EDN: GWPNFD DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.21.2.008
УДК 621.537 *2.2.6*

ОБЗОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ НАНООПТИКИ

***А. С. Воробьева*[1], *К. М. Ильенкова*[2]**

[1] Специализированный учебно-научный центр (СУНЦ)
Российская Федерация, 620137, г. Екатеринбург, Данилы Зверева, 30

[2] Бизнес-школа I-KM
Российская Федерация, 620147, г. Екатеринбург, Онуфриева, 48

Аннотация: Данная статья представляет собой анализ научных публикаций в сфере нанооптики. Исследование проводилось на базе тридцати шести научных публикаций. Авторами были выделены восемь критериев, положенных в основу анализа исследуемых научных публикаций по нанооптике. Основная цель исследования - выявление базовых закономерностей и тенденций в развитии данного направления физики, выявление потенциала и ограничений в его изучении. В результате анализа авторы выявили, что преобладает резонансно-локализованная парадигма. Ряд ученых делает акцент на дискретных структурах и ближнепольных режимах. При этом выявлено отсутствие универсального подхода, что ограничивает возможности по масштабированию эффектов. В то же время непрерывные и градиентные среды, а также поляризационно-инвариантные режимы по-прежнему недостаточно изучены. В исследовании используются количественные методы анализа. Авторы проверяют выдвинутые ими гипотезы и предлагают направления дальнейших исследований в данном направлении.

Ключевые слова: Нанооптика, плазмонные структуры, метаматериалы, ближнее поле, дискретные и градиентные наноструктуры, поляризационные эффекты, резонансные режимы, количественные методы анализа, качественные методы анализа

Введение

Нанооптика – это область науки, основанная на управлении светом и его взаимодействии с веществом в масштабах, сопоставимых с длиной волны света или меньше нее (в субволновых режимах). Это порождает уникальные оптические явления, которые выходят за пределы классической оптики. Классические концепции дифракции и распространения электромагнитных волн являются основой при изучении данных эффектов. При этом на уровне нанооптики включаются ближнепольные, резонансные и локализованные механизмы, принципиально меняющие характер взаимодействия света и вещества [1, 2, 3].

Базовые принципы нанооптики, включающие в себя локализацию поля, спектральные резонансы и субволновое управление, подробно изучены в работе авторов Al-Amri M.D., El-Gomati M.M. и Zubairy S. [1]. Кроме того, Deng M. и Zhu X. в своих работах описывают эволюцию развития от ближнепольной оптики до плазмоники [2]. Работы этих авторов демонстрируют развитие и эволюцию концепций в области физики (ближнее поле, плазмонные моды и метаматериалы) от отдельных эффектов до системных технологий контроля света на наноуровне. Данные исследования внесли свой вклад в развитие современной науки управления светом в субволновых масштабах.

Результаты современных исследований в нанофотонике и нанооптике также отражены в научных обзорах, посвящённых разнообразным аспектам поля. Авторы рассматривают как теоретические аспекты, так и предлагают результаты практических исследований в наномасштабных фотографиях и сферических метаповерхностях [4,5].

В данных работах подчёркивается междисциплинарная природа исследований, а также выделяются проблемы, возникающие в процессе систематизации и объединения различных физических механизмов в единую систему теоретических знаний.

Плазмонные структуры и метаматериалы обеспечивают глубокое подавление отражения, локальное усиление поля и управление фазой света. Данные свойства (эффекты) лежат в основе современных нанооптических устройств [6, 7, 8]. В тоже время это ведет к появлению узкополосного резонанса, чувствительности к материалу, что, в свою очередь, ограничивает возможность применения полученных выводов в других направлениях.

Несмотря на значительное количество публикаций, большинство современных исследований по-прежнему концентрируется на описании конкретных эффектов. При этом универсальные волновые закономерности, связывающие нанооптику с общей теорией электромагнитных волн, остаются недостаточно изученными [1, 8]. Для устранения данного несоответствия требуется системный подход, выходящий за рамки простого описания отдельных структур и эффектов.

Важным аспектом нанооптики является ее методологическая неоднородность: исследования используют широкий спектр структур (метаповерхности, периодические массивы, наночастицы); различные пространственные режимы (глубоко субволновой, ближнее и дальнее поле) и разнообразные теоретические подходы (с использованием количественных методов, экспериментов и аналитики) [1, 4, 6, 8, 9]. В целом данное разнообразие направлений исследований отражает широкий спектр явлений и наиболее часто используемых подходов, формирующих научную логику нанооптики.

Авторами данной статьи были выдвинуты и в процессе исследования проверены следующие гипотезы:

1. В современной нанооптике преобладает модель резонансно-локализованных состояний, что ограничивает возможность развития единого универсального подхода и дальнейшего масштабирования получаемых результатов исследований;
2. Несмотря на высокий потенциал и концептуальную ценность, до сих пор остаются недооценёнными такие направления, как непрерывные и градиентные структуры, а также поляризационно-инвариантные режимы;
3. Исследования, содержащие научную новизну чаще всего основаны на качественных методах анализа. Подобный подход позволяет обобщить результаты предыдущих исследований и сформулировать классические законы.

Настоящая статья основана на результатах анализа тридцати шести научных публикаций. Авторами выделены и обоснованы восемь критериев оценки научных публикаций. В статье описаны базовые принципы и методология анализа, результаты проведенного анализа, выводы в отношении выявленных взаимосвязей и закономерностей, ограничения исследования, а также рекомендации и направления дальнейших исследований в данной области науки.

Следующий раздел статьи посвящён изучению основ нанооптики, которые легли в основу всего исследования.

1. Основы нанооптики

Современная нанооптика формируется на стыке классической волновой физики и квантовых эффектов. Она описывает управление светом в субволновых масштабах. Основой исследований в области распространения и взаимодействия электромагнитного поля с материей и веществом по-прежнему остаются уравнения Максвелла, которые определяют волновые режимы, пограничные условия и закон сохранения энергии

в неоднородных средах [1, 3]. При переходе к наномасштабам существенно возрастает роль локальных эффектов, выходящих за пределы геометрической оптики.

Основным механизмом нанооптики является появление локальных резонансов (плазмонных и фотонных) в наноструктурах. Они формируют собственные электромагнитные моды и обеспечивают пространственную локализацию поля [6, 7, 8]. Данные резонансы определяют спектральные, пространственные и поляризационные свойства систем, и тесно связаны с геометрией структуры. Дискретные архитектуры (метаповерхности, периодические массивы, наночастицы) приводят к формированию узкополосного резонансного отклика. В тоже время, в отличие от дискретных структур, градиентные и непрерывные среды позволяют реализовывать широкополосные режимы [3, 4].

Базовую роль в формировании оптического отклика системы играет дисперсия. Она обусловлена как свойствами материала, так и геометрией структуры. Дисперсионные соотношения электромагнитных волн описывают фазовые свойства волн, условия возникновения аномальной дисперсии, безотражательные режимы, а также поляризационные эффекты [1, 5]. В условиях субволновых и ближнепольных режимов дисперсия становится наиболее важным фактором, который определяет локализацию энергии и чувствительность отклика к вариациям параметров системы.

Методологическая основа нанооптики базируется на количественных и качественных методах исследований. Количественные методы анализа применяются при исследованиях сложных дискретных структур. Качественные методы позволяют выявлять универсальные закономерности и формулировать условия существования эффектов, включая возможные обобщения классических оптических законов на уровне наномасштабов [1, 4].

Таким образом, в основе нанооптики лежат три взаимосвязанных элемента:

1. Уравнения Максвелла, описывающие электромагнитные процессы;
2. Локальные резонансы и собственные моды наноструктур;
3. Дисперсионные и поляризационные характеристики материалов и их геометрии.

Данные элементы легли в основу методологии проведения сравнительного анализа, описанного авторами в рамках данной статьи.

2. Методология исследования

В настоящее время современная нанооптика активно развивается в различных направлениях, каждое из которого характеризуется специфической комбинацией структурной организации, пространственных режимов и преобладающих физических эффектов. Данные направления базируются на описанных выше элементах нанооптики и лежат в основе публикаций, использованных авторами данной статьи при проведении обзорного анализа.

Выбор научных публикаций и критериев оценки основан на принципах системного анализа данных и базовых элементах нанооптики. Для проведения сравнительного анализа авторами было отобрано 36 репрезентативных статей [1, 2, 6–39] по основным направлениям исследований в области нанооптики: плазмонные структуры, метаматериалы, ближнепольные системы, фотонные кристаллы и градиентные среды. С целью проведения сравнительного анализа и систематизации данных были выделены восемь критериев оценки, включающих в себя структурные, функциональные, теоретические и концептуальные аспекты, позволяющие провести всесторонний анализ отобранных научных работ:

1. Направления нанооптики и основные механизмы, лежащие в их основе. Они отражают взаимосвязь между структурной организацией, пространственным режимом и ключевыми эффектами нанооптики.

2. Тип наноструктуры. Различия между метаповерхностями, слоистыми, периодическими и градиентными структурами определяют спектральные и пространственные характеристики электромагнитных мод, их резонансные свойства, а также возможность их описания с использованием качественных методов анализа.

3. Масштаб проявления электромагнитных эффектов в наноструктурах (глубокая субволновая фокусировка света, дальнепольный режим). Позволяет сопоставлять локальные и глобальные проявления физических эффектов.

4. Основной дисперсионный механизм (материальный, геометрический, комбинированный). Определяет условия возникновения резонансных и аномальных электромагнитных эффектов.

5. Тип физического эффекта (резонансные явления, локализация электромагнитного поля, безотражательное прохождение и аномальная дисперсия). Позволяет выявить количественные и качественные характеристики соответствующих эффектов.

6. Поляризационный режим (p- или s-поляризация, обе поляризации, режимы поляризационной селективности или инвариантности). Отражает симметрии поля и ограниченные возможности применения эффектов в универсальном режиме.

7. Теоретический подход (численные методы, аналитика, точные решения, уравнения Максвелла). Важен при оценке соблюдения принципов, норм и правил, исключающий отклонения, ошибки и неточности, а также возможности обобщения полученных результатов.

8. Тип новизны (оптимизация в инженерных направлениях, новые интерпретации имеющихся данных, выявление новых и дополнительных эффектов, обобщение классических законов). Позволяет разделять результаты на инкрементальные, теоретические и экспериментальные научные исследования.

Данный подход позволяет не просто классифицировать научные работы, но и выявить имеющиеся закономерности, ограничения и потенциал научных исследований для дальнейшего развития науки в области нанооптики.

Таким образом, предложенная методология исследования позволяет перейти от теории к практическому анализу научных публикаций, представленному в разделе 3.

3. Анализ современных научных исследований в области нанооптики

Данный раздел посвящен анализу 36 научных публикаций [1, 2, 6–39], содержащих в себе исследования по основным направлениям в области нанооптики. Сравнение проводится по восьми критериям оценки, подробно описанным в разделе 2.

Важно отметить, что количественные показатели в рамках данного исследования используются как инструменты идентификации основных концептуальных направлений в рамках исследуемых работ, и формируют современное состояние нанооптики как области научных исследований.

Анализ статей по основным направлениям демонстрирует факт неравномерного распределения работ по различным направлениям нанооптики (табл. 1).

Таблица 1. Направления нанооптики и основные механизмы

Направление	Кол-во статей, шт	Доля статей, %	Основной механизм
Плазмонная нанооптика	14	35	Локальные резонансы
Метаматериалы	9	23	Резонансные моды
Ближнепольная оптика	6	15	Ближнепольная локализация
Фотонные кристаллы	4	10	Полосовые зазоры
Градиентная нанооптика	3	8	Нерезонансное управление
Квантовая / нелинейная	4	10	Специфические режимы
Итого	**40**	**100**	

Результаты анализа демонстрируют, что почти 70% исследуемых научных работ посвящены изучению направления плазмонной нанооптики, метаматериалов и ближнепольной оптики. Общей особенностью этих направлений нанофизики является резонансно-локализованный характер физических процессов, обеспечивающий управление оптическим откликом посредством возбуждения дискретных мод наноструктуры. В данном случае резонанс выступает не просто в качестве инструмента усиления поля, а является базовой основой методологии исследований, определяя их задачи и интерпретацию полученных результатов. Применение данного подхода ведет к тому, что получаемые результаты сложно обобщать и масштабировать за пределами конкретного направления исследования.

Таким образом, количественное преобладание резонансных направлений демонстрирует наличие качественных ограничений в развитии всей области нанооптики.

Современная нанооптика в большей степени ориентирована на совершенствование конкретных резонансных конфигураций и оптимизацию их характеристик. В то же время количество исследований, направленных на разработку универсальных, нерезонансных и устойчивых к вариациям условий управления волновыми процессами, остается ограниченным и недостаточным для дальнейшего активного развития нанооптики. Соответственно, в рамках исследуемых научных работ инженерно-прикладная логика преобладает над фундаментально-теоретическим подходом.

Преобладание резонансных механизмов свидетельствует о технологической зрелости данных направлений, однако одновременно демонстрирует наличие нехватки альтернативных подходов, позволяющих обеспечить широкополосный отклик, низкую чувствительность к параметрическим изменениям, возможность масштабировать получаемые результаты, а также создать универсальную модель.

Анализ распределения исследуемых наноструктур по типам (табл. 2) позволяет выявить глубинную связь между геометрией системы и доминирующей физической логикой исследований.

Таблица 2. Типы наностуктур

Тип структуры	Количество статей, шт	Доля статей, %
Метаповерхности	12	29
Слоистые структуры	9	22
Периодические структуры	6	15
Наночастицы	7	17
Градиентные нанопленки	4	10
Однородные / непрерывные	3	7
Итого	**41**	**100**

Полученные данные демонстрируют, что более 70% работ посвящены метаповерхностям, слоистым и периодическим структурам. Общим признаком данных структур является дискретная геометрия, проявляющаяся через резкую пространственную модуляцию параметров, либо периодическое повторение элементарных ячеек. При этом выбор дискретных структур предопределяет резонансный характер исследуемых эффектов, а также ограничивает возможность получения результатов, применимых к различным структурам.

В то же время, исследования, посвященные градиентным нанопленкам и однородным / непрерывным средам представлены менее, чем в 20% изучаемых работ. Это свидетельствует о серьезном научном потенциале развития нанооптики именно в этих направлениях. В отличие от дискретных структур, непрерывные и градиентные среды позволяют формулировать условия существования эффектов и создают предпосылки для обобщения классических законов оптики.

Таким образом, тип геометрии наноструктуры является скрытым, но определяющим фактором, и влияет на характер получаемых научных результатов.

Преобладание дискретных структур усиливает модель резонансных состояний, выявленную в предыдущем подразделе и, одновременно, ограничивает возможность обобщения и масштабирования полученных результатов.

Анализ научных публикаций с точки зрения масштаба и зоны распространения оптического поля (табл. 3) демонстрирует явное преобладание локализованных режимов. Полученные данные свидетельствуют о наличии большого количества научных работ в области глубоко субволнового и ближнепольного диапазонов. При этом дальнепольным и переходным режимам учеными уделяется недостаточно внимания.

Таблица 3. Масштаб и поле

Параметр	**Количество статей, шт**	**Доля статей, %**
Глубоко субволновой режим	20	35
Ближнее поле	18	32
Дальнее поле	11	19
Переходные режимы	8	14
Итого	**57**	**100**

Преобладание локализованных режимов усиливает резонансный характер научных исследований и концентрирует внимание авторов работ на конкретных вариантах построения наноструктур. В результате полученные результаты трудно масштабировать, а связь с классической оптикой ослабевает. Основное внимание смещается с универсальных волновых закономерностей на локальные узкополосные оптические эффекты. В целом же данные тенденции усиливают различия между современной нанооптикой и общей волновой физикой, ограничивая возможности для реализации системного обобщения и разработки универсальных моделей.

Анализ научных публикаций по источникам дисперсии (табл. 4) демонстрирует явное преобладание геометрической и материальной дисперсий. В тоже время, градиентные механизмы остаются существенно недооцененными.

Таблица 4. Источники дисперсии

Тип	**Количество статей, шт**	**Доля статей, %**
Геометрическая	15	42
Материальная	11	31
Комбинированная	7	19
Градиентная	3	8
Итого	**36**	**100**

В большинстве случаев дисперсионные свойства рассматриваются не как целенаправленно задаваемый и контролируемый параметр, а как побочный результат выбора структуры. В результате научные исследования преимущественно сконцентрированы на резонансных и локализованных эффектах. При этом, дисперсия, играющая ключевую роль в классической волновой теории для описания фундаментальных законов распространения, остаётся недооцененной и применяется ограниченно.

Таким образом, выбранная структура предопределяет наблюдаемые эффекты, а универсальные волновые принципы, регулирующие дисперсию, остаются мало изученными.

Анализ отобранных научных статей по критерию «тип физических эффектов» (табл. 5) демонстрирует явное преобладание резонансных и локализованных явлений. В то же время универсальные и устойчивые эффекты, такие как безотражательное прохождение электромагнитной волны и аномальная дисперсия, остаются малоисследованными.

Таблица 5. Физические эффекты

Эффект	**Количество статей, шт**	**Доля статей, %**
Резонансы	25	32
Локализация поля	22	28
Снижение отражения	19	24
Безотражательное прохождение	8	10
Аномальная дисперсия	5	6
Итого	**79**	**100**

Результаты проведенного анализа демонстрируют, что 60% исследуемых работ сконцентрированы на резонансах и локализации поля. Это свидетельствует о преобладании парадигмы, ориентированной на усиление и концентрацию оптического отклика в конкретных наноструктурах. Что касается эффектов безотражательного прохождения электромагнитной волны и аномальной дисперсии, то в нанооптике они скорее рассматриваются как частный эффект, возникающий при определённых сочетаниях геометрических и материальных характеристик. Соответственно, фокус исследований смещается с установления общих принципов и инвариантов к изучению специфических эффектов в резонансных структурах.

Анализ научных публикаций по критерию «поляризационный режим» (табл. 6) демонстрирует явное преобладание работ, сосредоточенных на одной поляризации, в то время как поляризационная инвариантность остаётся практически не изученной.

Таблица 6. Поляризационные режимы

Режим	**Количество статей, шт**	**Доля статей, %**
Только p или s	19	46
Обе поляризации	11	27
Поляризационная селективность	9	22
Поляризационная инвариантность	2	5
Итого	**41**	**100**

Результаты исследований показывают, что почти половина публикаций рассматривает исключительно один вид поляризации (p- или s-). И лишь 5% статей затрагивают поляризационную инвариантность. Это свидетельствует о том, что поляризация чаще используется как ограничение для упрощения анализа, а не как объект системного исследования.

В результате обобщение классических эффектов (например, эффект Брюстера), становится невозможным. Формулировка универсальных условий прохождения света через наноструктуры становится затруднительной. Возможности использования симметрий уравнений Максвелла для построения устойчивых к вариациям моделей остаются нереализованными. Таким образом, поляризация является механизмом, дающим возможность системного обобщения и создания универсальных моделей эффектов.

Анализ публикаций по критерию используемых теоретических подходов (табл. 7) демонстрирует явное преобладание количественных методов анализа. В тоже время уравнения Максвелла встречаются относительно редко.

Таблица 7. Теоретические подходы

Теоретический подход	**Количество статей, шт**	**Доля статей, %**
Количественные методы	23	51
Качественные методы	20	44
Уравнения Максвелла	2	4
Итого	**45**	**100**

Проведенный анализ выявил принципиально важную закономерность, что фундаментальная новизна в современных исследованиях нанооптики обусловлена не использованием сложных вычислительных расчетов, а применением качественных методов исследований. Работы, описывающие новые эффекты или обобщение классических законов, практически всегда опираются на методы, обеспечивающие проведение качественного анализа, даже если количественные методы используются в качестве инструментов для проверки данных.

Результаты анализа публикаций по типу научной новизны (табл. 8) свидетельствуют о том, что большинство работ направлено на инженерные улучшения и интерпретацию уже известных эффектов. При этом качественное обобщение законов встречается крайне редко.

Таблица 8. Тип новизны

Тип новизны	**Количество статей, шт**	**Доля статей, %**
Инженерные улучшения	15	42
Интерпретации	11	31
Новые эффекты	7	19
Обобщение законов	3	8
Итого	**36**	**100**

Таким образом, по числу публикаций преобладают инкрементальные исследования. При этом качественная структуризация нанооптики и формирование универсальных, фундаментальных моделей остаётся сферой исследования незначительного количества публикаций.

Преобладание работ, сосредоточенных на инженерных подходах и интерпретации данных, задаёт инкрементальную парадигму развития науки в данном направлении, что определяет ярко выраженный системный характер современной нанооптики.

4. Ограничения исследования

Несмотря на системный подход, данный обзор имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов.

Обзор основан на анализе 36 репрезентативных статей, выбранных по ключевым направлениям нанооптики. Несмотря на то, что исследуемые научные работы отражают основные тенденции в области исследований по нанооптике, они не содержат в себе полной картины всех исследований в данном направлении.

Выбор критериев оценки и методология исследования, использованные авторами, также накладывают ряд ограничений. В частности, количественный метод оценки исследований не позволяет в полной мере оценить глубину и качество экспериментальных или теоретических результатов каждого отдельного исследования.

Изучение работ по типу новизны показало, что большинство работ сосредоточено на инженерных улучшениях и интерпретациях. В время, как качественные обобщающие исследования встречаются крайне редко. Это означает, что проведенное исследование отражает в большей степени не фундаментальное теоретическое развитие науки в области нанооптики, а, скорее, инкрементальное.

В совокупности описанные ограничения показывают, что проведенное исследование отражает преобладающие направления развития и инженерную логику современных публикаций в области нанооптики. При этом авторы не претендуют на полное соответствие полученных результатов исследования всей совокупности научных работ в данном направлении. Тем не менее системная методология анализа, включающая восемь критериев оценки и восемь таблиц, позволяет выявить основные закономерности, ограничения и направления для дальнейших исследований.

5. Ограничения существующих исследований

Результаты сравнительного анализа 36 научных статей, исследованных в рамках данной статьи, демонстрируют, что современная нанооптика развивается преимущественно в рамках модели резонансно-локализованных состояний. Данное утверждение подтверждается преобладанием дискретных наноструктур (метаповерхностей, слоистых и периодических систем), представленных почти в 70% работ.

Большинство исследований ориентировано на изучение глубоко субволновых и ближнепольных режимов. С одной стороны, это усиливает локализацию поля. С другой стороны, это ограничивает возможности по масштабированию получаемых результатов, в частности, во взаимосвязи с классической волновой оптикой. В тоже время преобладающими физическими эффектами остаются резонансы и локализация. Универсальные режимы, в том числе безотражательное прохождение и аномальная дисперсия, малоизучены.

Большая часть исследованных работ рассматривает только одну поляризацию, что значительно ограничивает возможности построения поляризационно-инвариантных моделей. Аналогично, геометрическая и материальная дисперсия изучаются гораздо чаще, чем градиентная дисперсия. При этом ее редко рассматривают как самостоятельный инструмент управления.

С методологической точки зрения преобладают количественные методы анализа. При этом фундаментальная новизна исследований чаще свойственна работам, основанным на качественных исследованиях. Но качественным обобщающим и обзорным работам по-прежнему не удаляется должного внимания (в сравнении с инкрементальными инженерными исследованиями).

Проведенный анализ демонстрирует, что выявленные критерии оценки формируют взаимосвязанную систему оценки и описания современных исследований в области нанооптики.

Концентрация большинства исследований на резонансах определяет инженерную логику оптимизации отдельных структур. В то же время, это существенно ограничивает универсальность моделей и возможность их масштабировать.

Количественные методы анализа позволяют глубже изучить сложные нанооптические структуры. В тоже время это существенно усложняет понятийный аппарат при описании общих физических закономерностей. В результате явления, потенциально обладающие поляризацией и дисперсией чаще всего рассматриваются как второстепенные элементы исследований.

Наблюдаемый дисбаланс в научных работах в сторону преобладания количественных исследований связан с тем, что проведение экспериментов и вычислений гораздо проще, чем применение аналитических и градиентных подходов, которые требуют более высокого уровня теоретического анализа и обобщения, а также точности математических моделей.

Сопоставление выделенных авторами критериев оценки позволяет сделать вывод, что в области современной нанооптика преобладают количественные методы исследований. Это, в свою очередь, качественно ограничивает развитие в направлении модели резонансно-локализованных состояний. Данное ограничение препятствует дальнейшему масштабированию полученных результатов. И, в то же время, способствует смещению фокуса исследований с выявления универсальных закономерностей на описание отдельных физических эффектов.

Выявленные закономерности отражают не столько технологические ограничения, сколько структуру научного мышления в области нанооптики, где сочетание дискретной геометрии, субволнового масштаба и резонансной логики определяет общее направление современных исследований и направления их дальнейшего развития.

6. Перспективы и направления будущих исследований

Результаты анализа 36 научных публикаций позволили выявить системные закономерности. В то же время в исследовании обнаружен ряд теоретических «пробелов» и недооцененных с научной точки зрения направлений, которые открывают новые возможности для дальнейшего развития нанооптики.

Исследования, посвященные изучению непрерывных и градиентных структур, составляют менее 20% изученных работ. При этом данные направления имеют большой потенциал в части обобщения классических законов. Будущие исследования в данном направлении могут быть сконцентрированы на изучении систем управления волновыми процессами в градиентных и непрерывных средах, способных сохранять свое состояние, структуру или характер движения при небольших внешних воздействиях, возмущениях или флуктуациях. Это позволит описать более универсальные принципы, которые можно масштабировать при дальнейших исследованиях.

Дальнепольное распределение интенсивности света изучается лишь в 19% исследованных публикаций. Расширение исследований в данной области позволит найти больше взаимосвязей и общих направлений исследований в области нанооптики и классической волновой физики. Это поможет сформулировать универсальные законы распространения, которые применяются не только к локализованным структурам, но и к более крупным пространственным масштабам.

В то же время такие направления, как поляризационная инвариантность и градиентная дисперсия по-прежнему остаются мало изученными, что значительно ограничивает возможности использования обобщения физических эффектов в исследованиях.

Перспективными направлениями являются исследования систем с контролируемой поляризационной селективностью, градиентной дисперсией и симметричными архитектурами, что может привести к открытию новых универсальных волновых состояний и физических явлений.

Авторами выявлена взаимосвязь между фундаментальной новизной исследований и использованием количественных и качественных методов исследований. Научные работы, описывающие и формулирующие новые эффекты, а также обобщающие законы, чаще всего основаны на использовании качественных методов исследования.

Основная часть исследуемых работ основана на инкрементальных инженерных исследованиях (42% работ). При этом качественные исследования, обобщение законов и описание универсальных эффектов до сих пор встречаются крайне редко.

Одним из возможных направлений для будущих исследований может стать анализ, проведенный авторами в рамках данной статьи, с последующим описанием и развитием концептуально обоснованной методологии оценки и обобщения научных исследований в области нанооптики.

Проведение исследований в данных направлениях с использованием количественных и качественных методов одновременно, создаст условия для совершения новых фундаментальных открытий и систематизации имеющихся знаний в области наноптики на принципиально новом уровне.

Заключение

В рамках данного исследования был проведён анализ 36 научных публикаций в области нанооптики. Авторами выделены восемь критериев оценки исследований. Такой подход позволил не только количественно описать текущее состояние исследований в данном направлении, но и выявить структурные закономерности и концептуальные ограничения.

Полученные результаты подтверждают преобладание резонансно-локализованных состояний. Более 70% изучаемых публикаций посвящены плазмонным эффектам, метаматериалам и ближнепольным конфигурациям. Это подтверждает гипотезу о преимущественно инженерно-ориентированном развитии современной нанооптики, при котором локальные резонансные эффекты преобладают над универсальными и масштабируемыми моделями (Гипотеза 1).

В то же время выявлен значительный потенциал в развитии непрерывных и градиентных структур, а также поляризационно-инвариантных режимов. Доля исследований, посвящённых данным направлениям, не превышает 20% от исследуемых работ. Данный вывод подтверждает гипотезу о том, что, несмотря на их преимущества для аналитического описания и обобщения классических законов, данные подходы до сих пор остаются недооценёнными (Гипотеза 2).

Проведенный анализ показывает, что фундаментальная новизна исследований тесно связана с методами исследований. Работы, описывающие новые эффекты или обобщающие физические законы, в основном базируются на качественных методах анализа. В то время, как количественные методы преобладаю в инкрементальных инженерных исследованиях. Это подтверждает гипотезу о том, что в такого рода исследованиях концептуальная модель имеет более важное значение, чем сложные количественные методы расчётов (Гипотеза 3).

В целом результаты проведенного исследования демонстрируют асимметричное развитие в области нанооптики. Это позволяет выделить основные направления будущих исследований: развитие непрерывных и градиентных структур, изучение дальнепольных и широкополосных режимов, внедрение поляризационно-инвариантных и дисперсионно-

управляемых систем, а также использование аналитических методов для выявления и описания универсальных закономерностей.

Проведённый авторами анализ позволяет сформировать целостное представление о текущей ситуации в области развития нанооптики и задаёт концептуальные ориентиры для её дальнейшего фундаментального и прикладного развития, направленного на переход от локальных эффектов к универсальным физическим принципам и законам.

Список литературы

1. Al-Amri M.D. Optics in Our Time / M.D. Al-Amri, M.M. El-Gomati, S. Zubairy // Cham: Springer International Publishing, 2016. – 504 p. DOI: 10.1007/978-3-319-31903-2.
2. Deng M.-Y. A historical overview of nano-optics: From near-field optics to plasmonics / M.-Y. Deng, X. Zhu // Chinese Physics B. – 2024. – Vol. 33, No. 5. – Art. 050703. – DOI: 10.1088/1674-1056/ad2a77.
3. Li Y. From performance to structure: a comprehensive survey of advanced metasurface design for next-generation imaging / Y. Li, X. Zhang, J. Wang et al. // Light: Science & Applications (Nature). – 2025. – Art. s44310-025-00081-6. DOI: 10.1038/s44310-025-00081-6.
4. Babicheva V.E. Introduction to Advances in Nanophotonics, Plasmonics, and Nano-Optics / V.E. Babicheva, Y.J. Lu, A.S.Shalin, D. Late // Nanoscale Advances, Royal Society of Chemistry. – 2025. – Vol. 7. –P. 6674–6676. DOI:10.1039/D5NA90067K.
5. Iqbal M.A. Basic Concepts, Advances and Emerging Applications of Nanophotonics / M.A. Iqbal, M. Malik, N. Anwar et al.// Arabian Journal of Chemistry. – 2023. - Vol. 16. - № 2. P. 104–122. DOI:10.1016/j.arabjc.2023.10504.
6. Lin R. Nonlinear Meta-Devices: From Plasmonic to Dielectric/ R. Lin, J. Yao, Z. Wang, et al.// Engineering. – 2025. – Т. 45, № 2. – С. 15–24. DOI: 10.1016/j.eng.2024.11.021.
7. Babicheva V. E. Optical Processes behind Plasmonic Applications / V. E. Babicheva // Nanomaterials. – 2023. – Vol. 13, № 7. – Art. 1270. – DOI: 10.3390/nano13071270.
8. Mcoyi M. P. Developments in Localized Surface Plasmon Resonance / M. P. Mcoyi, K. T. Mpofu, M. Sekhwama, P. Mthunzi-Kufa // Plasmonics. – 2025. – Vol. 20. – P. 5481–5520. – DOI: 10.1007/s11468-024-02620-x.
9. De Tommasi E. Frontiers of light manipulation in natural, metallic, and dielectric nanostructures / De E.Tommasi, E.Esposito // La Rivista del Nuovo Cimento. – 2021. – Vol. 44. – Pp. 1–68. DOI: 10.1007/s40766-021-00015-W.
10. Song H.-Z. Editorial of the Special Issue ‘Nano-Optics and Nano-Optoelectronics: Challenges and Future Trends / H.-Z. Song // Nanomaterials. – 2024. – Vol. 14, No. 2. – Art. 169. DOI: 10.3390/nano14020169.
11. Lodahl P. Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures / P.Lodahl, S. Mahmoodian, S. Stobbe // Reviews of Modern Physics. – 2015. – Vol. 87, № 2. – PP. 347–400. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.347
12. Krasnok A. E. All-Dielectric Nanophotonics: Fundamentals, Fabrication, and Applications / A.E. Krasnok, R. S. Savelev, D. G. Baranov, P. A. Belov // World Scientific Series in Nanoscience and Nanotechnology. – Vol. 16: Nanophotonics, Volume 1. – Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2018. – Pp. 337–385. DOI: 10.1142/9789813228696_0008.
13. Hollins J. F., Sarson G. R., Shukurov A., Fletcher A., Gent F. A. Supernova-regulated ISM. V. Space- and time-correlations / J. F. Hollins, G. R. Sarson, A. Shukurov et al.// The Astrophysical Journal. – 2017. – Vol. 850, No. 1. – PP. 1–18. DOI: 10.3847/1538-4357/aa93e7.

14. Gammage B., Shende V. Mirror symmetry for very affine hypersurfaces / B. Gammage, V.Shende// Acta Mathematica. – 2022. – Vol. 229, № 2. – Pp. 287–346. DOI: 10.4310/ACTA.2022.v229.n2.a2
15. Koshelev K., Favraud G., Bogdanov A., Kivshar Y., Fratalocchi A. Nonradiating photonics with resonant dielectric nanostructures / K. Koshelev, G. Favraud, A. Bogdanov et al. // Nanophotonics. – 2019. – Vol. 8, № 5. – Pp. 725–745. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0024.
16. Nawaz S. Deep latent space learning for cross-modal mapping of audio and visual signals / S. Nawaz, M. K. Janjua, I. Gallo, Mahmood A., A. Calefati // Proceedings of the Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA 2019). – Perth, Australia: IEEE, 2019. – P. 1–7. DOI: 10.1109/DICTA47822.2019.8945863.
17. Meixner A. J. Nanophotonics, nano-optics and nanospectroscopy / A. J. Meixner // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2011. – Vol. 2. – Pp. 499–500. DOI: 10.3762/bjnano.2.53.
18. Алтунин К. К. Разработка информационного сопровождения изучения темы, посвященной изучению приближения эффективной среды в курсе нанооптики / К. К. Алтунин // Наука Online. – 2018. – № 3 (4). – С. 80–94.
19. Алтунин К. К. Разработка компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе нанооптики / К. К. Алтунин // Наука Online. – 2018. – № 4 (5). – С. 74–93.
20. Zhang H. Data driven approaches in nanophotonics: a review of AI-enabled metadevices / H. Zhang, L. Kang, S. D. Campbell, J. T. Young, D. H. Werner // Nanoscale. – 2025. – Vol. 17, No. 41. –P. 23788–23803. DOI: 10.1039/D5NR02043C.
21. Chou Chau Y.-F. Nanophotonic materials and devices: recent advances and emerging applications / Y.-F. Chou Chau // Micromachines. – 2025. – Vol. 16, No. 8. – Art. 933, DOI: 10.3390/mi16080933.
22. Закиров А. В. Подбор оптимальных параметров идеально-согласованного слоя для задач нанооптики / А. В. Закиров, В. Д. Левченко// Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23, № 8. – С. 55–64.
23. Sandoghdar V. Nano-Optics in 2020 ± 20 / V. Sandoghdar // Nano Letters. – 2020. – Vol. 20, № 7. – P. 4721–4723. – DOI: 10.1021/acs.nanolett.0c02199.
24. Шварцбург А. Б. Квантовая электроника / А. Б. Шварцбург, М. Б. Агранат, О. В. Чефонов // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 10. – С. 948–952.
25. Joshi K. A brief report on nanophotonics and metamaterials landscape in India / K. Joshi, H.Sahoo, S. Mujumdar // Journal of Optics. – 2025. – Vol. 54. – Pp. 2991–3007. DOI: 10.1007/s12596-024-01905-y.
26. Roth D. J. Nanophotonics with plasmonic nanorod metamaterials / D. J. Roth, A. V. Krasavin, A. V. Zayats // Laser & Photonics Reviews. – 2024. – Vol. 18, No. 8. – Art. 2300886. – DOI: 10.1002/lpor.202300886.
27. Векшин М. М. Расчет базовых элементов плазмонной интегральной нанооптики / М. М. Векшин, Н. А. Яковенко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2007. – Т. 4, № 4. – С. 63–70.
28. Babicheva V. E. Introduction to Advances in Nanophotonics, Plasmonics, and Nano-Optics / V. E. Babicheva, Y. J. Lu, A. S. Shalin, D. Late // Nanoscale Advances. – 2025. – Vol. 7. – P. 6674–6676. – DOI: 10.1039/D5NA90067K.
29. Степанов А. Л. Плазмонная нанооптика на поверхности металла / А. Л. Степанов // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2010. – Т. 152, № 3. – С. 148–156.
30. Образцова Е. Современные достижения нанооптики / Е. Образцова, И. Яминский // Наноиндустрия. – 2008. – № 1. – С. 18–23.
31. Кузнецов О. П. Перспективы использования магнетронного напыления TiO_2 в теплотехнике, оптике и нанооптике / О. П. Кузнецов, М. М. Куниевский, Б. В. Поллер и др. // Техническая физика. – 2007. – Т. 52. – С. 1123–1130.

32. Векшин М. М. Исследования элементов волноводной плазмонной нанооптики / М.М. Векшин, О. А. Кулиш, Н. А. Яковенко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2012. – Т. 9, № 4. – С. 33–36.
33. Векшин М. М. Исследования элементов плазмонной нанооптики / М.М. Векшин, Н. А. Яковенко // Наука Кубани. – 2008. – № 4. – С. 50–52.
34. Ерёмин Ю. А., Лопушенко И. В. Гибридная схема метода дискретных источников для анализа граничных задач нанооптики / Ю. А. Ерёмин, И. В. Лопушенко // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. – 2016. – № 1. – С. 3–10.
35. Багаев С. Н. Нанооптика тонкоплёночных лазерно-индуцированных топологических структур на поверхности твердого тела: фундаментальные явления и их приложения / С. Н.Багаев, С. М. Аракелян, А. О. Кучерик, Д. Н. Бухаров, О. Я. Бутковский // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 12. – С. 1682–1695.
36. Алтунин К. К. Разработка информационной системы поддержки изучения темы по оптике метаматериалов в составе курса по нанооптике / К. К. Алтунин, Е. А. Шленкина // Наука Online. – 2022. – № 2 (19), С. 75–88.
37. Ushkov A., Dyubo D., Belozerova N., et al. Tungsten Diselenide Nanoparticles Produced via Femtosecond Ablation for SERS and Theranostics Applications /A. Ushkov, D. Dyubo, N.Belozerova et al.// Nanomaterials. – 2025. – Vol. 15, № 4. – Art. 10004. – DOI: 10.3390/nano15010004.
38. Казанский Н. Л. Метаповерхности и перспективы развития компьютерной оптики / Н. Л. Казанский, С. Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 3. – С. 349–362. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1627.
39. Ерохин Н. С. Поляризационные эффекты в градиентной нанооптике / Н. С. Ерохин, Ю. М. Зуева, А. Б. Шварцбург // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 9. – С. 785–790.

ANALYSIS OF CONTEMPORARY RESEARCH IN NANO-OPTICS

***A. S. Vorobyova*[1], *K. M. Ilyenkova*[2]**

[1] Specialized Educational and Scientific Center (SESC)
30, Danila Zvereva st., 620137, Yekaterinburg, Russian Federation

[2] I-KM Business School,
48, Onufrieva st., 620147, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract: This article presents a comparative analysis of scientific publications in the field of nano-optics. The study is based on 36 scientific publications. The authors identify 8 factors that form the basis for the comparison and analysis of the scientific materials. The main objective of the study is to identify fundamental patterns and trends in the development of this area of physics, as well as to assess its potential and limitations.

As a result of the analysis, the authors find that the resonance-localized paradigm is predominant. A number of researchers place emphasis on discrete structures and near-field regimes. At the same time, the absence of a universal approach is identified, which limits the possibilities for scaling the observed effects. Meanwhile, continuous and gradient media, as well as polarization-invariant regimes, remain insufficiently studied.

The study employs quantitative methods of analysis. The authors test the hypotheses they put forward and propose directions for further research in this field.

Keywords: Nano-optics, plasmonic structures, metamaterials, near-field, discrete and gradient nanostructures, polarization effects, resonant regimes, analytical methods, numerical methods.

Статья представлена в редакцию 02.05.2026