



Фотоника: базисное направление шестого технологического уклада

Беспалов Виктор Георгиевич — профессор Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, д.ф.-м.н.

Современная информационная система — это набор информационных технологий, направленных на поддержку жизненного цикла информации. Она включает три основных процесса: обработку данных, анализ и управление информацией, сбор и хранение [1]. Современная элементная база для информационно-телекоммуникационных систем основывается на электронике, относящейся к V технологическому укладу, и *фотонике*, которая является одним из основных направлений VI технологического уклада.

В последнее десятилетие традиционные информационные технологии, основанные на электронной технике, достигли некоторых физических и технических ограничений при продолжающемся росте потребительского спроса на скорость и объем передаваемой информации. Ключевым решением данной проблемы явилось объединение оптических и информационных технологий. Первое десятилетие XXI в. характеризуется стремительным прогрессом в области разработки и внедрения технологий, основанных на фотонике. Одним из достижений фотоники явилось создание компанией Lenseslet в конце 2003 г. коммерческого оптического процессора «Enlight256» с быстродействием, в тысячу раз превышающим

электронные аналоги — достигнута рекордная производительность в 8 трлн операций в секунду с 8-битовыми числами [2]. Другим недавним достижением явилась передача информации со скоростью 1 петабит/сек (10^{15}) по 12-ядровому оптическому волокну на расстояние 50 км [3].

Термин «фотоника» отражает успехи в создании лазерных источников оптического излучения, появившихся в начале 60-х гг. прошлого столетия, и совершенных оптических волокон, появившихся в начале 70-х гг. В 2008 г. Общество «Laser and Electrooptics» LEOS IEEE, следуя мировым тенденциям, изменило свое название на «IEEE Photonics Society» [4]. Впервые термин «фотоника» был введен академиком А.Н. Терениным в начале 1960-х гг. Под фотоникой он понимал совокупность взаимосвязанных фотофизических и фотохимических процессов в веществе [5]. В начале 1990-х гг. смысловая нагрузка этого термина перемещается в сферу прикладных задач. Термин «фотоника» по аналогии с термином «электроника» подчеркивает тот факт, что фотон как материальный агент информационных систем может выполнять все функции, выполняемые электроном. Словарь на сайте Photonics Dictionary Plus [6] дает следующее определение: «Фотоника — наука и соответствующие технологии генерации и использования света, а также других форм излучаемой энергии в виде квантовой частицы — фотона. Фотоника включает излучение света, передачу, усиление и детектирование с использованием оптических компонентов и инструментов, лазеров и других источников, волоконной оптики, электрооптических устройств, соответ-

ствующей электроники и сложных систем. Область применений фотоники простирается от генерации энергии при лазерном термоядерном синтезе до детектирования в системах связи и обработки информации». Словарь терминов «Фотоника» [7] определяет области фотоники: «Составными частями фотоники являются оптоэлектроника, иконика, тепловидение и ночное видение, квантовая электроника, отдельные разделы геометрической и физической оптики и ряд других дисциплин».

Мировые тенденции в области развития оптики, оптического приборостроения и оптического материаловедения в последние годы претерпели значительные изменения. Эти изменения коснулись как сути — разработано новое поколение оптических материалов, открыты новые оптические явления и эффекты, которые легли в основу создания принципиально новых оптических элементов, приборов и систем, так и формы — появилось много новых оптических терминов. Сегодня в рейтинге этих терминов первое место по популярности занимает слово «фотоника». Весь мир, связанный с высокими технологиями, активно употребляет и эксплуатирует это слово. Фотоника рассматривается как приоритетное направление развития науки и техники во многих ведущих странах (США, Великобритания, Южная Корея, страны Европейского Союза). Там разрабатываются государственные стратегические программы развития на 10–20 лет под флагом фотоники.

Примером может служить Евросоюз, где создано специальное подразделение для координации усилий стран ЕС в части развития фотоники и орга-

низована Технологическая платформа ЕС «Photonics21» [8]. На поддержку проектов, рекомендованных этой Платформой, ежегодно из бюджета ЕС выделяется около 100 млн евро (финансирование фотоники предусмотрено отдельной строкой в VII Рамочной программе Евросоюза). В Китае действует специальная государственная целевая программа, и объемы производства лазерно-оптической продукции растут в среднем на 25–30% в год. Через агентство DARPA и другие национальные программы активно поддерживаются поисковые исследования и разработки в области фотоники в США.

Мировой рынок фотоники составляет сегодня 420 млрд долларов, к 2015 г. он должен достичь 480 млрд долларов. Европа формирует около 20% этого рынка, а в некоторых его важнейших секторах — таких, как освещение — доля европейского производства достигает 40% [9]. Европейская фотоника дает рабочие места 290 тыс. человек, большинство из которых трудится на 5 тыс. малых предприятий этой отрасли. От фотоники непосредственно зависят 20–30% всей европейской экономики и 10% всех работающих (это около 30 млн рабочих мест). Фотоника исключительно важна для решения многих социальных задач — выработки энергии и ее эффективного использования, обеспечения здоровой жизни стареющего населения, обеспечения безопасности, адекватного реагирования на изменения климата и др. Объем производства продукции фотоники в Европе растет со средней скоростью 8% в год, эта отрасль имеет огромный потенциал на мировом рынке. Руководство Еврокомиссии считает, что

Европа имеет все основания для того, чтобы стать мировым лидером в этой важнейшей комплексной области хай-тека (*«Europe should be photonics champion of the world!»*) [9].

Это показывает не только экономическое значение фотоники, но и ее потенциал. Все ведущие мировые страны выделяют под фотонику гигантское госбюджетное финансирование. Сегодня фотоника — не только новейшая наука и технология. Во всем мире она успешно развивается как бизнес: тысячи высокотехнологичных компаний работают в этом секторе. Рынок фотоники, по прогнозам, через 10 лет должен догнать рынок электроники.

Государственное финансирование фотоники расширяется [10].

— Министерство науки и технологий Южной Кореи на фотонику ежегодно выделяет 30% всего госбюджета, направленного на науку.

— Еврокомиссия завершила выполнение VII Рамочной программы, в рамках которой оказывалась поддержка важнейшим НИОКР, выполняемым группами организаций различных стран Евросоюза. Эта программа предусматривала около 120 млн евро в год на НИОКР по фотонике, причем поддержка оказывается Еврокомиссией и бизнесом на паритетных началах: Еврокомиссия выделяет проекту ровно столько, сколько предоставляет заинтересованный в результатах проекта бизнес.

— VIII Рамочной программы поддержки НИОКР не будет. Вместо этого разработана Стратегия «Horizon 2020», объединяющая все хай-тековские программы — и НИОКР, и инновационные [11]. На ее реализацию в 2013–2020 гг. планируется затратить 80 млрд евро.

Фотоника в этой стратегии должна развиваться в рамках частногосударственного партнерства «Private Public Partnership — PPP». Разработка программы этого развития поручена техплатформе «Photonics21». Программа должна предусматривать и ускоренную разработку инновационных продуктов, и их успешную коммерциализацию с результирующим ощутимым экономическим эффектом для Европы в целом.

Согласно уже разработанному проекту программы действий «Photonics-PPP», в 2013–2020 гг. в развитие европейской фотоники будет вложено 7 млрд евро, из которых 5,6 млрд даст бизнес, частный сектор, а 1,4 млрд — бюджет Еврокомиссии. Это должно создать от 70 до 100 тыс. новых рабочих мест в самой отрасли и 350–600 тыс. новых рабочих мест в европейской промышленности в целом. От техплатформы ожидают активной деятельности — и аналитической, и прогнозной, и по развитию сотрудничества с отраслями, представляющими другие ключевые технологии, в результате чего должны появиться конкретные программы «Фотоника в здравоохранении», «Фотоника в освещении», «Фотоника в связи», «Фотоника в новых промышленных производствах». Участие техплатформы в реализации европейской стратегии «Horizon 2020», по мнению руководства Еврокомиссии, должно обеспечить лучшее управление процессами, более эффективное использование выделяемых бюджетных средств.

В 1995 г. правительственная комиссия США (the U.S. Optoelectronic Industry Development Association) опубликовала глобальный прогноз развития миро-

вого рынка фотоники в XXI в. По данным этой комиссии, рынок фотоники будет удваиваться каждые четыре года и к 2013 г. достигнет 500 млрд долларов. Затем скорость роста еще увеличится, и уже к 2015 г. рынок фотоники будет составлять 1000 млрд долларов. По данным той же комиссии, товары на основе фотоники будут составлять более 35% всех потребительских технических товаров.

— «Есть все основания полагать, что вклад фотоники в мировое развитие в XXI веке будет такой же весомый и значительный, как электроники в XX веке и пара в XIX веке» (цитата из Стратегической программы «PHOTONICS: a UK strategy for success» [10].

В России опубликован список приоритетных направлений развития науки, техники и технологий РФ (8 направлений) и перечень критических технологий (34 технологии). К сожалению, фотоника в эти перечни не попала. В 2011 г. была создана техплатформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии — фотоника» [12], которая координирует действия заинтересованных сторон в этой сфере.

Одно из главных направлений фотоники — информационно-телекоммуникационные технологии (ИКТ).

Структура современного рынка фотоники представлена на *рис. 1*.

Можно выделить следующие основные направления фотоники, ориентированные на информационно-телекоммуникационные системы (ИКТ).

1. Лазерные производственные технологии и оборудование.

2. Оптическая связь и ее компоненты. Лазерно-оптические информационные технологии и оборудование.

Рисунок 1. Прогноз развития рынка фотоники до 2015 г., по данным Optech consulting [9]



3. Оптические системы, узлы и компоненты.

Остановимся на каждом отдельно.

1. Лазерные производственные технологии и оборудование

Одна лазерная технологическая установка может заменить до 17 фрезерных станков. Имея начальную стоимость в 300–500 тыс. долларов, она при правильной эксплуатации окупается за 1–1,5 года и приносит прибыль в размере 8–10 рублей на один вложенный рубль, при этом существенно повышая культуру производства, снижая энерго- и материалоемкость продукции [12]. При производстве ноутбуков и других высокотехнологичных изделий в настоящее время используются на 100% лазерные технологии — CPU, DRAM и другие чипы изготавливаются с использованием лазерной литографии; маркировка, сварка корпусов, сверление и другие — лазерные. На мировом рынке доля литографии и обработки материалов приблизительно одинаковая — по

6,7%. Имеющаяся потребность российского бизнеса в лазерно-оптическом и оптоэлектронном оборудовании все в большей степени удовлетворяется за счет импорта. При этом многочисленные примеры организации нашими соотечественниками в последние 10 лет за рубежом успешных предприятий лазерно-оптической специализации, весьма эффективных производств новейшей фотоники свидетельствуют о наличии в России и большого научно-технического задела, и талантливых изобретателей и руководителей, необходимых для успешного развития отечественной лазерно-оптической отрасли, фотоники в целом.

Объем производства в России конкурентоспособного лазерно-оптического оборудования весьма невелик (наша доля от мирового рынка — около 0,2%) [12]. Основная часть российского лазерного парка ориентирована на обработку материалов; предприятий, выпускающих оборудование для литографии, нет.

2. Оптическая связь и ее компоненты. Лазерно-оптические информационные технологии и оборудование

Сегменты рынка:

— телекоммуникационные системы для междугородных линий связи, метро и сетей доступа: мультиплексирование с разделением длины волны, Sonet/SDH, цифровая сотовая связь/оборудование OCS;

- системы ЛВС;
- узлы и модули;
- лазеры, ответвители, изоляторы и т.д.;
- трансмиттеры, приемники;
- волоконные усилители;
- волоконные кабели.

В данном сегменте также объем производства в России конкурентоспособного оборудования весьма невелик. Большая часть предприятий ориентируется на выпуск волоконных кабелей. Одним из предприятий, выпускающих практически весь спектр вышеперечисленных изделий, является Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус».

3. Оптические системы, узлы и компоненты

Сегменты рынка:

- оптические узлы;
- оптическое стекло;
- линзы и другие оптические узлы с фреймом и без фрейма;
 - передающие трубки (включая чувствительные элементы изображения твердого тела);
 - оптические системы;
 - объективы (включая объективы для слоистых степперов);
 - классические оптические системы, например телескопы, оптические прицелы, бинокли, 35-миллиметровые камеры, оптическое оборудование для

пленочной и бумажной обработки оттиска;

- профессиональные телевизионные камеры.

Европейская промышленность и мировой рынок

Доходы европейских компаний в секторе оптических узлов и систем составляют около 5 млрд евро [9] — более 40% мирового рынка. Европейская доля — 27% в сегменте оптических узлов и 58% — в сегменте оптических систем. Хотя сегодня много оптических узлов производится в Азии (например, линзы для цифровых камер и камер телефонов), ЕС по-прежнему занимает лидирующее положение в области классических оптических систем.

В России также существует немало предприятий, выпускающих различные оптические узлы и детали. РФ занимает относительно устойчивое положение в области классических оптических систем.

4. Инновационные направления фотоники в РФ, нацеленные на поддержку жизненного цикла информации

Ниже приведена *табл. 1* перспективных направлений фотоники, ориентированных на создание будущего рынка элементной базы ИКТ.

Всеми вышеперечисленными направлениями в РФ занимаются научные коллективы в институтах РАН и университетах.

Российский рынок фотоники для ИКТ в основных его разделах можно оценить следующим образом [13].

1. Технологические лазерные установки. Сейчас выпускаются штучно или малыми сериями, маркеры — десятками.

Отечественные производители предлагают рынку 213 моделей ЛТО. Объем закупок — около 4 млрд рублей в год.

2. Лазерные измерительно-диагностические приборы для промышленного производства (машиностроения, приборостроения, металлургии, химических производств и т.п.).

Сейчас такие приборы выпускаются поштучно или очень малыми сериями, но отечественные производители предлагают около 180 моделей.

3. Телекоммуникационное оборудование для оптической связи и обработки информации.

В России разрабатывается и выпускается телекоммуникационное оборудование для волоконно-оптических систем дальней связи DWDM. Объем производства обеспечивает примерно 7% потребностей российского рынка систем DWDM.

В небольших объемах выпускается оборудование для систем связи по открытому лучу.

Таблица 1

Название	Цель, задачи	Состояние	Перспективы
Оптические системы искусственного интеллекта	Анализ информации	Теория и эксперименты	Замена работ, требующих интеллекта человека
Оптический компьютер	Анализ информации	Теория и эксперименты, коммерческая реализация оптического сигнального процессора	Вычислители с меньшими затратами энергии, более быстрые и меньшего размера
Квантовый компьютер	Анализ информации	Теория и эксперименты, реализация двухкубитной ячейки	Более быстрые параллельные вычисления, химическое моделирование, новые материалы с программируемыми свойствами
Квантовая информатика и криптография	Передача и безопасность информации	Теория и эксперименты, коммерческая реализация квантовой волоконной линии	Безопасная связь
ТГц системы беспроводной связи	Передача информации	Теория и эксперименты	Следующее поколение мобильных систем связи
Оптическая (молекулярная) и голографическая память	Хранение информации	Теория и эксперименты, коммерческая реализация	Хранение и архивирование данных, которые ранее не хранились по экономическим причинам
Голография, безэкранный 3D дисплей	Отображение информации	Теория и эксперименты, коммерческая реализация	Виртуальная реальность
Метаматериалы, сверхразрешение	Хранение информации	Теория и эксперименты	Хранение и архивирование данных, литография

4. Специальные лазерно-информационные системы, квантово-оптические системы геодезии и навигации наземного, морского, воздушного и космического базирования.

В настоящее время изготавливаются для решения специальных задач — обнаружения объектов, задания направления, определения координат и эфемерид, высокоскоростной передачи информации между космическими аппаратами и т.п. Являются важнейшими составляющими элементами современного вооружения.

5. Лазерно-оптическое и оптоэлектронное оборудование для научных исследований — уникальные источники излучения, контрольно-измерительное оборудование, анализаторы излучения и др.

Выпускается малыми сериями или изготавливается поштучно «под заказ». Изготовители — научные центры (малые предприятия при них), основные покупатели — зарубежные университеты и научные центры. В силу высокой стоимости указанного оборудования стоимостный объем производства достаточно высок (для хай-тека России) — 5–10 млн долларов в год.

Оценочный объем производства всех видов продукции фотоники составляет сейчас в России 4–5 млрд рублей в год; вышеперечисленные позиции составляют его основную часть.

Задачи на перспективу [14]:

— развитие лазерно-оптической отрасли России до уровня, обеспечивающего ее доминирование на внутреннем лазерном рынке России и СНГ, импортозамещение в части лазерного оборудования, активное участие в мировом лазерном рынке и технологическую неза-

висимость страны в части обеспечения лазерно-оптической техникой критически важных для ВПК систем связи, авиакосмической промышленности и др.;

— превращение отечественной фотоники в отрасль, стимулирующую инновации в реальном секторе экономики, привлекательную для инвесторов, пользующуюся вниманием и поддержкой государства и общественности.

Инновационные тренды фотоники

1. Кремниевая фотоника и нанофотоника

Следующий этап развития элементной базы информационных систем основан на интеграции электроники и фотоники с использованием кремниевой полупроводниковой платформы. Кремниевая фотоника — область науки и технологий, основанная на применении кремния в качестве генерирующей, модулирующей, передающей и детектирующей поток фотонов оптической среды. В этом году конференция OFC/NFOEC (Международная конференция и выставка оптоволоконных систем связи/Национальная конференция инженеров оптоволоконных систем), прошедшая в США (17–21 марта 2013 г., Сан-Франциско), была посвящена кремниевым фотонным технологиям передачи информации со скоростями 100 Гб/с и будущим технологиям, которые позволят передавать информацию со скоростью 400 Гб/с. На ней были представлены новые виды приемопередатчиков и процессоров, соревнующихся за право вывести на рынок высокоскоростные сети с наименьшими возможными стоимостью и энергопотреблением [1].

Первые шаги в направлении нанофотоники уже сделаны фирмой IBM — создание в одном интегральном блоке модуляторов, детекторов, волноводов и CMOS транзисторов по технологиям 90 нм. Юрий Власов, проектный менеджер по направлению «Кремниевая интегральная нанофотоника» (Silicon Integrated Nanophotonics) в IBM Research, считает, что в следующем десятилетии именно данные изделия будут удовлетворять требованиям телекоммуникаций [2].

2. Замена стратегии «волоконно к дому» (fiber-to-the-home — FTTH) на «волоконно к беспроводной сети» (fiber-to-the-wireless — FTTW) в ВОЛС

Следующий этап модернизации инфраструктуры беспроводной связи будет заключаться в увеличении доли оптического волокна в беспроводных узлах в сетях коммуникации. В самом деле, для этого направления даже придуман новый термин «волоконно к беспроводной сети» (fiber-to-the-wireless — FTTW) [3].

3. Переход от 100 Гб/с к 1 Тб/с каналам ВОЛС в коммерческих сетях и от 10 Тб/с к 1–10 Петабит/с в магистральных ВОЛС

«В то время как коммерческое развертывание терабит-каналов еще далеко, мы видим, что поставщики начинают делать свои инвестиции сейчас, чтобы быть готовыми к будущему» [3].

Уже продемонстрирована возможность создания нового поколения магистральных петабитных ВОЛС, используя поляризационно-спектральное уплотнение каналов с квадратурной модуляцией (QAM) с информационной емкостью каждого канала 380 Гб/с и пространственного уплотнения каналов на

базе многосердцевидных волоконных световодов [4].

Несомненно, в течение ближайших лет будут созданы коммерческие ВОЛС со скоростью передачи информации до 10 Петабит/с.

4. Терагерцовая фотоника в локальных беспроводных сетях

На протяжении последних 25 лет ширина полосы мобильных радиосистем удваивалась каждые 18 месяцев (Edholm's Law of Bandwidth) [5]. Если для локальных сетей в 1984 г. она составляла 1 Кб/с, то в 2009 г. — более чем 100 Мб/сек. Исходя из этого можно предсказать, что в ближайшие годы потребуются скорости передачи данных приблизительно в 5–10 Гб/с. Технология bluetooth и беспроводные локальные сети работают на несущих частотах в несколько ГГц, их полоса пропускания вследствие закона Шеннона ограничена и обеспечивает скорости передачи данных 100–200 Мб/сек на достаточно большие расстояния и 500 Мб/сек на короткие. Для увеличения скоростей передачи данных необходим переход в терагерцовый диапазон частот 300...500 ГГц. Использование более высоких частот нецелесообразно в связи с наличием сильного поглощения в атмосфере.

В данном направлении уже интенсивно ведутся исследования [6, 7].

5. Системы хранения данных с плотностью более 1 Тб/см²

Можно выделить три направления, позволяющих реализовать данные плотности:

— термоассистируемая магнитная запись (также термомагнитная запись, тепловая магнитная запись, магнитная запись с подогревом; HAMR (Heat-assisted magnetic recording) — гибридная

ная технология записи информации, комбинирующая магнитное чтение и магнитооптическую запись; технология позволяет достичь плотности записи в 2,32–7,75 Тбит/см² [8];

— голографическая запись позволяет достичь 1...3 Тбит/см² [9];

— оптическая ближнепольная запись, теоретически позволяющая реализовать плотность записи на молекулярном уровне [10].

Следует отметить, что в последнее время появились работы, авторы которых пытаются объединять преимущества отдельных технологий и достичь плотности более 10 Тбит/ин² [11, 12].

Литература

1. Советов Б.Я., Цехановский В.В. Информационные технологии. М.: Высшая школа, 2006. 263 с.
2. Lenslet: Optical DSPs are in your future. [Электронный ресурс]: Сайт [http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_tt-news\[tt_news\]=6256](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_tt-news[tt_news]=6256) свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
3. World Record One Petabit per Second Fiber Transmission over 50-km: Equivalent to Sending 5,000 HDTV Videos per Second over a Single Fiber [Электронный ресурс]: Сайт Nippon Telegraph and Telephone, Corporation <http://www.ntt.co.jp/news2012/1209e/120920a.html> свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
4. Our History. [Электронный ресурс]: Сайт IEEE Photonics Society <http://photonicsociety.org/content/our-history>. свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
5. Теренин А.Н. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. Л.: Наука, 1967. 616 с.
6. Photonics Dictionary Plus > photonics [Электронный ресурс]: Сайт <http://photonics.com/edu/Term.aspx?TermID=6170> свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
7. Ковалевская Т.Е., Овсяк В.Н., Белоконев В.М., Дегтярев Е.В. Фотоника: Словарь терминов/Под ред. В.Н. Овсяка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 342 с.
8. Photonics21 is the European Technology Platform for photonics. [Электронный ресурс]: Сайт <http://www.photonics21.org/index.php>. свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
9. Economic Impact Study «Photonics in Europe». [Электронный ресурс]: Сайт http://www.photonics21.org/download/Brosch_Photonics_Europe.pdf свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
10. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 143 с.
11. Horizon 2020 — The Framework Programme for Research and Innovation/[Электронный ресурс]: Сайт http://ec.europa.eu/research/horizon2020/index_en.cfm?pg=h2020-documents свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
12. Новости Технологической платформы «Фотоника». [Электронный ресурс]: Сайт <http://www.cislaser.com/> свободный — Загл. с экрана — Рус. яз.
13. Стратегическая программа исследований ТП «Фотоника» [Электронный ресурс]: Сайт <http://www.cislaser.com/> свободный — Загл. с экрана — Рус. яз.
14. Прогноз инновационно-технологического развития России

- на период до 2030 года/Под ред. Б.Н. Кузька и др. М.: МИСК, 2008. 240 с.
15. Кремниевая фотоника в центре внимания на международной конференции. [Электронный ресурс]: Сайт OFC/NFOEC <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/62920/свободный> — Загл. с экрана — Рус. яз.
 16. Silicon Integrated Nanophotonics Technology: from the Lab to the Fab. [Электронный ресурс]: Сайт http://researcher.ibm.com/researcher/view_project.php?id=2757 свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
 17. Overton. G. et al. Laser marketplace 2013: Laser markets rise above global headwinds/Laser Focus World. 2013. Vol. 49. № 1. P. 36–47.
 18. World Record One Petabit per Second Fiber Transmission over 50-km: Equivalent to Sending 5,000 HDTV Videos per Second over a Single Fiber [Электронный ресурс]: Сайт Nippon Telegraph and Telephone, Corporation <http://www.ntt.co.jp/news2012/1209e/120920a.html> свободный — Загл. с экрана — Англ. яз.
 19. Federici J., Moeller L. «Review of terahertz and subterahertz wireless communications», *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 11, Article ID 111101, 22 pages, 2010.
 20. Photonic Technologies for Millimeter- and Submillimeter-Wave Signals. B. Vidal et al., *Advances in Optical Technologies* 2012, 1 (2012)
 21. Song H.J., Ajito K., Wakatsuki A. et al. «Terahertz wireless communication link at 300 GHz», in *Proceedings of the IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP'10)*, pp. 42–45, Montreal, Canada, October 2010.
 22. Соколовский А., Мутягин А., Хлопов Б. и др. Перспективы развития устройств хранения информации на магнитных носителях // Информационно-аналитический бюллетень МГТУ, 2008. Вып. 1.
 23. Curtis K., Dhar L., Hill A.J., Wilson W.L., Ayres M.R. *Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems* (John Wiley & Sons, 2010).
 24. Moriguchi C., Inami W. Egami C., et al. Near-field recording technique for high-resolution fluorescent imaging // *Appl. Phys. Lett.* 96, 243103 (2010); doi: 10.1063/1.3455095/
 25. Ikkawi R., Amos N., Lavrenov A., Krichevsky A., Teweldebrhan D., Ghosh S., Balandin A.A., Litvinov D., Khizroev S. Near-Field Optical Transducer for Heat-Assisted Magnetic Recording for Beyond-10-Tbit/in² Densities // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, Vol. 3, 44–54, 2008.
 26. Matsumoto T., Akagi F., Mochizuki M., Miyamoto H., Stipe B. Integrated head design using a nanobeak antenna for thermally assisted magnetic recording. *Opt. Express* 20, 18946–18954 (2012).