

Микротехнологии в компьютерной оптике

В.А. Данилов¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Бутлерова 15, Москва, Россия, 117342

Аннотация. Кратко рассказывается о развитии микротехнологий в области компьютерной оптики в контексте научного пути главного научного сотрудника Института систем обработки изображений РАН доктора технических наук, профессора Алексея Васильевича Волкова – известного специалиста в области микро- и нанотехнологий. Анализируется влияние, которое оказали его научные результаты на развитие дифракционной оптики.

1. Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) имеют давнюю историю. Первыми ДОЭ следует считать дифракционные решетки Релея-Сорэ и зонные пластинки Френеля, разработанные более 200 лет и 150 лет тому назад соответственно. Появление новых типов ДОЭ обычно связано с двумя основными факторами: методами расчета таких элементов и технологией изготовления. Дифракционные решетки – это простые элементы, представляющие собой дифракционную микроструктуру с периодическим фазовым рельефом и предназначенные для формирования одномерного или двумерного набора плоских пучков с заданным соотношением энергии между пучками. Многопорядковые дифракционные решетки широко применяются в настоящее время в оптических устройствах мультипликации изображений, в соединителях для оптических волокон и свободного пространства, в устройствах оптической связи и обработки информации, в когерентных оптических процессорах. Базовая технология изготовления дифракционных решеток - механическая с помощью острого резца. После дифракционной решетки была изобретена зонная пластинка, которую начали широко использоваться только в конце 20 века, как раз по причине отсутствия надежных технологий изготовления. Эти элементы имеют бинарное амплитудное или фазовое пропускание и используются в оптических средствах связи и обработки информации.

Применение компьютеров (1970 год), а также лазерной техники и технологий микроэлектроники (1980 год) позволило сделать качественный скачок в расчете и изготовлении ДОЭ. Задача создания ДОЭ со сложным микрорельефом стала практически реализуемой.

Возможность компьютеризированного синтеза бинарных амплитудно-фазовых и фазовых пространственных фильтров, корректоров волновых фронтов привела к созданию многоуровневых ДОЭ с уникальными характеристиками, не достижимыми в рамках традиционной оптики [1, 2]. В 1981 году в нашей стране были впервые предложены и исследованы фокусаторы лазерного излучения [3]. В работах И.Н. Сисакяна, В.А. Сойфера с соавторами и ряде других работ отечественных исследователей в первой половине 80-х годов получены основные решения задачи фокусировки для различных фокальных областей по

созданию разнообразных фокусирующих ДОЭ [4-7]. Появились работы по численному исследованию влияния технологических погрешностей формирования микрорельефа на работу фокусирующих ДОЭ [8].

Рассмотренные выше работы показывают широкую проработку теоретических вопросов построения ДОЭ. Однако технология изготовления ДОЭ не успевала за развитием теоретических методов. Методы формирования микрорельефа, такие как, фотолитография и электронная литография во множестве их модификаций появились в ходе развития микроэлектроники. Прямой перенос этих методов для изготовления ДОЭ оказался не вполне эффективен. Так, в микроэлектронике принципиально получение бинарной микроструктуры на подложке и наличие точечных ошибок микроструктуре абсолютно недопустимо и приводит к неработоспособности изделия. При этом, толщина полученной структуры не очень важна, тем более нет необходимости делать разную толщину структуры по площади. Изготовление же микрорельефов ДОЭ, наоборот, допускает наличие довольно большого количества точечных ошибок в структуре, а вот толщина рельефа должна контролироваться довольно точно ($\lambda/8$). Несомненным плюсом технологии является возможность изменять глубину микрорельефа по площади, формируя многоуровневые ДОЭ.

2. Методы формирования многоуровневого микрорельефа

Изготовление ДОЭ из традиционных материалов и традиционными методами не позволяет полностью реализовать потенциал дифракционной оптики. Невозможно получать непрерывные или почти непрерывные рельефы, необходимые для построения оптических элементов, без чрезмерных затрат. Именно в модификации технологий микроэлектроники для изготовления ДОЭ [9-18] и проявился талант профессора Алексея Васильевича Волкова (3.08.1939 – 13.01.2015).

Ключевой проблемой при создании фокусаторов [9] является одновременное достижение высокой энергетической эффективности и требуемого распределения интенсивности в фокальной области. Следует отметить, что практически все работы по теоретической оценке эффективности оптических элементов сделаны в предположении идеальной или почти идеальной точности изготовления микрорельефа. В реальном случае имеют место технологические погрешности, обусловленные недостатками методов формирования микроструктур: ошибки в размерах зон и высоте микрорельефа, смещение границ зон и т.д.

В ходе исследования группа Волкова А.В. предложила несколько методов формирования рельефа с непрерывным профилем различной высоты и разрешения. Например, в [10] для формирования микрорельефа использовалась жидкая фотополимеризующая композиция (ЖФПК), экспонируемая через полутоную фотомаску ДОЭ (рис. 1).

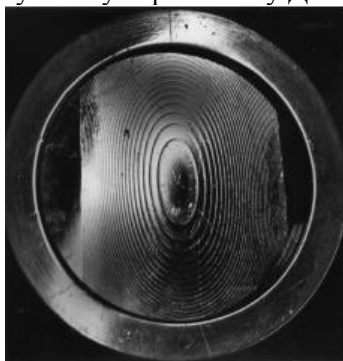


Рисунок 1. Фокусатор в отрезок на основе ЖФПК.

В [11, 17, 18] предложен и исследован метод послойного наращивания фоторезиста, позволяющий формировать многоуровневый микрорельеф. В [19, 20] рассматривается технология изготовления ДОЭ с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников. На рис.2 представлен участок микрорельефа, сформированного по этой технологии.

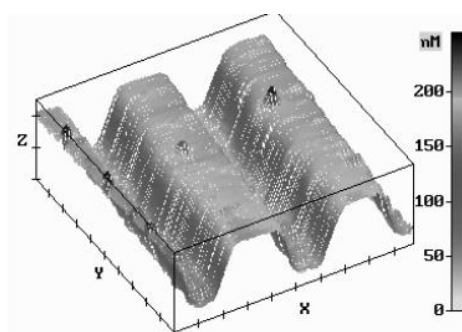


Рисунок 2. Участок микрорельефа на халькогенидном стеклообразном полупроводнике, измеренный на сканирующем зондовом микроскопе.

В [21] предложено формирование микрорельефа ДОЭ с использованием полиамидных пленок. Еще одна задача в технологии формирования многоуровневого микрорельефа, которая рассматривалась профессором Волковым А.В. – перенос микрорельефа с полимерной маски в материал подложки (кремний, кварц, стекло) [10, 11, 18, 21-23]. Процесс переноса многоуровневого микрорельефа с полимерной композиции на твердую подложку существенно сложнее получения бинарной структуры. Главная проблема в том, что скорость травления в плазме для полимерной композиции и материала подложки разная, и в результате меняется общая толщина микрорельефа [23]. Выходом из этой ситуации было использование защитных слоев на основе металлов. В этом случае для получения многоуровневого микрорельефа необходимо проводить несколько последовательных операций травления [11].

3. Изготовление ДОЭ с субмикронным разрешением

Разные подходы к наличию ошибок в микроэлектронике и оптике вызвали необходимость адаптации методов контроля и методов очистки поверхности под задачи формирования микрорельефов ДОЭ. Значительное количество работ профессора Волкова А.В. посвящено решению частных проблем технологии: подготовке подложек, контролю загрязнений и шероховатости, быстрым методам контроля формы микрорельефа [18, 23, 25-32].

Еще одно направление совершенствования технологий микроэлектроники, отраженное в работах профессора Волкова А.В. – это повышение разрешения микрорельефа изготавливаемых ДОЭ [13, 33] с использованием технологий электронной литографии. Одна из существенных проблем заключается в том, что микрорельеф ДОЭ должен иметь определенную толщину, которая для ряда задач может быть сопоставима с периодом ДОЭ. Задача получения такого микрорельефа была успешно решена (рис.3) [33].

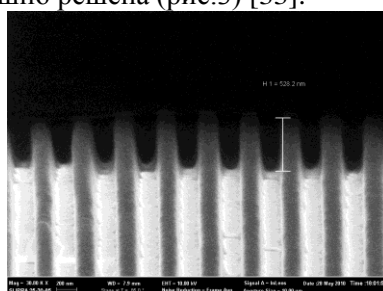


Рисунок 3. РЭМ-изображение дифракционной решетки периодом 400 нм в резисте высотой 500 нм.

Проблемы создания ДОЭ для работы за пределами видимого диапазона привели к необходимости модификации методов микроэлектроники для новых материалов: сапфировых подложек, алмазных пленок, халькогенидных стекол [27, 34-45].

Последние работы профессора Волкова А.В. были посвящены повышению разрешения фотолитографического процесса за счет использования записи фотошаблона по тонким пленкам тугоплавких металлов [46-49]. Это позволило получить разрешение почти в 200 нм.

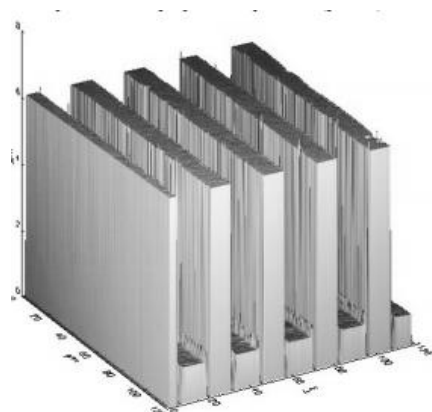


Рисунок 4. Изображение микрорельефа на торце халькогенидного волокна, полученное на сканирующем зондовом микроскопе.

4. Заключение

Всесторонняя адаптация методов микроэлектроники под потребности изготовления ДОЭ дала свои результаты. Разработанные профессором Волковым А.В. методы позволили разработать и изготовить оптические устройства с ДОЭ [50], фокусаторы в различные поперечные и продольные области [9, 51-58], ДОЭ для формирования мод [14], светотехнические [59-61] и поляризационные устройства [62-64]. Созданные под руководством А.В. Волкова технологические маршруты и линии продолжают работать, что позволило создать компактные и легкие системы технического зрения и гиперспектрометры [65-68] для беспилотных летательных аппаратов и наноспутников.

5. Литература

- [1] Голуб, М.А. Машинный синтез фокусирующих элементов для CO_2 лазера / М.А. Голуб, В.П. Дегтярев, А.Н. Климов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, Е.В. Сисакян, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, № 8. – С. 449-451.
- [2] Гончарский, А.В. Фокусаторы лазерного излучения, падающего под углом / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 1. – С.166-168.
- [3] Голуб, М.А. Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7, № 10. – С. 618-623.
- [4] Гончарский, А.В. Плоские фокусирующие элементы видимого диапазона / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Квантовая электроника. – 1986. – Т. 13, № 3. – С. 660-662.
- [5] Данилов, В.А. Влияние исследования искажений освещающего пучка на работу фокусаторов / В.А. Данилов, М.В. Дубов // Компьютерная оптика. – 1987. – Вып.1. – С. 52-67.
- [6] Данилов, В.А. Синтез оптических элементов, создающих фокальную линию произвольной формы / В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, Д.М. Сагателян, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, № 13. – С.810-815.
- [7] Данилов, В.А. Оптические элементы, фокусирующие когерентное излучение в произвольную фокальную линию / В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, Д.М. Сагателян, Е.В. Сисакян, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Препринт № 69. – М.: ФИАН СССР, 1983. – 41 с.
- [8] Голуб, М.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Автометрия. – 1988. – № 1. – С. 70-82.

- [9] Golub, M.A. The technology of fabrication of focusators of IR laser's radiation / M.A. Golub, O.E. Rybakov, G.V. Usplenjev, A.V. Volkov, S.G. Volotovskiy // Optics & Laser Technology. – 1995. – Vol. 27(4). – P. 215-218.
- [10] Волков, А.В. Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Соيفер, В.С. Соловьев // Компьютерная оптика. – 1997. – Т. 17. – С. 91-93.
- [11] Volkov, A.V. A Method for the Diffractive Microrelief Forming Using the Layered Photoresist Growth / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.Ju. Moiseev, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29(4-5). – P. 281-288.
- [12] Волков, А.В. Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – Т. 18. – С. 127-130.
- [13] Волков, А.В. Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – Т. 18. – С. 130-133.
- [14] Бородин, С.А. Численное и экспериментальное исследование бездисперсионных многомодовых пучков, формируемых с помощью ДОО / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.С. Павельев, С.В. Карпеев, А.Н. Палагушкин, С.А. Прокопенко, А.П. Сергеев, А.Н. Арламенков // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 27. – С. 41-44.
- [15] Карпеев, С.В. Поляризационный конвертор для формирования лазерных пучков высокого порядка с использованием бинарного дифракционного оптического элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев, С.В. Алферов, А.В. Волков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2012. – Т. 29, № 4. – С. 162-170.
- [16] Volkov, A.V. Automation of the Physical Experiment in Computer Optics / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, G.V. Usplen'ev // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2001. – Vol. 11(2). – P. 469-470.
- [17] Волков, А.В. Экспериментальное исследование массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях / А.В. Волков, С.Г. Волотовский, В.М. Гранчак, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Соифер, В.С. Соловьев, Д.М. Якуненкова // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65, № 9. – С. 181-185.
- [18] Волков, А.В. Подготовка поверхности подложек для изготовления ДОО методом послойного наращивания фоторезиста / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2001. – Т. 21. – С. 113-116.
- [19] Волков, А.В. Формирование микрорельефа ДОО с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.Ф. Костюк, С.А. Костюкевич, П.Е. Шепелявый // Компьютерная оптика. – 1999. – Т. 19. – С. 129-131.
- [20] Волков, А.В. Формирование микрорельефа с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 24. – С. 74-77.
- [21] Берендяев, В.И. Формирование микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием полиимидных пленок / В.И. Берендяев, А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Б.В. Котов, В.С. Соловьев // Компьютерная оптика. – 2000. – Т. 20. – С. 90-92.
- [22] Волков, А.В. Методы формирования микрорельефа для синтеза дифракционных оптических элементов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 1999. – Т. 7. – С. 127-140.
- [23] Волков, А.В. Исследование процессов нанесения и травления фоторезиста с целью повышения точности формирования микрорельефа широкоапертурных ДОО / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 1999. – Т. 19. – С. 143-146.
- [24] Волков, А.В. Расчет скорости плазмохимического травления кварца / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков // Компьютерная оптика. – 2001. – Т. 21. – С. 121-125.

- [25] Волков, А.В. Контроль параметров микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием тестовых дифракционных структур // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2001. – Т. 12. – С. 179-185.
- [26] Волков, А.В. Контроль изменения показателя преломления в жидких фотополимеризующихся композициях / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.С. Соловьев // Компьютерная оптика. – 2001. – Т. 21. – С. 117-120.
- [27] Волков, А.В. Способ изготовления дифракционных оптических элементов на алмазных и алмазоподобных пленках / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер // Патент на изобретение РФ № 2197006 от 27.03.2001. БИ № 2 от 20.01.2003.
- [28] Бородин, С.А. Автоматизированное устройство для оценки степени чистоты подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28. – С. 69-75.
- [29] Казанский, Н.Л. Способ контроля шероховатости поверхности диэлектрических подложек / Н.Л. Казанский, А.В. Волков, С.А. Бородин // Патент на изобретение РФ № 2331870 от 17.07.2006. БИ № 23 от 20.08.2008.
- [30] Агафонов, А.Н. Разработка физических принципов и алгоритмов компьютерного моделирования базовых процессов формирования микроструктур методами вероятностного клеточного автомата / А.Н. Агафонов, А.В. Волков, С.Б. Коньгин, А.Г. Саноян // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2007. – Т. 14, № 1. – С. 99-107.
- [31] Бородин, С.А. Устройство для анализа нанощероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 42-47.
- [32] Полетаев, С.Д. Способ получения декоративных покрытий / С.Д. Полетаев, В.А. Китаева, А.В. Волков, Н.Л. Казанский // Патент на изобретение РФ № 2484181 от 30.12.2011. БИ № 16 от 10.06.2013.
- [33] Нестеренко, Д.В. Создание криволинейных дифракционных решеток для ультрафиолетового диапазона / Д.В. Нестеренко, С.Д. Полетаев, О.Ю. Моисеев, Д.М. Якуненкова, А.В. Волков, Р.В. Скиданов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1-4. – С. 66-71.
- [34] Волков, А.В. Способ изготовления дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Патент на изобретение РФ № 2231812 от 21.05.2002. БИ № 18 от 27.06.2004.
- [35] Volkov, A.V. Dry Etching of Polycrystalline Diamond Films / A.V. Volkov, N.L. Kazansky, G.F. Kostyuk, V.S. Pavelyev // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2002. – Vol. 11(2). – P. 135-137.
- [36] Волков, А.В. Разработка и исследование метода формирования микрорельефа ДОО в сапфировых подложках / А.В. Волков, О.Г. Истинова, Н.Л. Казанский, Г.Ф. Костюк // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 24. – С. 70-73.
- [37] Бородин, С.А. Формирование и исследование дифракционного микрорельефа на торце галогенидного ИК волновода / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Карпеев, О.Ю. Моисеев, В.С. Павельев, Д.М. Якуненкова, Ю.А. Рунков, Д.Л. Головашкин // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 27. – С. 45-49.
- [38] Волков, А.В. Исследование погрешностей формирования дифракционной решетки на торце галогенидного ИК-волновода / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, В.А. Ерополов, Н.Л. Казанский, С.В. Карпеев, О.Ю. Моисеев, В.С. Павельев, В.Г. Артюшенко, В.В. Кашин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2006. – Т. 8, № 4. – С. 1211-1217.
- [39] Pavelyev, V.S. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // Optics & Laser Technology. – 2007. – Vol. 39(6). – P. 1234-1238.

- [40] Соловьев, В.С. Рельефообразующие надмолекулярные структуры на силиконовых полимерах / В.С. Соловьев, А.В. Волков, Б.О. Володкин, Н.Л. Казанский, О.В. Сторожилова // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 59-61.
- [41] Solovjev, V.S. Relaxation of supramolecular structures in polydimethylsiloxane films / V.S. Solovjev, B.O. Volovkin, A.V. Volkov, N.L. Kazansky // *Mendelevov Communications*. – 2009. – Vol. 19(6). – P. 342-343.
- [42] Pavelyev, V.S. Diffractive Microoptics for Technological IR-Lasers / V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, V.I. Konov, V.V. Kononenko, A.V. Volkov // *High-Power and Femtosecond Lasers: Properties, Materials and Applications*. – 2009. – P. 125-158.
- [43] Криштал, М.М. Зарождение и рост макрофлуктуаций пластической деформации при прерывистой текучести и деформации людерса: результаты высокоскоростной видеосъёмки / М.М. Криштал, А.К. Хрусталеv, А.В. Волков, С.А. Бородин // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 426, № 1. – С. 36-40.
- [44] Pavelyev, V.S. Diffractive Microoptics for Technological IR-Lasers / V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, V.I. Konov, V.V. Kononenko, A.V. Volkov // *Encyclopedia of Laser Research*. – New York, 2011.
- [45] Соловьёв, В.С. Экспериментальная проверка диффузионного механизма массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях с помощью ИК-Фурье спектроскопии / В.С. Соловьёв, Н.Л. Казанский, А.В. Волков, Б.О. Володкин, А.Е. Старожилов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 235-241.
- [46] Волков, А.В. Высокора разрешающая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А.В. Волков, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 220-225.
- [47] Волков, А.В. Применение тонких плёнок молибдена для контактных масок при изготовлении микрорельефов элементов дифракционной оптики / А.В. Волков, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев, И.В. Чистяков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 757-762.
- [48] Волков, А.В. Термоокислительная деструкция пленок молибдена при лазерной абляции / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 2. – С. 107-111.
- [49] Волков, А.В. Особенности процесса воздействия лазерного излучения на тонкие пленки молибдена / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.Д. Паранин, С.Д. Полетаев, И.В. Чистяков // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 4. – С. 101-105.
- [50] Волков, А.В. Устройство для наблюдения в видимой и инфракрасной областях спектра / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер // Патент на изобретение РФ № 2148849 от 18.07.1997. БИ № 13 от 10.05.2000.
- [51] Волков, А.В. Изготовление и экспериментальное исследование фокусаторов в кольцо и в две точки / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенцев // Компьютерная оптика. – 1999. – Т. 19. – С. 132-136.
- [52] Волков, А.В. Численное исследование дифракции света на дифракционных линзах / А.В. Волков, Р.В. Скиданов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2000. – Т. 9. – С. 174-183.
- [53] Волков, А.В. Создание и исследование бинарных фокусаторов для мощного ND-YAG лазера / А.В. Волков, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенцев, А. Занелли // Компьютерная оптика. – 2000. – Т. 20. – С. 84-89.
- [54] Kazanskiy, N.L. Fabricating and testing diffractive optical elements focusing into a ring and into a twin-spot / N.L. Kazanskiy, G.V. Uspleniev, A.V. Volkov // *Proceedings of SPIE*. – 2000. – Vol. 4316. – P. 193-199.
- [55] Волков, А.В. Бинарный дифракционный оптический элемент для фокусировки гауссового пучка в продольный отрезок / А.В. Волков, В.В. Котляр, О.Ю. Моисеев, О.Е. Рыбаков, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина // Оптика и спектроскопия. – 2000. – Т. 89, № 2. – С. 347-352.

- [56] Волков, А.В. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина // под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
- [57] Soifer, V.A. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.S. Solovyev, G.V. Uspleniev, A.V. Volkov // John Wiley & Sons, Inc. USA, 2002. – 765 p.
- [58] Soifer, V.A. Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.S. Solovyev, G.V. Uspleniev, A.V. Volkov // Tianjin Science & Technology Press, 2007. – 570 p. (in Chinese).
- [59] Волков, А.В. Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОО / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенев // Компьютерная оптика. – 1999. – Т. 19. – С. 137-142.
- [60] Kazanskiy, N.L. Investigation of Lighting Devices Based on Diffractive Optical Elements / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer, A.V. Volkov // Optical Memory & Neural Networks. – 2000. – Vol. 9(4). – P. 301-312.
- [61] Волков, А.В. Устройство направленного излучения / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Патент на изобретение РФ № 2213985 от 05.04.2002. БИ № 28 от 10.10.2003.
- [62] Соловьев, В.С. Способ создания поляризующей ячейки / В.С. Соловьев, А.В. Волков, В.А. Сойфер, Н.Л. Казанский // Патент на изобретение РФ № 2259577 от 16.03.2004. БИ № 24 от 27.08.2005.
- [63] Волков, А.В. Ориентация жидких кристаллов с помощью поверхностных направленных структур / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.С. Соловьев // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 27. – С. 38-40.
- [64] Kazanskiy, N.L. Orientating Liquid Crystals Using Surface-Directed Structures / N.L. Kazanskiy, V.S. Solovyov, A.V. Volkov // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2005. – Vol. 14(2). – P. 123-128.
- [65] Kazanskiy, N.L. Modeling diffractive optics elements and devices // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – P. 107740O. DOI: 10.1117/12.2319264.
- [66] Nikonorov, A.V. Toward Ultralightweight Remote Sensing with Harmonic Lenses and Convolutional Neural Networks / A.V. Nikonorov, M.V. Petrov, S.A. Bibikov, P.Y. Yakimov, V.V. Kutikova, Y.V. Yuzifovich, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, N.L. Kazanskiy // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 11(9). – P. 3338-3348. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2856538.
- [67] Blank, V.A. Hyperspectrometer based on a harmonic lens with diffraction grating / V.A. Blank, R.V. Skidanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096(1). – P. 012003.
- [68] Подлипов, В.В. Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям / В.В. Подлипов, В.Н. Щедрин, А.Н. Бабичев, С.М. Васильев, В.А. Бланк // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 877-884. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-877-884.

Microtechnologies in computer optics

V.A. Danilov¹

¹Russian Academy of Sciences, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation, Butlerova str. 15, Moscow, Russia, 117342

Abstract. It briefly describes the development of microtechnologies in the field of computer optics in the context of the scientific path of the main researcher of the Institute of Image Processing Systems of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor Alexey Vasilievich Volkov - a well-known specialist in the field of micro- and nanotechnologies.