем преломления 1,68, коэффициентом средней дисперсии 19,2, среди марок кроновой группы – материал с показателем преломления 1,55; коэффициентом средней дисперсии 56,1. Наиболее близкими характеристиками к выявляемым материалам являются марки полимерных материалов EP10000 и APL5014C японского производства.

Для оценки качества изображения, формируемого оптическими системами объективов для камер смартфонов, используется ЧКХ, при этом критерием вы-

стует значение коэффициента передачи контраста не менее 0,25 на пространственной частоте 200 лин/мм.

Полученные в процессе исследования данные будут полезны для перспективных разработок оптических систем миниатюрных объективов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Blahnik, V., Schindelbeck, O. Smartphone imaging technology and its application // Journal of Optical Engineering. – 2021. – Vol. 10, № 3. – P. 145-232.
2. US 11,927,727 B2. Camera apparatus : пат. US 11,927,727 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 12.03.2024. – 42 с.
3. US 11,237,366 B2. Optical imaging lens system : пат. US 11,237,366 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 01.02.2022. – 32 с.
4. US 11,460,671 B2. Optical imaging lens system : пат. US 11,460,671 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 04.10.2022. – 35 с.
5. US 11,971,523 B2. Optical imaging system : пат. US 11,971,523 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 30.04.2024. – 39 с.
6. US 11,709,341 B2. Imaging lens module : пат. US 11,709,341 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 18.07.2023. – 37 с.
7. US 11,579,406 B2. Optical imaging lens assembly : пат. US 11,579,406 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 14.02.2023. – 41 с.
8. US 12,000,992 B2. Camera optical system : пат. US 12,000,992 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 11.06.2024. – 44 с.
9. US 12,055,686 B2. Optical lens module : пат. US 12,055,686 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 30.07.2024. – 38 с.
10. US 12,135,409 B2. Wide-angle optical imaging system : пат. US 12,135,409 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 22.10.2024. – 43 с.
11. US 11,662,556 B2. Imaging lens system : пат. US 11,662,556 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 30.05.2023. – 36 с.
12. US 11,733,487 B2. Optical imaging system : пат. US 11,733,487 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 22.08.2023. – 35 с.
13. US 11,487,090 B2. Optical imaging lens system : пат. US 11,487,090 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 01.11.2022. – 38 с.
14. US 12,111,448 B2. Optical imaging lens system : пат. US 12,111,448 B2, United States. МПК: G02B 13/00; G02B 9/60; H04N 5/225. – Оpubл. 08.10.2024. – 36 с.
15. Yao, Yuhong. Optical system and imaging device: пат. US 2019/0129149 A1, United States. МПК: G02B 13/0045; G02B 5/208; H04N 5/2254; G02B 9/60; заявл. 31.08.2018; опубл. 02.05.2019. – 40 с.
16. Shafer, D. A New Theory of Cell Phone Lenses [Электронный ресурс] : презентация. – 2019. – Режим доступа: <https://de.slideshare.net/operacrazy/a-new-theory-of-cell-phone-lenses> (дата обращения: 30.03.2026).

© Н. А. Мжельский, Т. Н. Хацевич, 2026