

Р. А. Ложков^{1✉}, И. В. Парко¹

Сверхлегкая оптика для наноспутника

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: Roman.Lozhkov2005@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются оптические технологии изготовления перспективных сверхлегких деталей для наноспутников. Обычные стеклянные линзы, обладая высокой оптической эффективностью, существенно ограничивают полезную нагрузку малых космических аппаратов из-за своего веса и размеров. В качестве решения было предложено использование инновационных оптических элементов на основе метаповерхностей, дифракционных линз и полимерных материалов, что позволило бы уменьшить массу оптической системы в 10–100 раз при сохранении приемлемого качества изображения. Особое внимание уделяется технологиям изготовления сверхлегких деталей, включая наноструктурирование, 3D-литографию и лазерную абляцию. Приведены конкретные примеры внедрения разработок, такие как металлическая пластина диаметром 50 мм, весом менее 5 граммов и стоимостью до 10 раз меньше обычных аналогов. Анализируются преимущества и существующие ограничения сверхлегких деталей, включая вопросы оптической эффективности и радиационной стойкости в условиях космоса. В статье также освещаются перспективы использования сверхлегкой оптики, в том числе в наноспутниковых миссиях для дистанционного зондирования Земли и научных исследований.

Ключевые слова: Наноспутник, сверхлегкая оптика, линза

R. A. Lozhkov^{1✉}, I. V. Parko¹

Ultralight optics for nanosatellite

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Roman.Lozhkov2005@yandex.ru

Abstract. The article discusses optical technologies for manufacturing advanced ultra-light parts for nanosatellites. While conventional glass lenses offer high optical efficiency, they significantly limit the payload capacity of small spacecraft due to their weight and size. As a solution, innovative optical elements based on metasurfaces, diffraction lenses, and polymer materials have been proposed, which could reduce the mass of the optical system by 10 to 100 times while maintaining acceptable image quality. Special attention is paid to the technologies of manufacturing ultra-light parts, including nanostructuring, 3D lithography, and laser ablation. Specific examples of the implementation of developments are given, such as a metal plate with a diameter of 50 mm, weighing less than 5 grams, and costing up to 10 times less than conventional analogues. The advantages and existing limitations of ultra-light parts are analyzed, including issues of optical efficiency and radiation resistance.

Keywords: Nanosatellite, ultralight optics, lens

Введение

Современная космическая отрасль переживает революцию, связанную с миниатюризацией спутниковой техники. Наноспутники CubeSat массой 1–10 кг открывают новые возможности для мониторинга Земли, научных исследований и коммерческого использования космоса. Однако их эффективность по-прежнему

ограничивается массогабаритными характеристиками полезной нагрузки, особенно в части оптической системы. Традиционная оптика на основе стеклянных линз, обеспечивающая высокое качество изображения, занимает значительную долю массы устройства и требует сложных механических конструкций [1].

Обсуждение

В последние годы прорывные решения в области метаматериалов и нанофотоники позволили создать совершенно новые типы оптических компонентов. Сверхлегкие линзы на основе метаповерхностей, дифракционных структур и полимерных композитов демонстрируют беспрецедентное сочетание малого веса (менее 1 грамма на элемент), компактности (толщина до 0,1 мм) и приемлемой оптической эффективности (рис. 1). Особый интерес представляют разработки Самарского университета в этой области, направленные на создание специализированной оптики для российских наноспутниковых миссий [2].

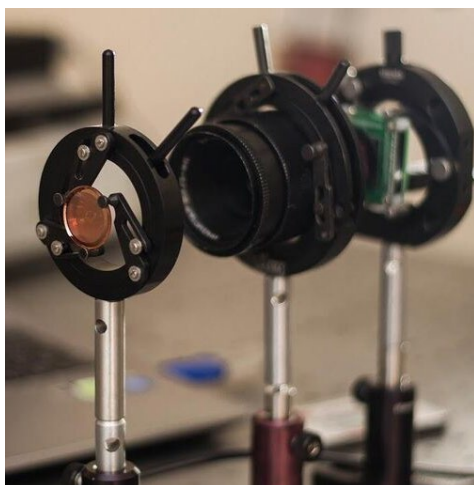


Рис. 1. Российская сверхлегкая «умная оптика»

Идея создания сверхлегкой оптики для наноспутников возникла на стыке двух ключевых тенденций: во-первых, быстрое развитие наноспутниковой технологии. В 2010 году стремительный рост коммерческого и научного интереса к малым космическим аппаратам, особенно в формате CubeSat, выявил серьезное ограничение – традиционная оптика занимает 30–50 % массы полезной нагрузки. Это существенно ограничивает возможности этих устройств в области дистанционного зондирования и астрономии. Во-вторых, прорывы в нанофотонике и метаматериалах. В это же время в научном сообществе (в частности, в работах групп Капассо (Гарвард) и Валентайна (Университет Юты) были продемонстрированы первые рабочие образцы плоских металлических линз, способных заменить трехмерные стеклянные элементы [3].

Определенный российский импульс возник в 2018–2019 годах, когда в Самарском университете стартовала программа «Космическое материаловедение». РКЦ (Ракетно-космический центр) «Прогресс» устанавливает оптические тре-

бования к перспективным наноспутникам. Появились первые публикации по радиационной стойкости полимерных метаповерхностей.

Наноспутники – компактные космические аппараты массой от 1 до 10 кг, в том числе популярного формата CubeSat, которые открывают новые возможности для исследования космоса и практического применения на орбите благодаря своей доступности и универсальности. Их основными преимуществами являются низкая стоимость (обычные спутники от 50 до 500 тысяч долларов по сравнению с десятками миллионов долларов) и короткие сроки разработки (1–3 года), что делает их идеальными для образовательных проектов, технологических экспериментов и коммерческих миссий.

В науке наноспутники используются для изучения космической погоды, наблюдения за астероидами и проведения экспериментов в условиях микрогравитации. Например, проект SPARCS использует крошечные телескопы для наблюдения за звездами в ультрафиолетовом диапазоне. В области дистанционного зондирования Земли они помогают отслеживать изменение климата, состояние сельскохозяйственных угодий и даже участвуют в картографировании, предоставляя данные для навигации и городского планирования.

Телекоммуникационные возможности наноспутников включают обеспечение связи в отдаленных районах и создание сетей Интернета вещей (IoT), таких как проект Swarm Technologies. Они стали важным инструментом образования – университеты, в том числе Самарский университет, используют CubeSats для обучения студентов и разработки новых технологий. Коммерческие компании запускают их в рекламных целях, например, для трансляции видов суши, или для сбора данных в коммерческих целях, от логистики до мониторинга рыболовства.

Военные и разведывательные службы также проявили интерес к наноспутникам, хотя их разведывательные возможности ограничены из-за их малых размеров. Их можно использовать для раннего оповещения о запусках ракет или для мониторинга зон стихийных бедствий (рис.2).

Однако у наноспутников есть и недостатки: маломощные компоненты (например, камеры с низким разрешением), короткий срок службы (1–5 лет), восприимчивость к радиации и космическому мусору. Тем не менее, их масса, масштаб и гибкость позволяют разворачивать целые группы, как в проекте Planet Labs, где более 150 устройств ежедневно отслеживают состояние Земли. Успешные примеры, такие как миссия MarCO (CubeSat НАСА, сопровождавший InSight на пути к Марсу) или российский Stork-2D, продемонстрировали, что даже микроаппараты способны решать серьезные задачи.

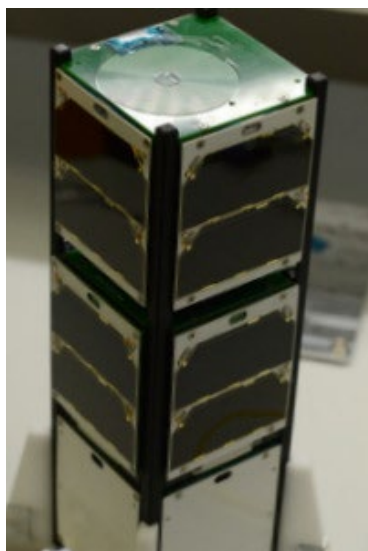


Рис. 2. Первый российский наноспутник формата CUBESAT3U

Будущее наноспутников связано с дальнейшей миниатюризацией технологий, например, внедрением сверхлегкой оптики, усовершенствованных двигателей и искусственного интеллекта для автономной работы. Их роль будет расти в проектах, где важны скорость разворачивания, децентрализация и экономическая эффективность, от научных исследований до коммерческого освоения космоса [4].

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики разных оптических деталей.

Таблица 1

Параметры	Масса, г	Толщина, мм	Стоимость
Стеклоптическая оптика	100–500	10–50	Высокая 500–3000 долларов
Сверхлегкая оптика	1–10	0,1–1	Низкая 100–800 долларов

При сравнении традиционной стеклянной оптики и современных сверхлегких наноспутниковых решений выявляются принципиальные различия, определяющие выбор технологий для конкретных космических миссий. Стеклянная оптика на протяжении десятилетий является отраслевым стандартом, обеспечивая исключительное качество изображения в видимом диапазоне спектра с эффективностью до 90–95 % и сохраняя при этом стабильную работу в широком диапазоне температур от -100 до +100 °C. Однако эти системы имеют значительные массогабаритные показатели – одна линза весит до 500 граммов и имеет толщину до 50 мм, что для наноспутника CubeSat означает существенную потерю полезной нагрузки. Процесс изготовления стеклянной оптики требует сложной механической обработки, занимает несколько месяцев, а стоимость готового изделия колеблется от 500 до 3000 долларов за линзу.

Современные сверхлегкие оптические решения, разрабатываемые для наноспутников, базируются на принципиально иных подходах – метаповерхностях, дифракционных структурах и полимерных композитах. Данные технологии позволяют уменьшить массу оптических компонентов до 1–10 граммов и толщину всего 0,1–1 мм, что в 10–100 раз легче традиционных аналогов. Процесс производства такой системы основан на методах нанолитографии и 3D-печати, что гарантирует изготовление оптических компонентов за несколько дней или недель, а не месяцев, при стоимости от 100 до 800 долларов США. Однако нынешнее поколение сверхлегкой оптики демонстрирует эффективность 60–85 % и может потребовать дополнительной коррекции хроматической аберрации, хотя последние разработки достигли эффективности 90 % в узком спектральном диапазоне. Радиационная стойкость особенно важна, если стеклянные элементы изначально способны противостоять космическому излучению, то решения на основе полимеров и метаматериалов требуют специальных защитных покрытий. Это успешно реализуется в современных проектах, например, в разработках Самарского университета [5].

Заключение

Перспективы развития оптических систем для наноспутников указывают на постепенное вытеснение традиционных стеклянных деталей, сочетающих в себе достижения современных технологий, в ближайшие 5–10 лет ожидается появление металинз с полным спектральным охватом и возможностью автофокусировки. Качество изображения, при таких работах, как высокодетальная съемка земной поверхности, стеклянная оптика, пока сохраняет свои позиции. Для наноспутниковых проектов, определяющими факторами которых являются стоимость, скорость развертывания и эффективное использование полезной нагрузки, сверхлегкие оптические системы создают неоспоримые преимущества, открывая новые возможности для коммерческого и научного использования космического пространства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. К.П. Скворцов, "Перспективы наноспутниковых технологий", Космические исследования, т. 59, № 3, 2021, с. 45-52. DOI: 10.7868/S0023420621030061.
2. Отчет о НИР "Разработка сверхлегкой оптики для наноспутников", Самарский университет, 2022 (внутренний документ).
3. Capasso, F. et al. (2018). "Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging". Science, 352(6290), 1190-1194. [DOI:10.1126/science.aaf6644].
4. Образовательные наноспутники стандарта CubeSat. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/products/cubesat>.
5. Первая в мире сверхлегкая оптика для наноспутников проходит испытания в космосе. [Электронный ресурс]. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/140448/>.

© Р. А. Ложков, И. В. Парко, 2025