

EDN: FSWPXJ

УДК 535.8:621.372.8:539.126

2.2.6

КВАНТОВЫЕ ПРИНЦИПЫ В ВОЛОКОННОЙ СЕНСОРИКЕ

*А.А. Камалева¹, Б.И. Валеев¹,
М.В. Даишков², А.Ж. Сахабутдинов¹*

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, К. Маркса, 10

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Российская Федерация, 443090, г. Самара, Московское шоссе, д. 77

Аннотация. В статье представлен обзор квантовых принципов и физических эффектов, перспективных для развития волоконно-оптической сенсорики. Показано, что дальнейшее повышение чувствительности и информативности волоконных датчиков связано с переходом от классических методов регистрации к использованию квантовой когерентности, квантовых корреляций, одиночных фотонов, сжатых состояний света и квантовых материалов. Рассмотрены основные подходы квантового зондирования, особенности квантовых источников света, а также возможности применения углеродных наноалмазов с NV-центрами, фотонных кристаллов, квантовых точек и плазмонных структур в волоконных сенсорных системах. Отдельное внимание уделено использованию рамановского, бриллюэновского и рэлеевского рассеяния в распределённых измерениях температуры, деформации и других физических параметров. Показано, что интеграция квантовых эффектов в архитектуру волоконно-оптических датчиков открывает путь к созданию сенсорных систем нового поколения, обладающих повышенной чувствительностью, высоким пространственным разрешением и расширенными функциональными возможностями. Сделан вывод о значительном потенциале квантовых подходов для дальнейшего развития волоконной сенсорики и их перспективности для практических применений в науке, технике и биомедицине.

Ключевые слова: волоконно-оптическая сенсорика; квантовая сенсорика; квантовое зондирование; квантовые источники света; сжатый свет; NV-центры; углеродные наноалмазы; квантовые точки; фотонные кристаллы; плазмонные структуры; рамановское рассеяние; бриллюэновское рассеяние; рэлеевское рассеяние.

Введение

Волоконно-оптическая сенсорика относится к числу наиболее зрелых и технологически отработанных измерительных платформ, в прикладных задачах широко используются волоконные брэгговские решетки, интерферометрические схемы Фабри – Перо и Маха – Цендера. По мере усложнения задач мониторинга (локализация воздействий, повышение пространственного разрешения и информативности) всё более заметным становится влияние фундаментальных ограничений регистрации измерительного сигнала, включая квантовый шум измерения. В этой связи дальнейшее повышение метрологических характеристик связывают с переходом от исключительно классических методов фотоники к квантовой сенсорике и квантовой метрологии, в которых ресурсом измерения выступают квантовая когерентность и корреляции, а также специально подготовленные состояния света и вещества [1–7].

Развитие квантовых технологий в последние годы смещаются в сторону практической реализации: активно изучаются центры окраски (в частности NV-центры), квантовые точки, ионные ловушки и фотонные интегральные схемы, рассматриваемые как основа для сенсоров, квантового зондирования, высокоточной метрологии и квантовых вычислений

[1]. Параллельно формируются национальные и наднациональные программы развития квантовых технологий, отражающие их стратегическую значимость для науки и высокотехнологичных отраслей [2]. Отдельным направлением выступают смежные области — квантовые вычисления и моделирование прикладных задач (в том числе в энергетике [3]), — которые стимулируют дальнейшее совершенствование инструментальной и технологической базы квантовых систем.

Квантовые датчики ориентированы на высокоточную регистрацию физических величин за счёт использования квантовых состояний и корреляций; в ряде схем это позволяет приближаться к границам, недостижимым для классических методов, и, при определённых условиях, превосходить стандартный квантовый предел [4; 7]. Практическая ценность квантовых подходов определяется не только демонстрируемой чувствительностью, но и возможностью интеграции квантовых ресурсов в инженерную архитектуру сенсора и схему опроса, включая оптоволоконные линии и волоконные чувствительные элементы. Примеры применений квантовых систем обсуждаются, в частности, для детекторных и сенсорных задач в физических установках, которые могут требовать минимальной калибровки, поскольку сравнивают относительные изменения окружающей среды с неизменными атомными характеристиками [5]. Одновременно сохраняются направления классической волоконной сенсорики, — например, оптические датчики влажности [6], — демонстрирующие высокую степень готовности и служащие реперной базой для сопоставления с квантово-усиленными архитектурами.

Настоящий обзор носит обзорно-аналитический характер и опирается на работы, охватывающие как фундаментальные результаты по квантовому зондированию и квантовым источникам, так и публикации по материалам/платформам и волоконным реализациям. Отдельное внимание в работе уделяется сенсорным архитектурам таким как: торцевые интерферометры Фабри – Перо, адресные волоконные брэгговские решетки с вытравленным сегментом и их гибридным комбинациям. Эти платформы рассматриваются в дальнейшем как наиболее перспективная база для внедрения квантовых подходов, поскольку они сочетают технологическую отработку с возможностью гибкой модификации под задачи квантового зондирования. Их ключевая особенность заключается в уникальном сочетании высокой технологической отработки, присущей классическим волоконным брэгговским решеткам (ВБР) и интерферометрам, с возможностью гибкой модификации чувствительной области для интеграции квантовых эмиттеров, материалов и режимов зондирования. Для обеспечения связности изложения принята трёхуровневая систематика: квантовые ресурсы и способы их формирования (состояния света и вещества), физические платформы и материалы, обеспечивающие требуемые квантовые свойства, волоконно-оптические архитектуры и механизмы считывания, определяющие реальную применимость в сенсорных системах. В конце каждого тематического подраздела даётся краткий итог применимости для волоконной сенсорики в терминах выигрыша, ограничений и условий интеграции. В заключении сформулированы обобщающие выводы и ограничения.

Квантовое зондирование

Квантовое зондирование представляет собой класс измерительных подходов, в которых информация о внешнем воздействии извлекается из изменения квантового состояния света или вещества под действием измеряемой величины. В отличие от классических сенсорных схем, здесь измерительный ресурс формируется не только за счёт интенсивности сигнала, но и за счёт квантовой когерентности, корреляций и, в ряде случаев, запутанности [8]. В прикладном отношении целесообразно выделять две крупные группы таких подходов. Первая включает фотонные методы, использующие неклассические состояния света для по-

вышения точности регистрации, улучшения отношения сигнал/шум и реализации коррелированных измерений [9]. Вторая охватывает нефотонные платформы, в которых чувствительным элементом выступают спиновые кубиты, захваченные ионы, атомные ансамбли или твердотельные системы с хорошо определёнными квантовыми уровнями [10]. Такое разделение важно не только с точки зрения классификации. Фотонные схемы естественным образом сопрягаются с волоконно-оптической инфраструктурой, тогда как нефотонные платформы чаще рассматриваются как локальные высокочувствительные элементы, требующие отдельной оптической или микроволновой обвязки.

Работоспособность квантового сенсора определяется несколькими фундаментальными условиями. Во-первых, система должна обладать разрешимыми квантовыми (энергетическими) уровнями, чувствительными к внешнему воздействию. Во-вторых, необходимо обеспечить подготовку сенсора в известном начальном состоянии и достоверное считывание его конечного состояния. В-третьих, требуется возможность когерентного управления эволюцией системы с помощью внешних полей, изменяющих энергетические уровни или вероятность зазора между ними [11]. Пример схемы сдвига энергетических уровней под действием внешнего воздействия представлен на Рисунок 1.

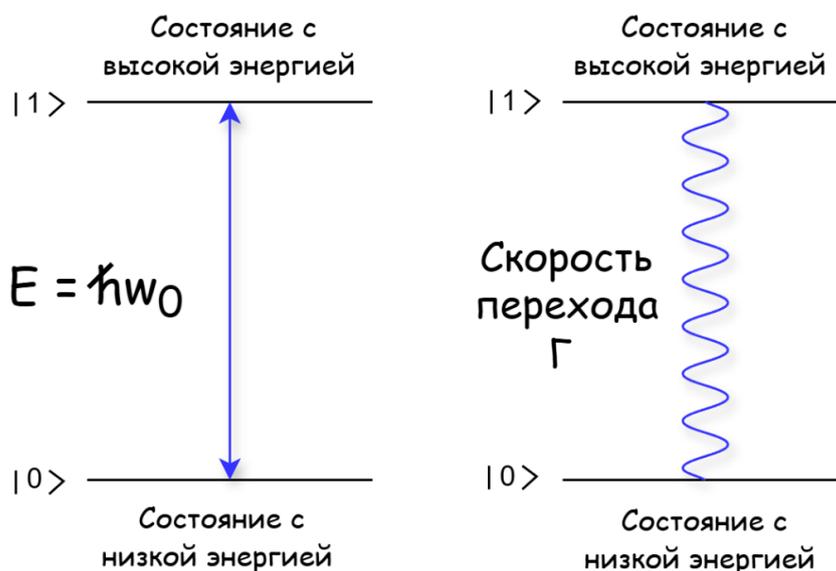


Рисунок 1. Схема сдвига энергетических уровней под действием внешнего воздействия

Квантовое зондирование представляет интерес для волоконных датчиков прежде всего, как средство повышения чувствительности и расширения функциональности измерений за счёт использования квантовых состояний света или квантово-управляемых чувствительных элементов. Наиболее естественный путь интеграции связан с фотонными схемами, поскольку они совместимы с волоконными линиями передачи и интерферометрическими архитектурами. Вместе с тем практическое внедрение ограничивается потерями, требованиями к стабильности квантового состояния, сложностью подготовки и считывания, а также необходимостью согласования квантовой платформы с реальной волоконной системой. Поэтому ключевой вопрос состоит не только в достижении предельной чувствительности, но и в инженерной реализуемости конкретной квантово-волоконной архитектуры.

Для волоконно-оптических приложений перспективность той или иной квантовой схемы должна оцениваться не только по предельной чувствительности, но и по совместимости с волоконной архитектурой, потерям при вводе-выводе излучения, устойчивости к внешним возмущениям и сложности опроса. Квантовое зондирование в контексте волоконной сенсорики следует рассматривать не как универсальную замену классических методов, а как набор специализированных подходов, способных обеспечить выигрыш в тех режимах,

где классические датчики ограничены шумом, пространственным разрешением или требованиями к локальности измерения.

Квантовые носители информации и измерительного отклика

Квантовые источники света представляют собой устройства, формирующие неклассические состояния электромагнитного поля, включая однофотонные, бифотонные и сжатые состояния. В отличие от классических оптических источников, такие системы характеризуются квантово-статистическими свойствами, которые не сводятся к классическому описанию интенсивности, фазы и их флуктуаций. В прикладном аспекте именно эти свойства определяют потенциал квантовых источников для задач высокоточного измерения, корреляционного анализа слабых сигналов и построения сенсорных архитектур, чувствительность которых ограничивается не только уровнем потерь, но и фундаментальной статистикой света.

Одним из ключевых неклассических свойств квантового света является запутанность. Запутанное состояние возникает тогда, когда совместное состояние двух или более оптических мод не может быть представлено в виде произведения состояний отдельных подсистем. В этом случае между модами возникают квантовые корреляции, не имеющие классического аналога и сохраняющиеся даже при их пространственном разделении. Наиболее распространены состояния, запутанные по поляризации, времени и энергии, положению и импульсу, а также по орбитальному угловому моменту [12]. Для сенсорных приложений принципиально важно, что запутанность представляет интерес не сама по себе, а как ресурс измерения, когда она позволяет реализовывать коррелированные схемы регистрации, уменьшать неопределённость оценки параметров и повышать информативность в задачах обнаружения слабых воздействий. Вместе с тем практическая ценность запутанных состояний определяется устойчивостью к потерям и декогеренции, что особенно существенно для волоконно-оптических трактов. Рассмотрим два пути квантовой инженерии состояний, представленные на Рисунке 2. Первое направление представляет переход из квазиклассического когерентного состояния в сжатое. Второй путь – из когерентного состояния в фоковское, при котором происходит сосредоточение всех фотонов в одном состоянии.

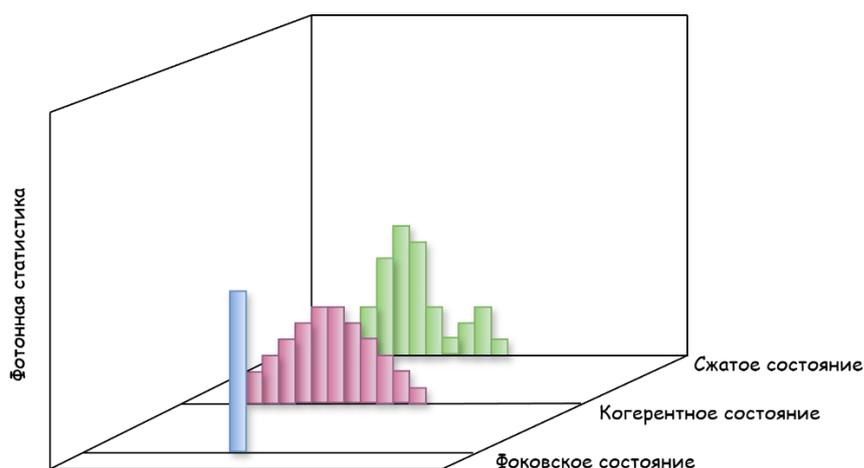


Рисунок 2. Фотонная статистика состояний света

С практической точки зрения квантовые источники света целесообразно разделять на три основные группы: однофотонные источники, генераторы фотонных пар и источники

сжатого света. Такое деление отражает не только различие физических механизмов генерации, но и различие тех метрологических задач, для которых тот или иной класс источников оказывается наиболее эффективным.

Однофотонные источники

Однофотонные источники предназначены для генерации состояний, в которых в заданном временном окне испускается не более одного фотона. В идеальном случае такие фотоны должны обладать высокой степенью неразличимости, то есть совпадать по спектральным, поляризационным, временным и пространственным характеристикам. По принципу действия однофотонные источники обычно подразделяют на детерминированные, работающие «по запросу», и вероятностные, или герольдированные. В последнем случае появление одиночного фотона фиксируется через регистрацию сопряжённого фотона, рождающегося, например, в процессах спонтанного параметрического рассеяния или четырёхволнового смешения. Детерминированные источники, напротив, основаны на контролируемом излучении одиночных квантовых эмиттеров при переходе из возбуждённого состояния в основное. К таким эмиттерам относятся одиночные атомы и ионы в ловушках, квантовые точки, а также точечные дефекты в кристаллах, в частности NV-центры в алмазе.

С метрологической точки зрения однофотонные источники представляют интерес прежде всего для задач, в которых критичны низкий уровень фона, высокая воспроизводимость квантового состояния и возможность регистрации единичных актов взаимодействия света с объектом. Однако в волоконно-оптических системах их использование сопряжено с рядом ограничений, а именно: необходимостью эффективного ввода излучения в волокно, высокой чувствительностью к потерям и требованиями к спектральному согласованию источника с волоконной или интегральной платформой.

Однофотонные источники наиболее перспективны в тех режимах, где требуется регистрация крайне слабых воздействий при минимальном числе зондирующих фотонов. Их преимущество связано с высокой степенью контроля квантового состояния, однако практическая реализация в волоконных датчиках ограничивается потерями на сопряжении, сложностью детектирования и требованиями к стабильности источника. На Рисунок 3 представлена фотонная сеть волокон, соединяющая четыре однофотонных источника (выделены желтым цветом) с четырьмя фотонными детекторами (выделены серым цветом) с помощью зеркал и делителей лучей.

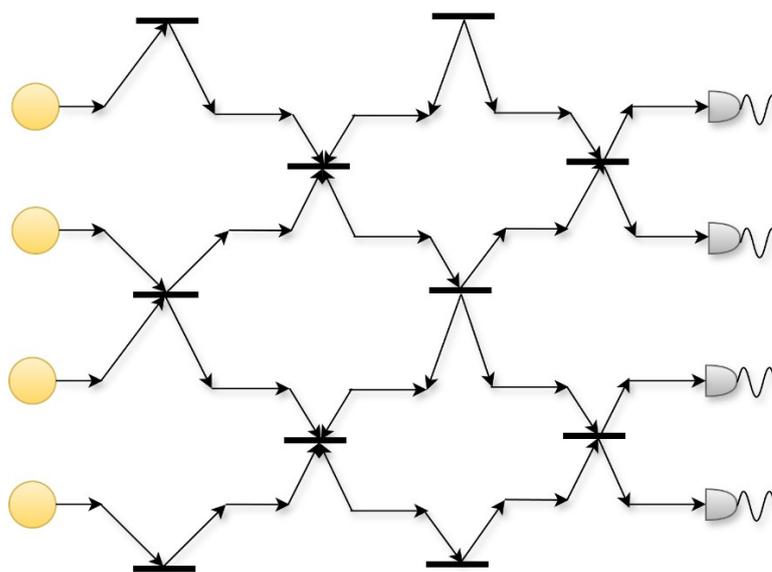


Рисунок 3. Фотонная сеть волокон

Генераторы фотонных пар

Генераторы фотонных пар формируют коррелированные по времени рождения, частоте, фазе или другим степеням свободы фотонные пары. В зависимости от механизма генерации и условий фазового согласования такие пары могут обладать также квантовой запутанностью. Ключевым достоинством бифотонных источников является высокая степень корреляции между фотонами, благодаря чему они востребованы в задачах квантовой связи, метрологии и обработки информации. Наиболее распространёнными механизмами генерации фотонных пар являются спонтанное параметрическое рассеяние в нелинейных кристаллах, четырёхволновое смешение в волоконных и интегрально-оптических структурах, а также каскадные излучательные переходы в квантовых точках.

Для сенсорных применений генераторы фотонных пар интересны тем, что позволяют реализовать корреляционные методы измерения, более устойчивые к фоновым помехам и шуму детектирования. Особенно важным является то, что четырёхволновое смешение в волоконных средах обеспечивает более естественную совместимость с волоконно-оптической инфраструктурой по сравнению с объёмными нелинейными кристаллами. В то же время выигрыш от корреляционных измерений быстро снижается при росте потерь, а сама схема регистрации требует синхронизации каналов, высокоэффективных фотодетекторов и строгого контроля паразитных нелинейных эффектов.

Генераторы фотонных пар представляют наибольший интерес для корреляционных волоконных схем и распределённых измерений, где важны временные и спектральные взаимосвязи между фотонами. Их сильная сторона — совместимость с волоконными нелинейными платформами и возможность реализации запутанных состояний. Главные ограничения связаны с потерями, сложностью корреляционной регистрации и снижением эффективности при практической длине волоконного тракта.

Источники сжатого света

Отдельный класс составляют источники сжатого света. Сжатое состояние представляет собой квантовое состояние электромагнитного поля, в котором дисперсия одной из квадратур уменьшается ниже стандартного квантового предела при соответствующем увеличении флуктуаций сопряжённой квадратуры, что согласуется с соотношением неопределённостей Гейзенберга. Генерация сжатого света обычно реализуется за счёт нелинейно-оптических процессов, прежде всего параметрического усиления, параметрической генерации в резонаторах и четырёхволнового смешения.

В контексте измерений сжатый свет важен как средство уменьшения квантового шума и повышения чувствительности по сравнению с пределом дробового шума. При этом следует различать по меньшей мере два режима, имеющих различную прикладную ценность. Одномодовое сжатие ориентировано на снижение шумов в одной наблюдаемой квадратуре и особенно эффективно в интерферометрических и фазочувствительных схемах. Двухмодовое сжатие, напротив, связано с формированием квантовых корреляций между двумя модами и представляет интерес для корреляционных и дифференциальных измерений.

Для волоконной сенсорики сжатые состояния особенно привлекательны в интерферометрических конфигурациях, где шум измерения непосредственно ограничивает точность оценки фазы, длины оптического пути или малых внешних возмущений. Их основное достоинство состоит в возможности снижения шумового порога измерения, однако практическое применение требует минимизации потерь, высокой фазовой стабильности и согласования режима сжатия с конкретной схемой опроса. Однако такие состояния крайне чувствительны к потерям, рассеянию и фазовой нестабильности, поэтому перенос лабораторных демонстраций в реальные волоконные датчики остаётся сложной инженерной задачей. Тем не менее, источники сжатого света наиболее перспективны для волоконно-оптических

интерферометрических датчиков, в которых чувствительность определяется уровнем квантового шума.

С учётом рассмотренных классов квантовых источников дальнейший анализ целесообразно перенести от квантовых состояний света к физическим платформам, в которых такие состояния формируются, преобразуются или используются для регистрации внешних воздействий. Поэтому в следующем разделе рассматриваются материалы и структуры, представляющие интерес для построения квантово-усиленных волоконно-оптических сенсоров.

Материалы и платформы

Если в предыдущем разделе рассматривались квантовые состояния света как измерительный ресурс, то на следующем уровне анализа необходимо перейти к физическим платформам, в которых этот ресурс формируется, преобразуется или используется для регистрации внешних воздействий. В контексте волоконной сенсорики особый интерес представляют такие материалы и структуры, которые, с одной стороны, обладают выраженными квантовыми или квази-квантовыми свойствами, а с другой — допускают интеграцию с волоконно-оптической архитектурой. К числу наиболее обсуждаемых платформ относятся углеродные наноалмазы с центрами окраски, фотонные кристаллы и квантовые точки. Они существенно различаются по физическому механизму чувствительности, степени готовности технологии и сложности интеграции, поэтому их целесообразно рассматривать не как взаимозаменяемые решения, а как разные классы платформ для различных сенсорных задач.

Углеродные наноалмазы

Углеродные наноалмазы относятся к числу наиболее перспективных квантовых материалов для высоколокальных измерений. Их применение в сенсорики связано прежде всего с наличием центров окраски, формирующих оптически активные дефектные состояния в кристаллической решётке алмаза. Такие структуры продемонстрировали эффективность при регистрации температуры [13], деформации [14], кислотности [15], а также электрических и магнитных полей [16]. Для волоконно-оптических приложений принципиально важно, что наноалмазы могут быть интегрированы с волокном несколькими способами: путём прямого встраивания в объём волокна или на его торец, через оптическую связь с коническими одномодовыми волокнами, а также посредством сопряжения алмазных микроструктур с многомодовыми волокнами [17], например, так как изображено на Рисунок 4.

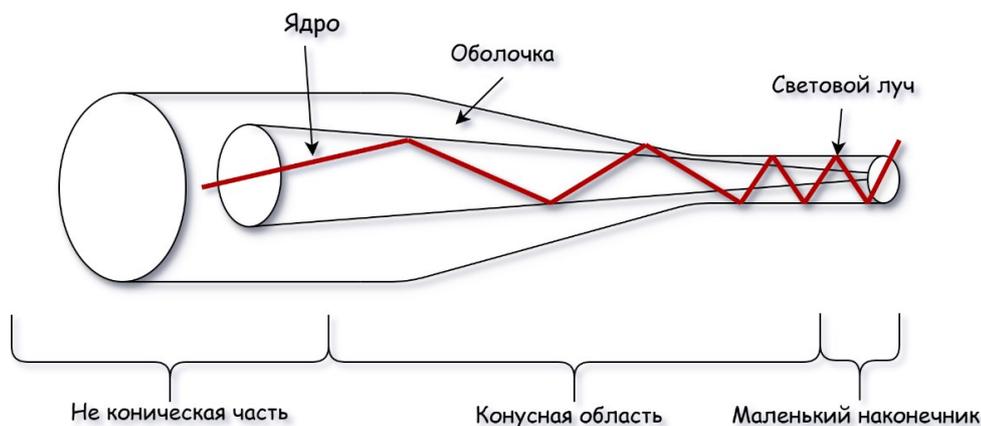


Рисунок 4. Схематическая диаграмма светового луча, приводящая к высокому NA для многомодового оптоволоконного конического кончика оптического волокна

Физическая значимость наноалмазов определяется не столько самим алмазом как трехмерной решеткой, сколько возможностью формирования в нём устойчивых дефектных центров. К числу таких центров относятся, в частности, NV-, SiV-, SnV- и GeV-структуры, возникающие при наличии вакансий углерода и атомных примесей [18]. Именно они обеспечивают квантовую эмиссию (излучение атомами энергии в виде фотонов) и чувствительность энергетической структуры к внешним воздействиям. В сенсорном отношении это означает, что измеряемая величина воздействует не на геометрию волоконного элемента, а на спектральные или спиновые характеристики встроенного квантового центра. Такой механизм делает наноалмазы особенно привлекательными для задач локального и биомедицинского мониторинга, где критичны малый объём чувствительной области и возможность неэлектрического считывания.

Отдельный интерес представляют люминесцентные датчики на основе наноалмазов. Так, частицы диаметром менее 250 нм, содержащие SiV-центры, демонстрируют узкую полосу излучения вблизи 740 нм при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм. Температурное воздействие приводит к изменению амплитуды, энергии и ширины спектральных пиков, что позволяет регистрировать изменение температуры с высокой чувствительностью и малым временем отклика [19].

Однако для волоконной сенсорики ещё более важны NV-центры, поскольку именно они обеспечивают сочетание оптической адресности сенсора, спиновой управляемости и длительного времени когерентности [20]. Азотные центры вакансии или NV-центры представляют собой точечный дефект кристаллической решетки алмаза, образующийся в результате замещения атома углерода атомом азота одновременно с тем, что соседний атом углерода отсутствует [21]. Основное состояние NV-центра представляет собой спиновый триплет, который может быть инициализирован, управляем и считан с использованием оптических и микроволновых полей [22; 23]. Благодаря этому NV-центры применяются для измерения магнитных и электрических полей, температуры и давления в наноразмерных областях [24].

Для инженерной оценки важно, что достоинства NV-центров не исчерпываются высокой чувствительностью. Они также способны обеспечивать стабильное излучение одиночных фотонов и узкие оптические линии переходов, особенно при низких (криогенных) температурах [25; 26]. Это делает их одновременно и чувствительным элементом, и потенциальным элементом квантовой оптической схемы. Практические волоконные реализации уже включают возбуждение NV-центров через оптическое волокно и сбор флуоресценции в эндоскопических конфигурациях [17], интеграцию наноалмазов с фотонно-кристаллическими и коническими волокнами [27; 28], а также построение композитных волоконно-алмазных устройств для криогенных и сканирующих измерений [29; 30]. Тем не менее именно здесь проявляются и основные их ограничения: необходимость эффективного ввода-вывода излучения, сложность электронной обвязки, чувствительность к фоновому шуму и высокая технологическая требовательность к стабильной интеграции квантового центра с волоконной платформой.

Углеродные наноалмазы, прежде всего с NV-центрами, представляют собой одну из наиболее сильных платформ для локальных квантово-оптических измерений в составе волоконных датчиков. Их основное преимущество состоит в сочетании малой чувствительной области, высокой чувствительности и возможности оптического считывания через волокно. В то же время практическая реализация таких систем остаётся сложной из-за требований к возбуждению, сбору флуоресценции, микроволновому управлению и воспроизводимой интеграции квантовых центров в волоконную архитектуру.

Фотонные кристаллы

Фотонные кристаллы представляют собой периодические диэлектрические структуры, в которых пространственное распределение показателя преломления приводит к формированию фотонных запрещённых зон [31]. Под фотонной запрещённой зоной понимают интервал частот или длин волн, в пределах которого в периодической оптической среде отсутствуют разрешённые моды распространения излучения. С прикладной точки зрения это означает возможность управлять распространением света, локализовать излучение в дефектных модах и проектировать резонансные структуры с высокой добротностью. Для сенсорики такие свойства особенно важны, поскольку даже малое изменение геометрии, показателя преломления или условий заполнения структуры приводит к заметному спектральному отклику.

Наиболее существенное достоинство фотонных кристаллов заключается в том, что они позволяют реализовать не просто чувствительный элемент, а оптическую среду с заранее заданной спектральной функцией. Изменение параметров среды — например, при проникновении жидкости, набухании чувствительного слоя или вариации внешних условий — вызывает смещение положения запрещённой зоны или дефектной моды [31; 32]. Благодаря этому фотонные кристаллы рассматриваются как перспективная платформа для миниатюризированных сенсоров, в том числе химических и биохимических.

В зависимости от размерности выделяют одномерные, двумерные и трёхмерные фотонные кристаллы [33]. В одномерных фотонных кристаллах периодичность существует только в одном измерении, распространено и другое их название — брэгговские структуры или отражатели. Двумерные фотонные кристаллы обладают периодичностью в двух пространственных направлениях. Наиболее распространёнными являются трёхмерные кристаллы, поскольку методы их получения относительно просты и недороги.

Для волоконно-оптической сенсорики особый интерес представляют структуры, совместимые с волоконными и интегральными платформами, поскольку именно они открывают путь к созданию компактных резонаторов и фильтров с высоким коэффициентом добротности. Кроме того, фотонные кристаллы позволяют формировать локализованные дефектные состояния внутри запрещённой зоны, что важно для усиления взаимодействия света с квантовыми центрами или чувствительными слоями. В этом смысле, по сравнению с наноалмазами, фотонные кристаллы в меньшей степени выступают как самостоятельный квантовый чувствительный элемент, но в большей степени — как платформа управления модовой структурой, локализацией поля и усилением взаимодействия света с веществом.

Фотонные кристаллы особенно перспективны как платформа миниатюризации и спектрального усиления отклика в волоконных и гибридных сенсорных системах. Их преимущество связано с возможностью высокодобротной локализации света и точной настройки спектральных свойств. Ограничения определяются технологической сложностью изготовления, чувствительностью к геометрическим отклонениям и необходимостью точного согласования с волоконной архитектурой.

Квантовые точки

Квантовые точки представляют собой полупроводниковые наноструктуры, в которых носители заряда локализованы в ограниченном объёме, вследствие чего энергетический спектр приобретает дискретный характер. По этой причине квантовые точки нередко рассматривают как искусственные атомы с настраиваемыми оптическими и электронными свойствами [1]. Модификация поверхности квантовых точек с ядром-оболочкой представлена на Рисунке 5. Их высокая прикладная привлекательность связана с тем, что параметры излучения и поглощения могут регулироваться геометрическими размерами, составом и окружением наноструктуры [34]. Именно это делает квантовые точки востребованными в электронике, биомедицинской визуализации, биосенсорике, энергетике и квантовых технологиях [35].

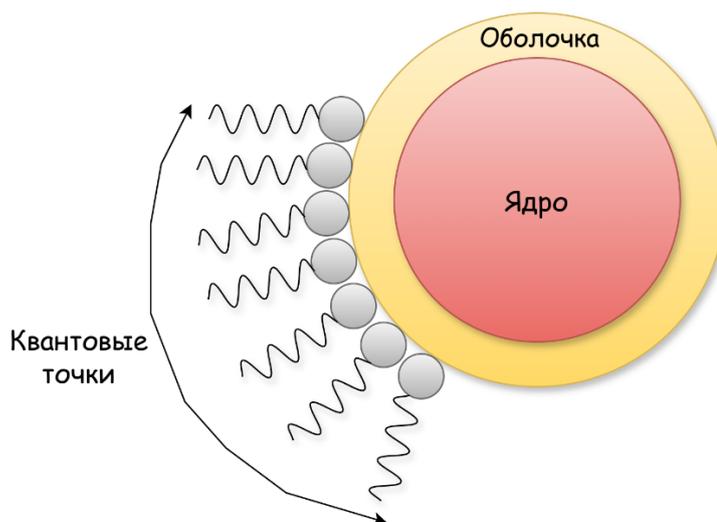


Рисунок 5. Модификация поверхности квантовых точек с ядром-оболочкой

Для сенсорных применений наиболее важны несколько свойств квантовых точек. Во-первых, выраженный размерный эффект позволяет управлять спектром люминесценции путем изменения размеров наноструктуры. Во-вторых, квантовые точки характеризуются высокой яркостью свечения, широким спектром поглощения, сравнительно узким спектром испускания и хорошей фотостабильностью [32]. В совокупности это делает их удобными как для спектрального кодирования сенсорного отклика, так и для формирования активных люминесцентных покрытий и нанокомпозитных чувствительных элементов. В отличие от алмазов с NV-центрами, где измерение часто связано со спиновыми и когерентными свойствами дефектного центра, в случае квантовых точек сенсорный эффект обычно реализуется через изменение спектра, интенсивности или динамики люминесценции под действием внешней среды.

С точки зрения волоконной сенсорики квантовые точки представляют интерес прежде всего, как функциональный материал, который может быть нанесён на торец волокна, встроен в полимерную матрицу или использован в составе композитной оптической структуры. Их сильная сторона заключается в технологической гибкости и возможности спектральной настройки. Вместе с тем при оценке их перспектив необходимо учитывать, что квантовые точки не всегда обеспечивают тот уровень метрологической стабильности и квантовой управляемости, который характерен для более специализированных платформ, таких как NV-центры. В структуре настоящего обзора квантовые точки рассматриваются как универсальная замена другим квантовым материалам и класс платформ, особенно полезный для оптической индикации, спектрального преобразования и построения гибридных люминесцентных чувствительных элементов.

Квантовые точки перспективны для волоконных сенсоров как технологически гибкий и спектрально настраиваемый функциональный материал. Их преимущества связаны с яркой люминесценцией, размерной управляемостью и удобством интеграции в композитные и торцевые структуры. Основные ограничения состоят в меньшей метрологической определённости по сравнению с NV-центрами, зависимости отклика от среды и необходимости обеспечить долговременную стабильность люминесцентных свойств.

Сопоставление рассмотренных платформ показывает, что они ориентированы на разные инженерные задачи. Наноалмазы с NV-центрами наиболее сильны там, где требуется высоколокальное и физически информативное измерение с оптическим считыванием. Фотонные кристаллы особенно важны для управления спектральной структурой поля и построения высокодобротных миниатюрных архитектур. Квантовые точки, в свою очередь,

удобны как настраиваемый люминесцентный материал для гибридных сенсорных конфигураций. Поэтому дальнейший анализ следует перенести от свойств материалов как таковых к тем волоконно-оптическим механизмам, через которые эти свойства преобразуются в измерительный отклик.

Волоконно-оптические реализации и физические механизмы сенсорного отклика

Перейдем от рассмотрения квантовых ресурсов измерений и физических платформ, к тем оптическим механизмам, посредством которых внешнее воздействие преобразуется в измеряемый сигнал в волоконной системе. В волоконно-оптической сенсорике такую роль играют как процессы рассеяния света в самом волокне, так и специальные режимы зондирования, основанные на квантовых состояниях света и на усилении локального взаимодействия поля с веществом. В этом смысле рассматриваемые механизмы можно условно разделить на две группы. Первая охватывает распределённые эффекты в волокне — рамановское, бриллюэновское и рэлеевское рассеяние, позволяющие извлекать информацию о состоянии среды вдоль протяжённого чувствительного элемента [36]. Вторая включает архитектуры, в которых чувствительность повышается за счёт квантовых или нанопотонных эффектов, прежде всего за счёт использования сжатого света и плазмонных структур. Такое разделение принципиально важно, поскольку в первом случае волокно само выступает распределённым чувствительным элементом, тогда как во втором — ключевой вклад в чувствительность вносит специально организованное состояние поля или локализованная электромагнитная мода.

Распределённые эффекты в волокне

Рамановское рассеяние

Спонтанное рамановское рассеяние представляет собой неупругий процесс взаимодействия света с колебательными или вращательными модами вещества, при котором происходит обмен энергией между падающим фотоном и внутренними степенями свободы среды [37]. В результате в спектре рассеянного излучения формируются стоксовы и антистоксовы компоненты, энергетическое соотношение между которыми определяется, в частности, температурным состоянием среды [38]. Именно это обстоятельство делает рамановское рассеяние одним из ключевых механизмов распределённого температурного мониторинга в оптическом волокне, Рисунок 6.

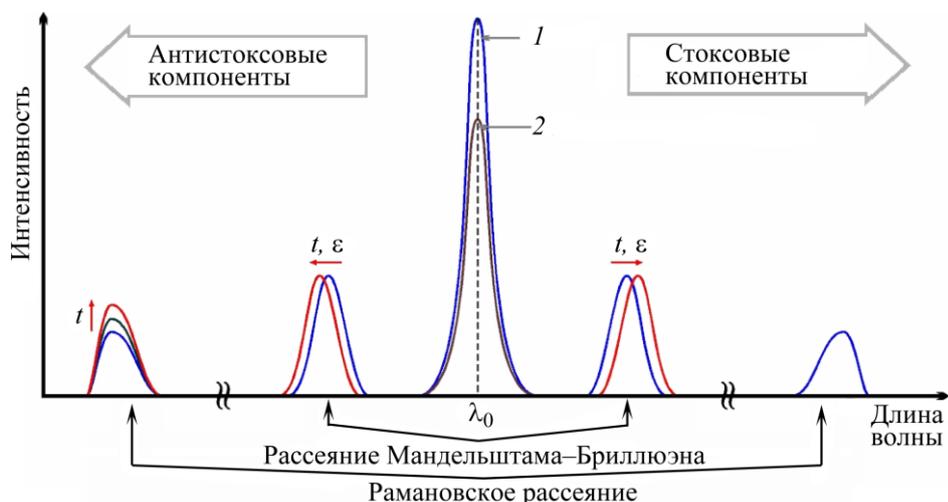


Рисунок 6. Спектры интенсивности Рамановского рассеяния и рассеяния Мандельштама - Бриллюэна [39]

Для волоконной сенсорики принципиально важно, что рамановский отклик естественным образом привязывается ко времени распространения импульса вдоль волокна. В распределённых рамановских датчиках температуры волокно одновременно выполняет функции линии передачи и распределённого чувствительного элемента, а температура восстанавливается по отношению интенсивностей антистоксовой и стоксовой либо антистоксовой и рэлеевской компонент [40]. Такая схема лежит в основе рамановской оптической рефлектометрии во временной области и обеспечивает возможность пространственно-разрешённого измерения температуры вдоль значительных длин волоконного тракта.

Отдельного внимания заслуживает поверхностно-усиленное рамановское рассеяние, в котором усиление локального электромагнитного поля вблизи металлических наноструктур позволяет резко повысить уровень сигнала от низкоконцентрированных аналитов [41]. В контексте настоящего обзора этот подход важен не столько как распределённый волоконный метод, сколько как пример перехода от «чисто волоконного» механизма к гибридной волоконно-нанооптической архитектуре, где чувствительность определяется уже не только свойствами волокна, но и локальной плазмонной средой. Кроме того, для задач повышения пространственного разрешения и устойчивости к шуму предлагаются специальные схемы рамановского зондирования, в том числе методы двойной корреляции хаоса [42], ориентированные на извлечение резких локальных изменений температуры.

Рамановское рассеяние наиболее естественно применять в волоконных распределённых датчиках температуры, где его главным достоинством является возможность пространственно-разрешённого мониторинга вдоль всего волокна [43]. Его сильная сторона — прямая температурная чувствительность антистоксовой компоненты. Основные ограничения связаны с относительно слабым сигналом, зависимостью точности от отношения сигнал/шум и необходимостью сложной обработки при высоком пространственном разрешении.

Бриллюэновское рассеяние

Бриллюэновское рассеяние представляет собой изменение частоты и направления распространения световой волны при её взаимодействии с акустическими колебаниями среды, то есть с периодическими вариациями плотности и показателя преломления [44]. В отличие от рамановского рассеяния, где взаимодействие происходит с внутримолекулярными колебаниями, в бриллюэновском процессе фотон взаимодействует с коллективными акустическими модами среды. Именно поэтому бриллюэновский частотный сдвиг существенно меньше рамановского, но при этом оказывается чувствительным к механическому состоянию волокна.

С практической точки зрения бриллюэновское рассеяние особенно ценно тем, что позволяет регистрировать не только температуру, но и деформацию. За счёт зависимости бриллюэновского частотного сдвига от механических и термических параметров среды этот эффект широко используется в распределённых системах мониторинга состояния протяжённых объектов. При этом применяются как спонтанные, так и вынужденные режимы бриллюэновского взаимодействия, выбор между которыми определяется требуемым пространственным разрешением, длиной линии и допустимой сложностью аппаратуры [45].

В рамках настоящего обзора бриллюэновское рассеяние важно в качестве примера механизма, который по сравнению с рамановским несёт более подробную информацию о механическом состоянии среды, но требует более сложной интерпретации результатов. Если рамановская схема в первую очередь ориентирована на температурный профиль, то бриллюэновская позволяет переходить к совместной оценке температуры и деформации, а в ряде случаев — к структурному мониторингу механически нагруженных объектов.

Бриллюэновское рассеяние является одним из наиболее значимых механизмов для распределённого измерения деформации и температуры в одном и том же волоконном

тракте. Его преимущество состоит в высокой информативности механического отклика. Ограничения связаны с меньшим частотным сдвигом по сравнению с рамановским рассеянием, необходимостью более точного спектрального анализа и взаимным влиянием температурной и деформационной составляющих.

Рэлеевское рассеяние

Рэлеевское рассеяние представляет собой упругое рассеяние света на случайных неоднородностях среды, не сопровождающееся изменением частоты фотона [46]. В оптическом волокне этот эффект обусловлен микроскопическими флуктуациями показателя преломления, возникающими в процессе изготовления материала. Несмотря на свой кажущийся отрицательный эффект, рэлеевское рассеяние лежит в основе ряда высокочувствительных распределённых сенсорных методов.

С инженерной точки зрения ценность рэлеевского рассеяния определяется тем, что оно формирует устойчивую пространственную интерференционную сигнатуру волокна, чувствительный к внешним возмущениям. На этой основе реализуются методы распределённого измерения температуры, статической и динамической деформации, а также акустических воздействий [47; 48]. В частности, когерентные схемы рефлектометрии позволяют отслеживать малые изменения фазы и амплитуды обратного сигнала, возникающие при локальном воздействии на волокно [49]. По сравнению с рамановским и бриллюэновским рассеянием, рэлеевские методы, как правило, обеспечивают более высокое пространственное разрешение, однако требуют существенно более строгих условий когерентности источника и стабильности интерферометрической обработки.

В контексте квантово-усиленной волоконной сенсорики рэлеевское рассеяние представляет интерес ещё и потому, что когерентные распределённые схемы потенциально совместимы с использованием неклассических состояний света, прежде всего тогда, когда требуется снизить шум фазового измерения или повысить чувствительность к малым динамическим возмущениям. Таким образом, рэлеевский механизм занимает промежуточное положение между классической распределённой рефлектометрией и более сложными квантово-когерентными архитектурами.

Рэлеевское рассеяние особенно перспективно для задач высокоразрешающего распределённого мониторинга деформаций, вибраций и акустических воздействий. Его сильная сторона — высокая чувствительность к локальным изменениям и возможность когерентного анализа. Ограничения связаны с требованиями к стабильности лазера, чувствительностью к фазовым шумам и усложнением обработки сигнала в протяжённых линиях.

Архитектуры, в которых чувствительность повышается за счёт квантовых или нанофотонных эффектов

Сжатый свет

В рамках волоконно-оптических реализаций сжатый свет следует рассматривать как способ снижения квантового шума в конкретных измерительных схемах. Его практическая ценность проявляется там, где точность измерения ограничивается флуктуациями одной из квадратур электромагнитного поля, прежде всего в интерферометрических и фазочувствительных конфигурациях [50; 51]. В таких системах использование сжатых состояний позволяет уменьшить шумовой порог регистрации и тем самым повысить чувствительность к малым изменениям оптической длины пути, фазового набега или внешнего возмущения [52].

Для волоконной сенсорики особенно важны два класса реализаций. Одномодовые сжатые состояния представляют интерес для классических интерферометрических схем, в которых необходимо минимизировать неопределённость оценки фазы [53]. Двухмодовые сжатые состояния, напротив, ориентированы на использование квантовых корреляций

между каналами и потому особенно перспективны в дифференциальных, корреляционных и многоканальных измерениях [54]. Такое различие имеет не только формальный, но и инженерный смысл: одномодовые схемы проще интегрируются в уже существующие волоконные интерферометры, тогда как двухмодовые требуют более сложной синхронизации и согласованного детектирования, но потенциально обеспечивают большую помехоустойчивость и точность [55].

Исторически одним из важных направлений применения сжатого света стали волоконно-оптические интерферометры и гироскопические системы [56]. Уже ранние работы показали возможность превышения стандартного квантового предела в волоконных интерферометрических конфигурациях [57]. Современные подходы расширяют этот круг задач за счёт интеграции с распределёнными квантовыми сенсорами, в том числе для повышения точности оценки угловой скорости и других параметров движения [58]. Однако именно в волоконной реализации наиболее явно проявляются ограничения сжатых состояний: потери, фазовая нестабильность, нелинейные эффекты и несовершенство детекторов быстро снижают наблюдаемый выигрыш.

Сжатый свет наиболее перспективен в волоконно-оптических интерферометрических датчиках и гироскопических системах, где чувствительность напрямую ограничивается квантовым шумом. Его ключевое достоинство состоит в возможности понизить шум измерения ниже стандартного квантового предела. Практическое применение, однако, требует минимизации потерь, высокой фазовой стабильности и точного согласования режима сжатия с архитектурой сенсора.

Плазмоны

Плазмонные структуры представляют собой особый класс платформ, в которых электромагнитное поле сильно локализуется на границе металл–диэлектрик за счёт возбуждения коллективных колебаний свободных носителей заряда [59]. В сенсорном отношении это важно потому, что локализация поля резко усиливает взаимодействие света с веществом вблизи поверхности, тем самым повышая чувствительность к малым изменениям показателя преломления, состава среды или наличия молекулярных объектов. Именно по этой причине плазмоника стала одной из ключевых технологических платформ для сверхчувствительных оптических сенсоров наноуровня [60].

В контексте настоящего обзора наибольший интерес представляет не классическая плазмоника как таковая, а квантовое плазмонное сенсорирование, где локализованные плазмонные моды сочетаются с неклассическими состояниями света [61; 62]. Такие схемы теоретически и экспериментально демонстрируют возможность достижения чувствительности, выходящей за пределы классических ограничений, в том числе при использовании состояний типа $N00N$ и других коррелированных квантовых состояний [52]. Для волоконной сенсорики это особенно важно, поскольку плазмонная структура может быть интегрирована с торцом волокна, с его боковой поверхностью или с промежуточным чувствительным слоем, образуя компактную гибридную архитектуру.

Одновременно плазмонные системы имеют и принципиальные ограничения. Усиление локального поля достигается ценой высоких омических потерь в металле, что ограничивает дальность распространения мод и ухудшает энергетическую эффективность [63–65]. Кроме того, высокая чувствительность к геометрии наноструктуры, стабильности покрытия и свойствам окружающей среды осложняет воспроизводимую реализацию сенсора. Поэтому плазмоника особенно перспективна в тех случаях, где требуется сверхлокальное взаимодействие и высокая поверхностная чувствительность, но менее естественна для классических протяжённых распределённых измерений.

Плазмонные структуры наиболее перспективны в гибридных волоконных сенсорах для локального высокочувствительного анализа поверхности и ближнего поля. Их главное достоинство связано с субволновой локализацией электромагнитного поля и возможностью

усиления взаимодействия света и вещества. Основные ограничения определяются высокими потерями в металле, технологической чувствительностью наноструктур и сложностью переноса лабораторных плазмонных схем в устойчивые волоконные устройства.

Сопоставление рассмотренных механизмов показывает, что они ориентированы на разные классы сенсорных задач. Рамановское, бриллюэновское и рэлеевское рассеяние образуют основу распределённой волоконной сенсорики, обеспечивая измерение температуры, деформации и динамических возмущений вдоль протяжённого волокна. Сжатый свет ориентирован преимущественно на повышение точности фазочувствительных и интерферометрических измерений. Плазмонные структуры, напротив, усиливают локальное взаимодействие света с веществом на наноуровне. Следовательно, выбор механизма отклика должен определяться не общими соображениями «квантового усиления», а конкретной архитектурой сенсора, типом измеряемой величины и допустимой сложностью системы.

Применение квантовых принципов для торцевых волоконных сенсоров

Квантовые источники, материалы и волоконно-оптические механизмы формируют физическую основу для создания сенсоров нового поколения. Важным этапом развития этих идей является их воплощение в компактных торцевых и гибридных волоконно-оптических структурах. В разделе уделено внимание решениям, развиваемым и исследуемым авторским коллективом — комбинированным сенсорам на основе интерферометра Фабри – Перо и адресных волоконных брэгговских решеток, которые демонстрируют высокий потенциал для биомедицинских и химических измерений.

Фабри-Перо интерферометр на торце оптического волокна

Волоконно-оптический торцевой Фабри – Перо интерферометр представляет собой многослойную структуру, сформированную на оптическом волокне, Рисунок 7. Основными конструктивными элементами являются оптическое волокно, резонатор (чувствительная область интерферометра), и биорецепторный слой (функциональное покрытие внешней поверхности резонатора, содержащий иммобилизованные молекулы-рецепторы) [66]. Технологии изготовления торцевых Фабри – Перо интерферометров постоянно совершенствуются, однако существуют распространённые, стандартные методы их формирования [67; 68].

В процессе диффузии аналита в функциональное покрытие происходит его связывание с молекулами-рецепторами, что меняет химические, и как следствие, физические свойства функционального покрытия, в частности это меняет его показатель преломления. Это, в свою очередь, приводит к изменению скорости распространения света и влечет за собой сдвиг интерференционного отклика.

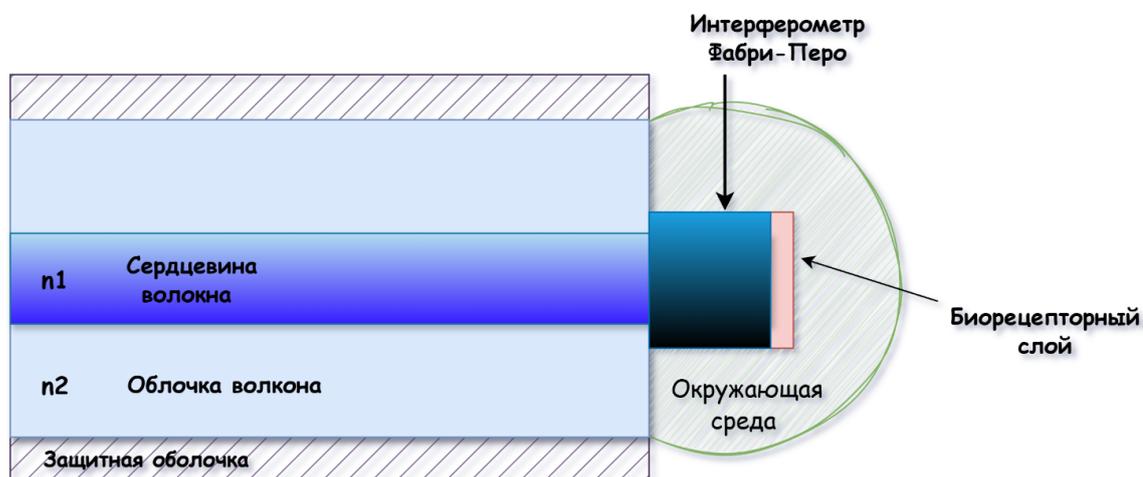


Рисунок 7. Торцевой интерферометр Фабри-Перо

К преимуществам торцевых волоконно-оптических биосенсоров Фабри – Перо стоит отнести их компактность, позволяющую проводить измерения в ограниченных объемах, включая отдельные клетки, микрососуды и микрофлюидные каналы, высокую чувствительность, быстрый отклик, устойчивость к электромагнитным помехам и возможность дистанционного зондирования. Однако существует и ряд ограничений, например, перекрестная чувствительность к температуре, которая может приводить к дрейфу интерференционной картины и маскировать биосенсорный сигнал.

Архитектура торцевого интерферометра Фабри – Перо открывает прямую возможность для применения сжатых состояний света. Поскольку чувствительность интерферометра к изменению показателя преломления ограничена дробовым шумом, ввод в схему опроса сжатого по фазе или по амплитуде света позволяет снизить этот порог. Более того, полость интерферометра может быть функционализирована не только классическими биорецепторными слоями, но и слоями, содержащими квантовые точки, люминесценция которых будет модулироваться аналитом и обеспечивать дополнительный канал высокочувствительного детектирования.

Адресная волоконная брэгговская решётка с вытравленным сегментом

Еще одной перспективной технологией для биосенсорного применения является волоконно-оптическая конструкция, сформированная на базе адресных волоконно-брэгговских решеток, у которой вытравлена оболочка одного из сегментов (Рисунок 8 Рисунок 8. Адресная волоконная брэгговская решётка с травленным сегментом) [69; 70]. Адресность решетки обеспечивается не только уникальной брэгговской длиной волны, но и разностной длиной волны двух спектрально узких включений, а вытравленный сегмент оболочки позволяет контролировать свойства внешней среды за счет проникновения в него эванесцентного поля. Вытравленный участок тоже может быть покрыт специально подобранным биорецепторным слоем, который усиливает влияние тех или иных процессов.

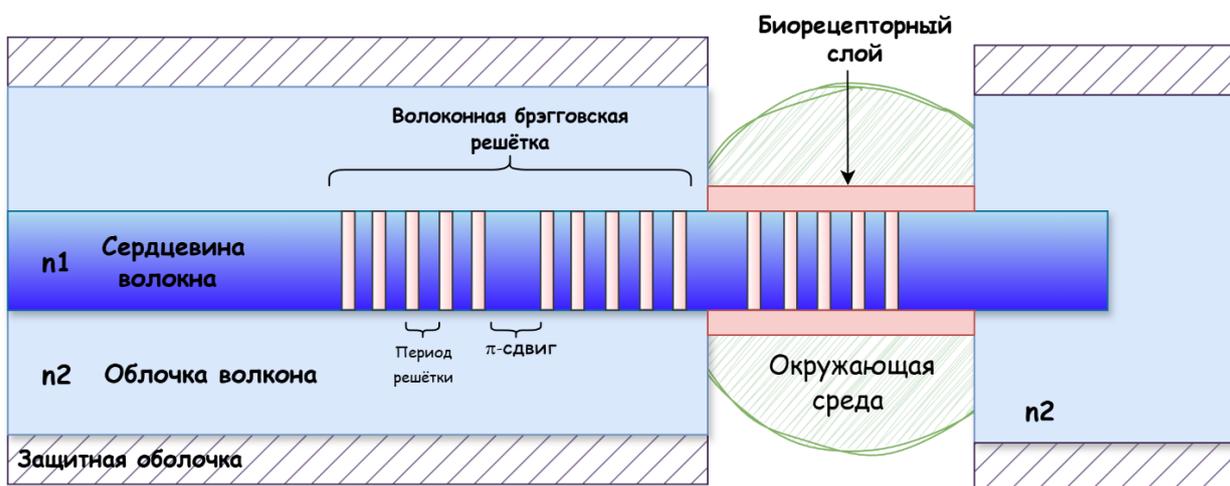


Рисунок 8. Адресная волоконная брэгговская решётка с травленным сегментом

Принцип функционирования сенсора основан на измерении сдвига адресной частоты в ответ на изменение показателя преломления окружающей среды, вызванное связыванием аналита с биологически функциональным материалом. Чувствительность таких биосенсоров зависит от остаточного диаметра волокна после травления. С уменьшением диаметра происходит увеличение доли мощности моды, распространяющейся в эванесцентной области, но это, одновременно, ведет к снижению механической прочности сенсора. К ключевым преимуществам относят высокую чувствительность, адресность в радиочастотной области, возможность работы в отраженном режиме с малыми объемами образцов, а также

большую гибкость в выборе биорецепторных молекул. Основные ограничения, в свою очередь, связаны с механической хрупкостью травленных сегментов, чувствительностью к температурным флуктуациям и проблемой неспецифической адсорбции.

Ключевая особенность архитектуры — наличие эванесцентного поля в вытравленном сегменте, создающая уникальные возможности для интеграции квантовых материалов. Эванесцентное поле позволяет эффективно возбуждать и считывать сигнал от квантовых точек или NV-центров в наноалмазах, нанесенных на поверхность волокна в этом сегменте. Изменение показателя преломления и наличие специфических молекул при связывании аналита влияет не только на условия распространения моды, но и на интенсивность или спектр люминесценции квантовых эмиттеров. Адресность ВБР, в свою очередь, позволяет легко мультиплексировать несколько сенсорных точек с разными рецепторными слоями в одном волокне, что создает основу для многопараметрического квантово-усиленного анализа.

Комбинированный биосенсор

В последние годы активно развивается направление гибридных сенсорных структур, объединяющих в едином волоконно-оптическом элементе Фабри – Перо интерферометр и волоконно-брэгговскую решетку (Рисунок 9), что открывает дополнительные возможности для детектирования [71]. Биологическое детектирование в гибридной структуре может быть реализовано двумя основными способами, такими как по изменению показателя преломления в полости интерферометра с контролем температуры по центральной длине волны брэгговской решетки и по изменению показателя преломления функционального биорецепторного слоя. Связывание аналита с рецепторами, иммобилизованными на торце волокна, изменяет показатель преломления, что меняет частотное смещение спектра отражения.

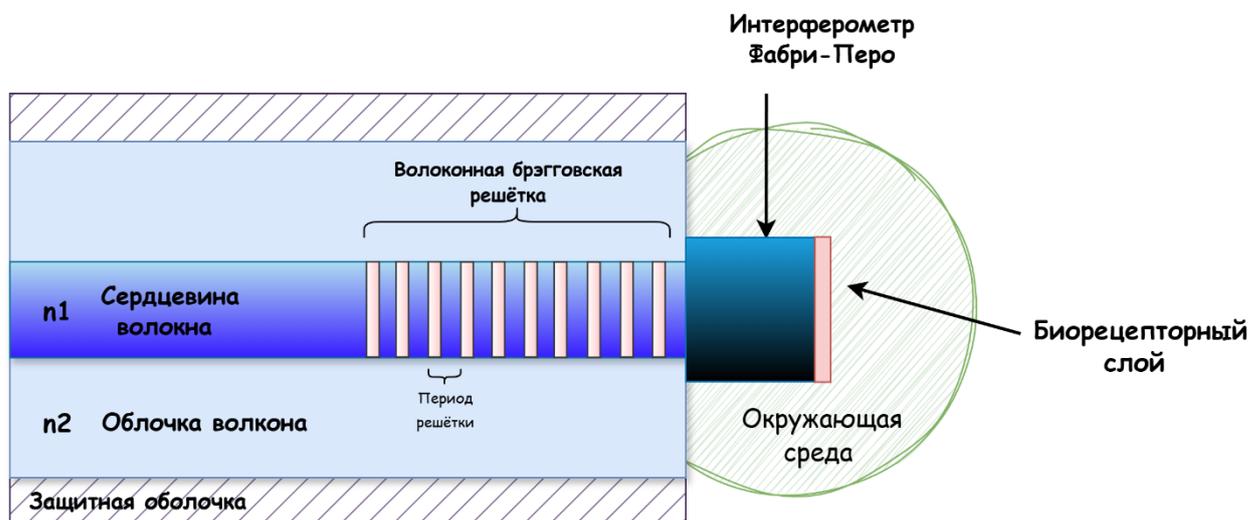


Рисунок 9. Комбинированный торцевой биосенсор с интерферометром Фабри – Перо и ВБР

К преимуществам гибридной архитектуры стоит отнести повышенную чувствительность, высокую добротность резонанса типа Фано [72] и эффективную отражательную способность. Однако существует и ряд недостатков, например, сложность и стоимость изготовления, ограниченная механическая прочность и динамический диапазон.

Квантовые технологии в торцевых биосенсорах

В контексте торцевых волоконно-оптических биосенсоров квантовые технологии представляют интерес как средство повышения чувствительности, расширения функциональности и реализации новых механизмов преобразования сигнала. Наиболее естествен-

ными направлениями интеграции являются использование сжатых состояний света в интерферометрических схемах, применение однофотонных детекторов в режимах регистрации слабых оптических откликов, а также введение квантовых точек и других квантово-чувствительных элементов в состав рецепторного или промежуточного функционального слоя. В отличие от классических подходов, где информативный отклик, как правило, сводится к изменению показателя преломления, оптической толщины или условий интерференции, квантово-усиленные архитектуры потенциально позволяют использовать дополнительные каналы чувствительности, связанные со статистикой света, дискретностью переходов и квантово-размерными эффектами.

Фундаментальное ограничение чувствительности классических интерферометрических измерений определяется дробовым шумом фотонов. В этой связи применение сжатых состояний света в торцевых Фабри – Перо интерферометрах представляет интерес как прямой путь к снижению шумового порога регистрации спектральных или фазовых сдвигов. Одновременно квантовые точки в составе биорецепторного слоя могут выполнять несколько различных функций. Они могут выступать в роли маркеров, аналогичных флуоресцентным меткам, но обладающих более высокой фотостабильностью и спектральной настраиваемостью, могут служить активной частью рецепторного слоя, в которой связывание аналита изменяет интенсивность или спектр люминесценции за счёт переноса энергии и модификации локального окружения. Кроме того, они могут использоваться как источники однофотонных состояний в специализированных квантовых сенсорных схемах. В более общем плане квантовые эффекты, включая туннелирование, интерференцию вероятностей и квантовое ограничение, могут рассматриваться как физическая основа механизмов детектирования, не сводящихся к классическому измерению показателя преломления.

Дополнительный интерес представляет возможность использования квантовых переходов в атомных системах и квантовых точках как реперных состояний, задающих естественную шкалу калибровки, связанную с фундаментальными физическими константами. В потенциально реализуемых торцевых сенсорах это может способствовать повышению воспроизводимости, долговременной стабильности и помехоустойчивости измерений. Вместе с тем практическая ценность таких решений определяется не только самим наличием квантового ресурса, но и возможностью его устойчивой интеграции в торцевую волоконную архитектуру. Поэтому дальнейшее развитие данного направления будет связано прежде всего с совершенствованием технологий формирования торцевых структур с контролируемыми параметрами на наноуровне, разработкой методов стабильной и селективной функционализации поверхности, а также миниатюризацией квантовых компонентов и их согласованием с реальными схемами возбуждения и считывания.

Комбинированная структура Фабри – Перо и ВБР представляет собой наиболее полную платформу для реализации гибридных квантово-классических сенсоров. В ней возможно разделение функций: ВБР может служить для прецизионного измерения температуры и для адресации, в то время как интерферометр Фабри – Перо выступает в роли высокочувствительного элемента, в котором используются сжатый свет или квантовые эмиттеры. К тому же сама полость может быть сформирована с использованием фотонно-кристаллических структур, позволяющих дополнительно управлять ее модовым составом и добротностью, усиливая взаимодействие света как с аналитом, так и с внедренными квантовыми центрами.

Обсуждение

Проведённый анализ демонстрирует, что объединение квантовых подходов и волоконно-оптической сенсорики не образует единой технологической линии, а представляет

собой набор специализированных инструментов. Ключевой вывод для прикладного применения заключается в том, что выбор конкретного квантового ресурса должен основываться на его совместимости и эффективности в рамках конкретной волоконной архитектуры и измерительной задачи. Так, для интерферометра Фабри – Перо на торце волокна наиболее естественным и технологически подготовленным путём квантового усиления является использование сжатых состояний света в схеме опроса. Для адресных ВБР с травленным сегментом ключевую роль играет интеграция люминесцентных квантовых точек или NV-центров непосредственно в область действия эванесцентного поля, превращающего классический датчик в гибридный люминесцентный сенсор с дополнительным каналом регистрации. Комбинированная структура предоставляет уникальную возможность объединения нескольких квантовых ресурсов одновременно — например, использование сжатого света для повышения точности интерферометрических измерений в полости и применение квантовых эмиттеров в функциональном покрытии для селективного биохимического анализа.

Так, для интерферометра Фабри--Перо на торце волокна (раздел 5.1) наиболее естественным и технологически подготовленным путём квантового усиления является использование сжатых состояний света в схеме опроса для подавления дробового шума. Для адресных ВБР с травленным сегментом (раздел 5.2) ключевую роль играет интеграция люминесцентных квантовых точек или NV-центров непосредственно в область действия эванесцентного поля, что превращает классический рефрактометрический датчик в гибридный люминесцентный сенсор с дополнительным каналом регистрации. Комбинированная структура (раздел 5.3) предоставляет уникальную возможность синергии нескольких квантовых ресурсов одновременно — например, использование сжатого света для повышения точности интерферометрических измерений в полости и применение квантовых эмиттеров в функциональном покрытии для селективного биохимического анализа. Таким образом, представленные авторские разработки выступают не просто примерами волоконных датчиков, а являются конкретной технологической основой, задающей векторы и условия для внедрения рассмотренных квантовых принципов в реальную сенсорную практику.

С точки зрения инженерной применимости наиболее перспективными остаются распределённые методы, основанные на рамановском, бриллюэновском и рэлеевском рассеянии. Их преимущество состоит в том, что они используют само оптическое волокно как чувствительный элемент и не требуют радикального изменения базовой архитектуры сенсорной системы. В этой группе рамановские схемы наиболее естественно ориентированы на распределённый температурный мониторинг, бриллюэновские — на совместное измерение температуры и деформации, а рэлеевские — на высокоразрешающий контроль локальных механических и акустических воздействий. Однако эти подходы, несмотря на технологическую готовность, остаются преимущественно классическими. Их связь с квантовой сенсорикой проявляется скорее в потенциальной совместимости с квантово-оптическими методами снижения шума и повышения точности, чем в обязательном использовании квантовых ресурсов в базовой конфигурации.

Иная ситуация наблюдается в случае сжатого света. В отличие от распределённых схем на рассеянии, здесь квантовый ресурс присутствует в самом принципе измерения: снижение дисперсии одной из квадратур ниже стандартного квантового предела позволяет уменьшить шумовую составляющую оценки фазы или оптической длины пути. С теоретической и экспериментальной точек зрения это делает сжатый свет одним из наиболее прямых путей к квантовому улучшению волоконно-оптических измерений. Вместе с тем именно здесь наиболее резко проявляется разрыв между лабораторной демонстрацией и прикладным внедрением. Даже умеренные потери в волоконном тракте, нестабильность фазы, паразитные нелинейные эффекты и ограничения детекторов быстро снижают наблюдаемый эффект. Следовательно, практическая ценность сжатого света определяется не

только достигнутой степени сжатия, но и способностью конкретной сенсорной архитектуры сохранить этот ресурс вплоть до этапа регистрации.

Особое место занимают локальные квантовые платформы, прежде всего углеродные наноалмазы с NV-центрами. По сравнению с распределёнными волоконными методами они ориентированы не на мониторинг протяжённого объекта, а на высоколокальные измерения в малом объёме. Их главное достоинство состоит в сочетании субмиллиметровой или даже микрометровой локализации чувствительной области, оптической адресуемости и чувствительности к широкому набору физических величин — температуре, деформации, электрическим и магнитным полям. Именно поэтому NV-центры представляются особенно интересными для биомедицинских и микрообъектных приложений, где классические волоконные датчики часто ограничены размерами чувствительного элемента или недостаточной локальностью отклика. Однако высокая информативность таких платформ достигается ценой существенного усложнения системы, где требуются эффективное возбуждение, сбор флуоресценции, в ряде случаев микроволновое управление, а также воспроизводимая интеграция наноалмаза с торцом или микроструктурой волокна.

Фотонные кристаллы и квантовые точки занимают промежуточное положение. Они не всегда обеспечивают «квантовый выигрыш» в строгом метрологическом смысле, однако существенно расширяют инструментальную базу волоконной сенсорики. Фотонные кристаллы особенно важны как средство управления спектральной структурой поля, локализации мод и повышения добротности чувствительных элементов. Квантовые точки, напротив, привлекательны прежде всего, как спектрально настраиваемый люминесцентный функциональный материал, удобный для гибридных и торцевых конфигураций. По сравнению с NV-центрами эти платформы, как правило, технологически более гибки, но метрологически менее определены, если рассматривать их именно в контексте квантового зондирования. Поэтому их роль в рассматриваемой области целесообразно трактовать не как самостоятельную реализацию квантовой сенсорики, а как средство усиления, спектрального преобразования или функционализации волоконного чувствительного элемента.

Плазмонные структуры также требуют отдельной интерпретации. Их высокая привлекательность связана с субволновой локализацией поля и, как следствие, с возможностью резко усилить свет–вещественное взаимодействие вблизи поверхности. Это особенно важно для химических и биосенсорных применений, где измеряемый эффект формируется в тонком поверхностном слое. Однако плазмонные решения по своей природе плохо масштабируются на протяжённые распределённые измерения и сопряжены с фундаментальными потерями в металле. Если ввести в такую систему неклассические состояния света, теоретически возможно получение дополнительного метрологического выигрыша, однако на практике возникает жёсткий компромисс между усилением локального поля и деградацией квантового состояния вследствие потерь. По этой причине плазмонно-квантовые волоконные сенсоры представляются особенно перспективными для локальных высокочувствительных анализаторов, но пока менее убедительными как основа универсальных прикладных систем.

Таким образом, рассмотренные подходы различаются не только по физике, но и по уровню технологической готовности. Наиболее близкими к реальному внедрению выглядят распределённые волоконные методы на рассеянии, а также отдельные интерферометрические схемы, в которых можно интегрировать элементы квантового улучшения без полного пересмотра архитектуры. Напротив, системы на NV-центрах, плазмонно-квантовые конфигурации и ряд гибридных нанофотонных платформ демонстрируют высокий научный потенциал, но пока требуют значительной доработки с точки зрения воспроизводимости, стабильности и совместимости с реальными условиями эксплуатации.

Из этого следует и более общий вывод. Перспективность квантовых принципов в волоконной сенсорике определяется не абстрактным фактом использования квантового состояния или квантового материала, а способностью конкретной архитектуры обеспечить выигрыш в измерении при приемлемой аппаратурной и технологической сложности. Поэтому ключевая исследовательская задача на данном этапе заключается не только в поиске всё более чувствительных квантовых эффектов, но и в разработке инженерно-устойчивых схем их сопряжения с волоконной платформой. Именно этот переход — от демонстрации физического эффекта к воспроизводимой сенсорной системе — представляется основным критерием зрелости направления.

Заключение

Квантовые принципы в волоконно-оптической сенсорике целесообразно рассматривать как набор специализированных ресурсов, а не как универсальную альтернативу классическим методам. Наиболее конструктивная систематика строится по цепочке «квантовые ресурсы (состояния света/квантовые степени свободы) — физические платформы (материалы и структуры) — волоконно-оптические механизмы преобразования воздействия в сигнал». В такой постановке становится ясно, что один и тот же квантовый эффект может иметь принципиально разную инженерную ценность в зависимости от архитектуры сенсора и тракта считывания.

Наиболее инженерно-перспективным направлением остаются распределённые волоконные методы, основанные на рамановском, бриллюэновском и рэлеевском рассеянии, поскольку они используют волокно как распределённый чувствительный элемент и масштабируются на протяжённые объекты. Их потенциал квантового улучшения заключается прежде всего в совместимости с когерентными схемами регистрации и в возможности дальнейшего снижения шумового порога измерения, однако базовые реализации в основном остаются в рамках классической сенсорики и ограничиваются уровнем сигнал/шум, стабильностью источника и сложностью обработки.

Наиболее прямой путь к квантовому повышению чувствительности волоконных измерений связан с использованием неклассических состояний света, прежде всего сжатого света, в фазочувствительных и интерферометрических схемах. Эти подходы принципиально позволяют снижать квантовый шум и приближаться к режимам, недостижимым для классического зондирования, но практическая реализация строго ограничивается потерями, фазовой нестабильностью и несовершенством детекторов. Следовательно, реальный эффект определяется не только степенью квантовости источника, но и тем, насколько архитектура сенсора сохраняет этот ресурс до этапа регистрации.

Локальные квантовые платформы (прежде всего наноалмазы с NV-центрами), а также гибридные нанофотонные решения (фотонные кристаллы, квантовые точки, плазмонные структуры) расширяют функциональные возможности волоконных сенсоров, особенно в задачах высоколокального контроля и поверхностной чувствительности. Однако их внедрение в практические системы сдерживается технологической воспроизводимостью интеграции, требованиями к возбуждению/считыванию и устойчивостью характеристик в реальных условиях. Поэтому в ближайшей перспективе наиболее реалистична стратегия поэтапного встраивания квантовых ресурсов и квантово-чувствительных материалов в уже существующие волоконно-оптические архитектуры с приоритетом инженерной устойчивости и метрологической воспроизводимости.

Благодарности

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Список литературы

1. Exploring Quantum Sensing Potential for Systems Applications / B. Kantsepolsky, I. Aviv, R. Weitzfeld, E. Bordo // IEEE Access. – 2023. – Т. 11. – С. 31569-31582.
2. The quantum technologies roadmap: a European community view / A. Acín, I. Bloch, H. Buhrman, T. Calarco, C. Eichler, J. Eisert, D. Esteve, N. Gisin, S.J. Glaser, F. Jelezko, S. Kuhr, M. Lewenstein, M.F. Riedel, P.O. Schmidt, R. Thew, A. Wallraff, I. Walmsley, F.K. Wilhelm // New Journal of Physics. – 2018. – Т. 20. – The quantum technologies roadmap. – № 8. – С. 080201.
3. Quantum Computing and Simulations for Energy Applications: Review and Perspective / H.P. Paudel, M. Syamlal, S.E. Crawford, Y.-L. Lee, R.A. Shugayev, P. Lu, P.R. Ohodnicki, D. Molloy, Y. Duan // ACS Engineering Au. – 2022. – Vol. 2. – Quantum Computing and Simulations for Energy Applications. – № 3. – P. 151-196.
4. Criticality-Enhanced Quantum Sensing via Continuous Measurement / T. Ilias, D. Yang, S.F. Huelga, M.B. Plenio // PRX Quantum. – 2022. – Vol. 3. – № 1. – P. 010354.
5. Quantum Systems for Enhanced High Energy Particle Physics Detectors / M. Doser, E. Auffray, F.M. Brunbauer, I. Frank, H. Hillemanns, G. Orlandini, G. Kornakov // Frontiers in Physics. – 2022. – Т. 10. – С. 887738.
6. Review of Optical Humidity Sensors / X. Rao, L. Zhao, L. Xu, Y. Wang, K. Liu, Y. Wang, G.Y. Chen, T. Liu, Y. Wang // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 23. – P. 8049.
7. Degen C.L. Quantum sensing / C.L. Degen, F. Reinhard, P. Cappellaro // Reviews of Modern Physics. – 2017. – Vol. 89. – № 3. – P. 035002.
8. Quantum Sensing for Energy Applications: Review and Perspective / S.E. Crawford, R.A. Shugayev, H.P. Paudel, P. Lu, M. Syamlal, P.R. Ohodnicki, B. Chorpeneing, R. Gentry, Y. Duan // Advanced Quantum Technologies. – 2021. – Vol. 4. – Quantum Sensing for Energy Applications. – № 8. – P. 2100049.
9. Advances in Photonic Quantum Sensing / S. Pirandola, B.R. Bardhan, T. Gehring, C. Weedbrook, S. Lloyd. – 2018.
10. Chakraborty C. Advances in quantum light emission from 2D materials / C. Chakraborty, N. Vamivakas, D. Englund // Nanophotonics. – 2019. – Vol. 8. – № 11. – P. 2017-2032.
11. DiVincenzo D.P. The Physical Implementation of Quantum Computation / D.P. DiVincenzo // Fortschritte der Physik. – 2000. – Т. 48. – № 9-11. – С. 771-783.
12. Roadmap on quantum light spectroscopy / S. Mukamel, M. Freyberger, W. Schleich, M. Bellini, A. Zavatta, G. Leuchs, C. Silberhorn, R.W. Boyd, L.L. Sánchez-Soto, A. Stefanov, M. Barbieri, A. Paterova, L. Krivitsky, S. Shwartz, K. Tamasaku, K. Dorfman, F. Schlawin, V. Sandoghdar, M. Raymer, A. Marcus, O. Varnavski, T. Goodson, Z.-Y. Zhou, B.-S. Shi, S. Asban, M. Scully, G. Agarwal, T. Peng, A.V. Sokolov, Z.-D. Zhang, M.S. Zubairy, I.A. Vartanyants, E. Del Valle, F. Laussy // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2020. – Т. 53. – № 7. – С. 072002.
13. Tin-vacancy in diamonds for luminescent thermometry / M. Alkahtani, I. Cojocaru, X. Liu, T. Herzig, J. Meijer, J. Küpper, T. Lühmann, A.V. Akimov, P.R. Hemmer // Applied Physics Letters. – 2018. – Vol. 112. – № 24. – P. 241902.

14. Trusheim M.E. Wide-field strain imaging with preferentially aligned nitrogen-vacancy centers in polycrystalline diamond / M.E. Trusheim, D. Englund // *New Journal of Physics*. – 2016. – Т. 18. – № 12. – С. 123023.
15. Monitoring spin coherence of single nitrogen-vacancy centers in nanodiamonds during pH changes in aqueous buffer solutions / M. Fujiwara, R. Tsukahara, Y. Sera, H. Yukawa, Y. Baba, S. Shikata, H. Hashimoto. – 2018.
16. Sensing electric fields using single diamond spins / F. Dolde, H. Fedder, M.W. Doherty, T. Nöbauer, F. Rempp, G. Balasubramanian, T. Wolf, F. Reinhard, L.C.L. Hollenberg, F. Jelezko, J. Wrachtrup. – 2011.
17. Efficient nitrogen-vacancy centers' fluorescence excitation and collection from micrometer-sized diamond by a tapered optical fiber in endoscope-type configuration / D. Duan, G.X. Du, V.K. Kavatamane, S. Arumugam, Y.-K. Tzeng, H.-C. Chang, G. Balasubramanian // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27. – № 5. – P. 6734.
18. Group-III quantum defects in diamond are stable spin-1 color centers / I. Harris, C.J. Ciccarino, J. Flick, D.R. Englund, P. Narang // *Physical Review B*. – 2020. – Vol. 102. – № 19. – P. 195206.
19. Ultrasensitive All-Optical Thermometry Using Nanodiamonds with a High Concentration of Silicon-Vacancy Centers and Multiparametric Data Analysis / S. Choi, V.N. Agafonov, V.A. Davydov, T. Plakhotnik // *ACS Photonics*. – 2019. – Vol. 6. – № 6. – P. 1387-1392.
20. Jelezko F. Single defect centres in diamond: A review / F. Jelezko, J. Wrachtrup // *physica status solidi (a)*. – 2006. – Vol. 203. – Single defect centres in diamond. – № 13. – P. 3207-3225.
21. A review of the study of diamond NV color centers: fabrication, application and challenge / Y. Li, H. Li, T. Yi, C. Li, J. Wei // *Functional Diamond*. – 2025. – Vol. 5. – A review of the study of diamond NV color centers. – № 1. – P. 2567286.
22. Strong magnetic coupling between an electronic spin qubit and a mechanical resonator / P. Rabl, P. Cappellaro, M.V.G. Dutt, L. Jiang, J.R. Maze, M.D. Lukin // *Physical Review B*. – 2009. – Vol. 79. – № 4. – P. 041302.
23. All-fiber quantum relaxometry for biochemical sensing based on diamond NV centers / H. Cheng, Y. Luo, X. Luo, C. Xue, Y. Li, G. Liu, L. Chen, Z. Chen, Y. Chen // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32. – № 17. – P. 29265.
24. Efficient Electrical Spin Readout of NV – Centers in Diamond / F.M. Hrubesch, G. Braunbeck, M. Stutzmann, F. Reinhard, M.S. Brandt // *Physical Review Letters*. – 2017. – Vol. 118. – № 3. – P. 037601.
25. Three-Dimensional Stimulated Emission Depletion Microscopy of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond Using Continuous-Wave Light / K.Y. Han, K.I. Willig, E. Rittweger, F. Jelezko, C. Eggeling, S.W. Hell // *Nano Letters*. – 2009. – Vol. 9. – № 9. – P. 3323-3329.
26. Coherent Optical Transitions in Implanted Nitrogen Vacancy Centers / Y. Chu, N.P. De Leon, B.J. Shields, B. Hausmann, R. Evans, E. Togan, M.J. Burek, M. Markham, A. Stacey, A.S. Zibrov, A. Yacoby, D.J. Twitchen, M. Loncar, H. Park, P. Maletinsky, M.D. Lukin // *Nano Letters*. – 2014. – Vol. 14. – № 4. – P. 1982-1986.
27. Fiber-Integrated Diamond-Based Single Photon Source / T. Schröder, A.W. Schell, G. Kewes, T. Aichele, O. Benson // *Nano Letters*. – 2011. – Vol. 11. – № 1. – P. 198-202.
28. Guided-wave-coupled nitrogen vacancies in nanodiamond-doped photonic-crystal fibers / I.V. Fedotov, N.A. Safronov, Yu.A. Shandarov, A.A. Lanin, A.B. Fedotov, S.Ya. Kilin, K. Sakoda, M.O. Scully, A.M. Zheltikov // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 101. – № 3. – P. 031106.
29. Fiber-Coupled Diamond Micro-Waveguides toward an Efficient Quantum Interface for Spin Defect Centers / M. Fujiwara, O. Neitzke, T. Schröder, A.W. Schell, J. Wolters, J.

- Zheng, S. Mouradian, M. Almoktar, S. Takeuchi, D. Englund, O. Benson // *ACS Omega*. – 2017. – Vol. 2. – № 10. – P. 7194-7202.
30. A Fiber-Coupled Scanning Magnetometer with Nitrogen-Vacancy Spins in a Diamond Nanobeam / Y. Li, F.A. Gerritsma, S. Kurdi, N. Codreanu, S. Gröblacher, R. Hanson, R. Norte, T. Van Der Sar // *ACS Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – № 6. – P. 1859-1865.
 31. Kazmirczak P.C. Ammonium fluoride-catalyzed sol-gel route for curcumin encapsulation: potential application for pH sensor development / P.C. Kazmirczak, M.C. Cichero, J.H.Z. Dos Santos // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. – 2025. – Vol. 114. – Ammonium fluoride-catalyzed sol-gel route for curcumin encapsulation. – № 3. – P. 731-741.
 32. Core-shell quantum dots: Properties and applications / D. Vasudevan, R.R. Gaddam, A. Trinchi, I. Cole // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 636. – Core-shell quantum dots. – P. 395-404.
 33. Steinegger A. Optical Sensing and Imaging of pH Values: Spectroscopies, Materials, and Applications / A. Steinegger, O.S. Wolfbeis, S.M. Borisov // *Chemical Reviews*. – 2020. – Т. 120. – № 22. – С. 12357-12489.
 34. Bailey R.E. Quantum dots in biology and medicine / R.E. Bailey, A.M. Smith, S. Nie // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2004. – Vol. 25. – № 1. – P. 1-12.
 35. Biological applications of quantum dots / T. Jamieson, R. Bakhshi, D. Petrova, R. Pocock, M. Imani, A.M. Seifalian // *Biomaterials*. – 2007. – Vol. 28. – № 31. – P. 4717-4732.
 36. Raman-based distributed temperature sensor with 1 m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding / M.A. Soto, T. Nannipieri, A. Signorini, A. Lazzeri, F. Baronti, R. Roncella, G. Bolognini, F. Di Pasquale // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36. – № 13. – P. 2557.
 37. Farahani M.A. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing / M.A. Farahani, T. Gogolla // *Journal of Lightwave Technology*. – 1999. – Т. 17. – № 8. – С. 1379-1391.
 38. Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering / D. Hwang, D.-J. Yoon, I.-B. Kwon, D.-C. Seo, Y. Chung // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – № 10. – P. 9747.
 39. Hussein S.M.R.H. Light and measurements : in 2 т. Т. 1 / S.M.R.H. Hussein, A.Zh. Sakhabutdinov. – Karbala, Iraq: Al Thaer Al Asami Publishing House, 2022. – Вып. 1. – 141 с.
 40. Long D.A. The Raman effect: a unified treatment of the theory of Raman scattering by molecules. The Raman effect / D.A. Long. – Chichester New York: Wiley, 2002. – 1 с.
 41. SERS: Materials, applications, and the future / B. Sharma, R.R. Frontiera, A.-I. Henry, E. Ringe, R.P. Van Duyne // *Materials Today*. – 2012. – Vol. 15. – SERS. – № 1-2. – P. 16-25.
 42. Chaos Raman distributed optical fiber sensing / C. Wang, J. Li, X. Zhou, Z. Cheng, L. Qiao, X. Xue, M. Zhang // *Light: Science & Applications*. – 2023. – Vol. 12. – № 1. – P. 213.
 43. A review: Research progress of SERS-based sensors for agricultural applications / C. Liu, D. Xu, X. Dong, Q. Huang // *Trends in Food Science & Technology*. – 2022. – Vol. 128. – A review. – P. 90-101.
 44. Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre / J.-C. Beugnot, S. Lebrun, G. Pauliat, H. Maillotte, V. Laude, T. Sylvestre // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – № 1. – P. 5242.
 45. Kobayakov A. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers / A. Kobayakov, M. Sauer, D. Chowdhury // *Advances in Optics and Photonics*. – 2010. – Vol. 2. – № 1. – P. 1.

46. Bao X. Recent Advancements in Rayleigh Scattering-Based Distributed Fiber Sensors / X. Bao, Y. Wang // *Advanced Devices & Instrumentation*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 2021/8696571.
47. Nakazawa M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers / M. Nakazawa // *Journal of the Optical Society of America*. – 1983. – Vol. 73. – № 9. – P. 1175.
48. Rayleigh-Based Distributed Optical Fiber Sensing / L. Palmieri, L. Schenato, M. Santagiustina, A. Galtarossa // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – № 18. – P. 6811.
49. A hybrid distributed optical fiber vibration and temperature sensor based on optical Rayleigh and Raman scattering / L. Lu, M. Yong, Q. Wang, X. Bu, Q. Gao // *Optics Communications*. – 2023. – Vol. 529. – P. 129096.
50. Towards arbitrary time-frequency mode squeezing with self-conjugated mode squeezing in fiber / H. Liu, M.L. Iu, N. Hamdash, A.S. Helmy // *Nature Communications*. – 2025. – Vol. 16. – № 1. – P. 6524.
51. Giovannetti V. Advances in quantum metrology / V. Giovannetti, S. Lloyd, L. Maccone // *Nature Photonics*. – 2011. – Vol. 5. – № 4. – P. 222-229.
52. Berry D.W. Adaptive phase measurements for narrowband squeezed beams / D.W. Berry, H.M. Wiseman // *Physical Review A*. – 2006. – Vol. 73. – № 6. – P. 063824.
53. Kupriyanov D.V. Optical detection of magnetic resonance by classical and squeezed light / D.V. Kupriyanov, I.M. Sokolov // *Quantum Optics: Journal of the European Optical Society Part B*. – 1992. – Т. 4. – № 1. – С. 55-70.
54. Observation of Robust Polarization Squeezing via the Kerr Nonlinearity in an Optical Fiber / N. Kalinin, T. Dirmeier, A.A. Sorokin, E.A. Anashkina, L.L. Sánchez-Soto, J.F. Corney, G. Leuchs, A.V. Andrianov // *Advanced Quantum Technologies*. – 2023. – Vol. 6. – № 3. – P. 2200143.
55. Yuen H.P. Generation and detection of two-photon coherent states in degenerate four-wave mixing / H.P. Yuen, J.H. Shapiro // *Optics Letters*. – 1979. – Vol. 4. – № 10. – P. 334.
56. Kannath P.M. Quantum sensing with bright two-mode squeezed light in a distributed network of gyroscopes / P.M. Kannath, G.S. Agarwal, A. Kumar // *Physical Review Research*. – 2025. – Vol. 7. – № 4. – P. 043269.
57. Demonstration of a quantum-enhanced fiber Sagnac interferometer / M. Mehmet, T. Eberle, S. Steinlechner, H. Vahlbruch, R. Schnabel // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35. – № 10. – P. 1665.
58. Quantum sensors for enhanced positioning and navigation: a comprehensive review / H. Li, S. Zaminpardaz, A. Kealy, A.D. Greentree, E. Rubinov, B. Gibson, S. Choy // *GPS Solutions*. – 2026. – Vol. 30. – Quantum sensors for enhanced positioning and navigation. – № 1. – P. 62.
59. Kik P.G. Surface Plasmon Nanophotonics / P.G. Kik, M.L. Brongersma // *Surface Plasmon Nanophotonics : Springer Series in Optical Sciences* / eds. M.L. Brongersma, P.G. Kik. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. – Vol. 131. – P. 1-9.
60. Wei H. Plasmonics in composite nanostructures / H. Wei, H. Xu // *Materials Today*. – 2014. – Vol. 17. – № 8. – P. 372-380.
61. Biological measurement beyond the quantum limit / M.A. Taylor, J. Janousek, V. Daria, J. Knittel, B. Hage, H.-A. Bachor, W.P. Bowen // *Nature Photonics*. – 2013. – Vol. 7. – № 3. – P. 229-233.
62. A Quantum Laser Pointer / N. Treps, N. Grosse, W.P. Bowen, C. Fabre, H.-A. Bachor, P.K. Lam // *Science*. – 2003. – Vol. 301. – № 5635. – P. 940-943.
63. Losses in plasmonics: from mitigating energy dissipation to embracing loss-enabled functionalities / S.V. Boriskina, T.A. Cooper, L. Zeng, G. Ni, J.K. Tong, Y. Tsurimaki, Y. Huang, L. Meroueh, G. Mahan, G. Chen // *Advances in Optics and Photonics*. – 2017. – Vol. 9. – Losses in plasmonics. – № 4. – P. 775.

64. Kauranen M. Nonlinear plasmonics / M. Kauranen, A.V. Zayats // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6. – № 11. – P. 737-748.
65. Observation of space-time surface plasmon polaritons / N. Ichiji, H. Kikuchi, M. Yessenov, K.L. Schepler, A.F. Abouraddy, A. Kubo // *Nature Communications*. – 2025. – Vol. 16. – № 1. – P. 10697.
66. Advances in Bioreceptor Layer Engineering in Nanomaterial-based Sensing of *Pseudomonas Aeruginosa* and its Metabolites / L.Ds. Lapitan, B.M.B. Felisilda, C.E. Tiangco, A. Rosin Jose // *Chemistry – An Asian Journal*. – 2024. – Vol. 19. – № 18. – P. e202400090.
67. A Review of Optical Fiber Sensing Technology Based on Thin Film and Fabry–Perot Cavity / C. Ma, D. Peng, X. Bai, S. Liu, L. Luo // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13. – № 7. – P. 1277.
68. Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry–Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review / C. Zhu, H. Zheng, L. Ma, Z. Yao, B. Liu, J. Huang, Y. Rao // *IEEE Sensors Journal*. – 2023. – Т. 23. – Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry–Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors. – № 7. – С. 6406-6426.
69. Etched addressed fiber Bragg structures for environment pH sensing / A.N.D. Alhussein, M.R.T.M. Qaid, T.A. Agliullin, B.I. Valeev, A.A. Kuznetsov, M.Y. Fedotov, O.G. Morozov, A.Z. Sakhabutdinov // *Laser Physics*. – 2025. – Т. 35. – № 9. – С. 096201.
70. Альхуссейн Алаа Н.Д. Адресные волоконно-оптические датчики с вытравленной оболочкой для измерения pH / Альхуссейн Алаа Н.Д., Валеев Б.И., Сахабутдинов А.Ж. // *Актуальные проблемы физической и функциональной электроники Материалы 28-й Всероссийской молодежной научной конференции*. – Ульяновск, 2025.
71. Applicability limits of the end face fiber-optic gas concentration sensor, based on Fabry–Perot interferometer / S.M.R.H. Hussein, A.Zh. Sakhabutdinov, O.G. Morozov, V.I. Anfingentov, J.A. Tunakova, A.R. Shagidullin, A.A. Kuznetsov, K.A. Lipatnikov, A.R. Nasybullin // *Karbala International Journal of Modern Science*. – 2022. – Vol. 8. – № 3. – P. 339-355.
72. Исследование условий возникновения резонанса Фано в комбинированных волоконных квазипериодических структурах / Т.А. Аглиуллин, А.Ж. Сахабутдинов, А.А. Кузнецов, Б.И. Валеев // *Оптический журнал*. – 2025. – Т. 92. – № 5. – С. 26-37.

QUANTUM PRINCIPLES IN FIBER-OPTIC SENSING

*A.A. Kamaleeva¹, B.I. Valeev¹,
M.V. Dashkov², A.Zh. Sakhabutdinov¹*

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

²Volga State University of Telecommunications and Informatics
77, Moskovskoye shosse, Samara, 443090, Russian Federation

Abstract. This review examines quantum principles and physical effects that are shaping the emerging field of fiber-optic quantum sensing. Continued progress in the sensitivity, resolution, and functional capabilities of fiber-optic sensors is increasingly linked to a shift from conventional interrogation methods toward approaches exploiting quantum coherence, quantum correlations, single-photon states, squeezed light, and quantum-engineered materials. The paper discusses the foundations of quantum sensing, the properties of quantum light sources, and the prospects for integrating carbon nanodiamonds with NV centers, photonic crystals, quantum dots, and plasmonic structures into fiber-optic sensor platforms. Particular emphasis is placed on Raman, Brillouin, and Rayleigh scattering as key mechanisms for distributed measurements of temperature, strain, and related physical quantities. It is shown that the

incorporation of quantum effects into fiber-optic sensing architectures may enable next-generation sensor systems combining enhanced sensitivity, high spatial resolution, and extended functionality. Overall, quantum approaches represent a promising direction for the further development of fiber-optic sensing in scientific, engineering, and biomedical applications.

Keywords: fiber-optic sensor; quantum sensing; quantum interrogation; quantum light sources; squeezed light; NV centers; carbon nanodiamonds; quantum dots; photonic crystals; plasmonic structures; Raman scattering; Brillouin scattering; Rayleigh scattering.

Статья представлена в редакцию 13 марта 2026 г.