

Сколько шагов от радиофизики до фотоники?

Н.Л. Истомина

*Российская академия наук, Отделение физических наук
119991, Москва, Ленинский проспект, дом 32 А
E-mail: photonics@gpad.ac.ru*

В условиях физических ограничений, сдерживающих применение электронных систем, необходимо активно внедрять фотонные инновационные технологии в мир инженерии. Высокий потенциал цифровизации, высокая скорость передачи больших массивов данных, надежность и стойкость к внешним воздействиям, возможность миниатюризации позволяют использовать возможности лазерных технологий в системах коммуникаций, системах получения, обработки и хранения информации, в комплексах обработки металлов. Важно видеть, где фотонные технологии представляют конкуренцию традиционным методам, а где уступают.

Ключевые слова: мазеры, лазеры, лазерная сварка, селективное лазерное плавление, волоконно-оптические линии связи, вихревые пучки, ФИС, рентгеновская оптика, радиофотоника

How many steps are there from radio to photonics?

N.L. Istomina

Russian Academy of Sciences (RAS), Department of Physical Sciences

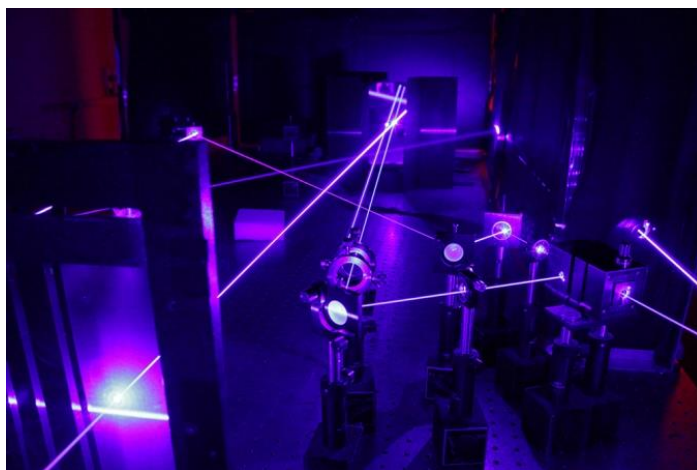
Given the physical limitations that limit the use of electronic systems, it is necessary to actively introduce photonic innovative technologies into the world of engineering. The high potential of digitalization, high speed of transmission of large amounts of data, reliability and resistance to external influences, the possibility of miniaturization make it possible to use the capabilities of laser technologies in communication systems, information acquisition, processing and storage systems, and metalworking complexes. It is important to see where photonic technologies compete with traditional methods and where they are inferior.

Keywords: masers, lasers, laser welding, selective laser melting, fiber-optic communication lines, vortex beams, PIC, X-ray optics, microwave photonics

Фотоника является одним из наиболее динамичных инновационных направлений экономики развитых стран.

Главная тенденция в развитии фотоники – стремительный рост числа технологий, представляющих экономический интерес и непрерывное увеличение объема производства продукции для практического применения в других отраслях экономики. В последнее время в США, странах Евросоюза и Тихоокеанского региона на основе технологий фотоники бурно развивается ряд отраслей промышленности.

Для многих инженеров знания о лазерных технологиях лежат только в образе светящегося пучка. Сегодня мир лазеров продвинулся далеко вперед и переживает бурное развитие своих применений в производственных технологиях. Новые лазерные технологии, которые из-за инерционности рынка пока известны только специалистам, не обладают достаточно широкой популярностью.



Инженерное мышление, используя знания и компетенции традиционных методов проектирования, должно внедрять в мир инженерии фотонные инновации. Динамичное развитие лазерных технологий в первую очередь связано с перспективами их цифровизации при конструировании станков, с повышением производительности серийного производства, использовании модульных компоновочных решений. Важно понимать лазерные технологии и изучать их возможности, чтобы анализировать, где они представляют конкуренцию традиционным методам, а где уступают.

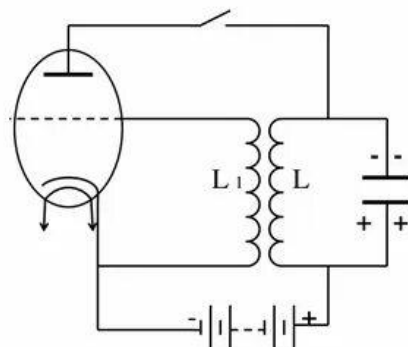
Стремительное развитие фотоники включает в себя разработку новых лазерных и лазерно-информационных технологий, в том числе технологий, основанных на волоконной, адаптивной и интегральной оптике, микро- и нанофотонике, субволновой и волноводной оптике. Интенсивно развиваются квантовые инфокоммуникационные технологии, в том числе квантовая информатика и квантовая криптография, оптические системы памяти, записи и хранения информации, а также технологии, основанные на современной полупроводниковой и органической фотонике и оптоэлектронике.

В первой половине XX века радио и оптика шли разными путями. В оптике разрабатывались квантовые представления физических процессов, в радио – волновые представления. В то время единство радио и оптики виделось только с точки зрения общности волновых процессов, но общность оптики и радио с квантовой точки зрения не проявлялась.

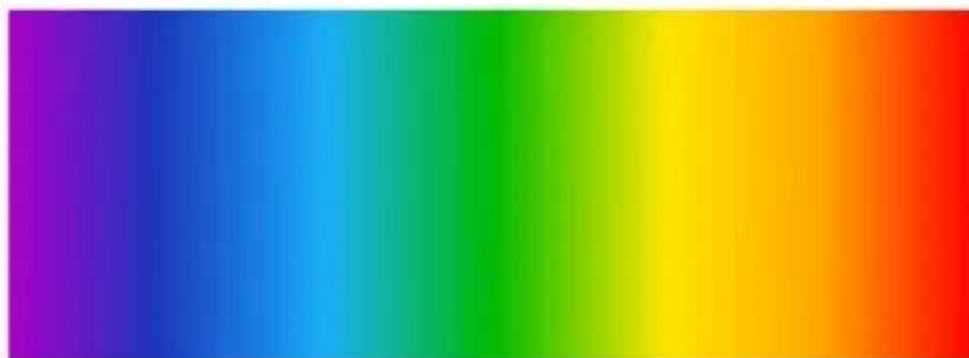
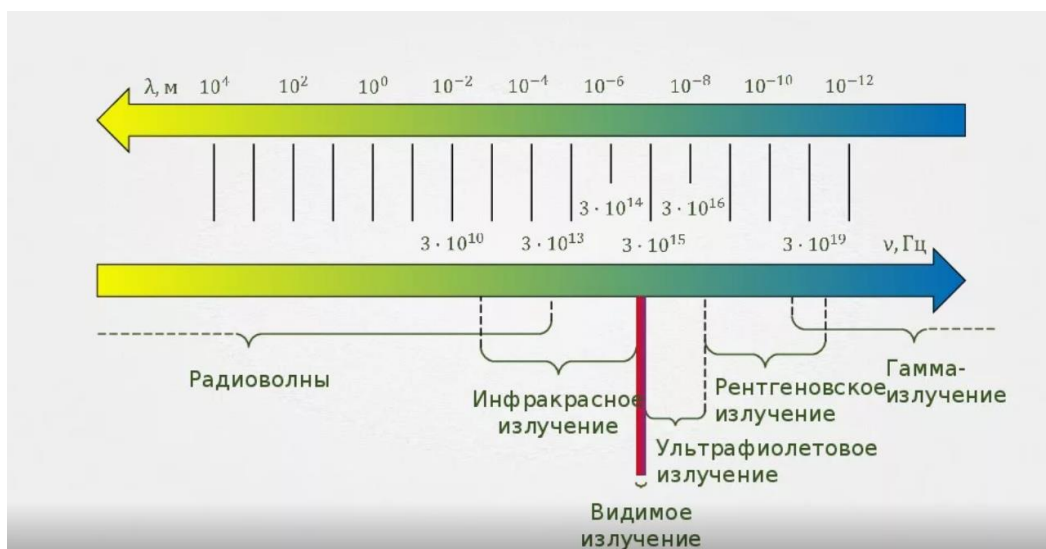
К тому моменту времени после экспериментального подтверждения Герцем существования электромагнитных волн в 1888 году и после начавшегося среди изобретателей ажиотажа по созданию технических устройств генерации радиоволн впереди всех оказались Попов и Маркони. История всем хорошо известна. Радиотелеграфная связь через Атлантику шла с помощью азбуки Морзе, так как электромагнитные волны передавались вспышками. Вспышки быстро затухали. Необходимо было генерировать незатухающие волны.

Любая цепь электромагнитного колебательного контура обладает сопротивлением, то есть потери энергии сигнала, генерируемого контуром, будут всегда. Для их компенсации необходимо включить в цепь внешний источник энергии, который в такт колебаниям будет сообщать порцию тока. То есть требуется устройство обратной связи. Однако положительная обратная связь может привести к росту амплитуды колебаний, следовало ввести отрицательную обратную связь. В 1907 году был изобретен триод – электровакуумный прибор, а уже в 1913 году была реализована схема генерации незатухающих электромагнитных колебаний.

Генератор незатухающих электромагнитных колебаний



Русская исследовательница Глагольева-Аркадьева решила свести вместе результаты, полученные разными научными лабораториями, создававшими радиотехнические устройства генерации электромагнитных волн. Чтобы разобраться, она свела результаты генерации длин волн (или частот), публикуемые разными научными лабораториями, на одну ось и получила всем известную картинку.



Далее развитие радиотехники стало продвигаться в область все более высоких частот (то есть коротких длин волн). Потому что оказалось, что чем короче длина волны, тем меньше габариты L и C . Радиолюбители мастерили свои приемники на $\lambda = 10-80$ метров.

Конструкторы быстро поняли, что, чем выше частота, тем шире спектр радиосигналов, и перешли на генерацию длин волн $\lambda = 1$ метр. Поскольку развивалась техника радиолокации, и было понятно, что угол, в котором сосредоточен пучок и антенна приема должны отвечать минимизации соотношения λ/D , то перешли к созданию устройств радиолокации, которые работали с сантиметровыми волнами.

Естественным препятствием к уменьшению λ являются размеры прибора. Поэтому вместо электроламп стали использовать магнетроны и клистроны. В них колебательный контур был заменен объемным резонатором: полость с проводящими стенками. Токи в стенках вызывали электромагнитное поле в объеме полости. При определенных соотношениях геометрических размеров полости для определенных длин волн возникал резонанс. Уменьшить геометрические размеры не позволяла техника сборки – и клистроны, и магнетроны имели предел – они генерировали только миллиметровые волны.

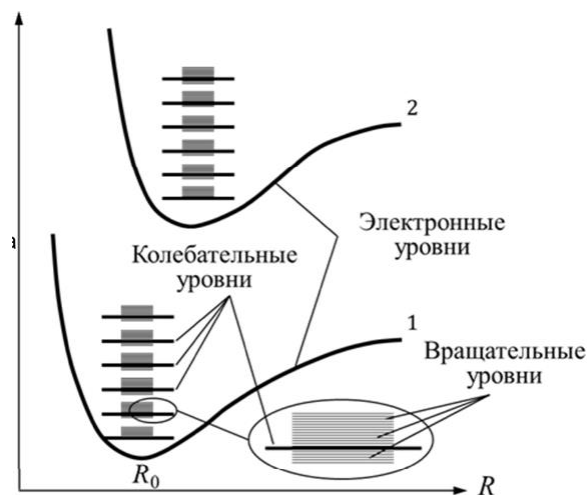
Тут в радиофизике появились новые проблемы: стабилизация частоты искусственных источников радиоволн (монохроматичность) и уменьшения шумов. Потому что под действием внешних факторов (температуры и давления) менялись геометрические размеры индуктивности L и емкости C . Поэтому изобретатели двинулись в технику генерации коротких длин волн. Техническое решение нашли в создании молекулярных генераторов и резонаторов.

К тому времени из оптики уже было известно, что атомы и молекулы являются колебательными частицами со своими стабильными колебательными характеристиками. Частоты колебаний возбужденных частиц соответствуют определенным значениям энергии. Обобщая результаты теории квантового испускания света Планка ($E = h\nu$), явления фотоэффекта, открытого Герцем, модели атома Резерфорда, Бор в 1913 году представил свою модель атома. В ней электрон e может вращаться по орбитам, которые соответствуют определенным энергиям – энергетическим состояниям. И переход с одного уровня на другой уровень происходит либо с испусканием кванта, либо с поглощением кванта. Эйнштейн в 1917 году создал теорию испускания и поглощения света атомами.

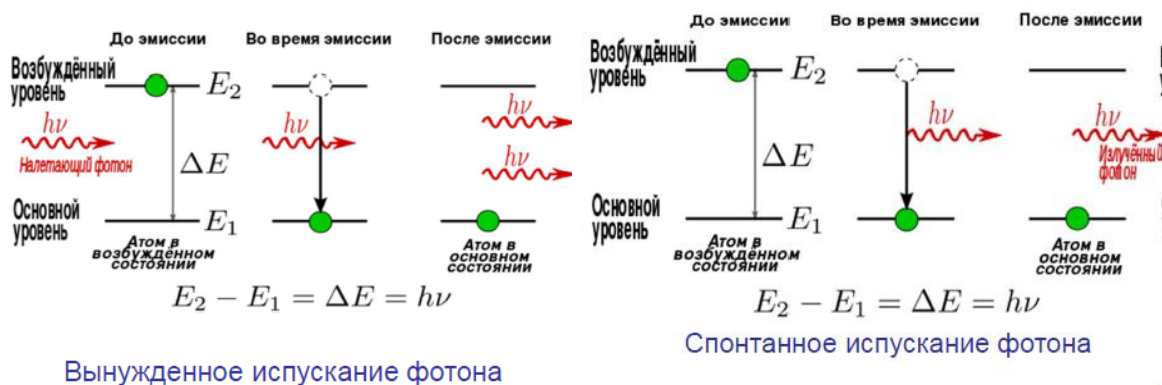
Он рассмотрел взаимодействие фотонов с системой (атом или молекула), обладающей двумя энергетическими уровнями E_1 и E_2 . Причем энергия фотона совпадает с разницей энергий:

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Значит, излучение в виде квантов определенных энергий взаимодействует с миниатюрными колебательными системами (атомными и молекулярными), имеющими определенные собственные частоты, соответствующие переходу с одного уровня энергии на другой. Излучение при переходе между уровнями может иметь очень узкий спектр. Таким образом, можно получить стабильное излучение.



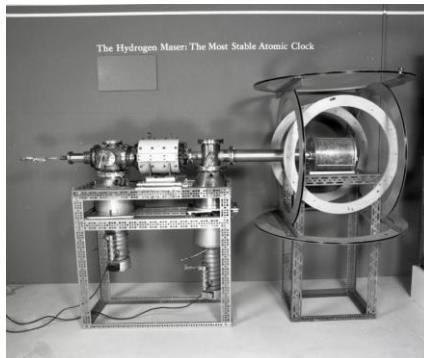
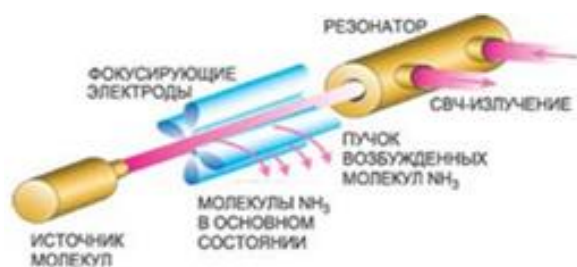
Долгое время не удавалось подтвердить теорию экспериментом, так как вынужденное излучение невозможно было выделить на фоне спонтанного излучения.



В это время в радиофизике развивалась радиоспектротометрия. Изменяя длину волны радиочастот, изучались функции поглощения радиоволн в атмосфере. Продвижение в сторону коротких длин волн столкнулось с сильным поглощением радиоволн молекулами H_2O , CO_2 , O_2 , N_2 в атмосфере. Особенно ослабляли радиосигнал молекулы H_2O , вращательные колебания которой соответствуют линиям сантиметрового и миллиметрового диапазона.

Большие λ радиодиапазона, то есть малые ν означали, что расстояние между E_1 и E_2 мало. Эту разницу тяжело зарегистрировать. Значит надо либо увеличить кювету с газом, либо увеличить концентрацию газа (путем охлаждения). Увеличение кюветы с газом ограничено размерами лаборатории. Увеличение концентрации газа останавливает конденсация газа.

Выход из положения нашелся в 1954 году в конструкции, где молекулы аммиака продували через неоднородное магнитное поле и таким образом разделяли молекулы на те, которые имели энергию E_2 , и те, которые имели энергию E_1 . К такому решению пришли одновременно две группы ученых: одна в СССР – Николай Геннадьевич Басов и Александр Михайлович Прохоров, другая в США – Чарлз Таунс. Они одновременно получили генератор СВЧ-волн с $\nu = 32870$ МГц ($\lambda = 1,26$ см). В США устройство генерации микроволн называли MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) – усиление СВЧ-волн с помощью индуцированного излучения.



Молекулярные пучки имели низкую интенсивность. Чтобы ее повысить, стали использовать верхний возбужденный уровень и открытый резонатор. Так появился LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), за изобретение которого Н.Г.Басов, А.М.Прохоров и Ч.Таунс получили нобелевскую премию в 1962 году.



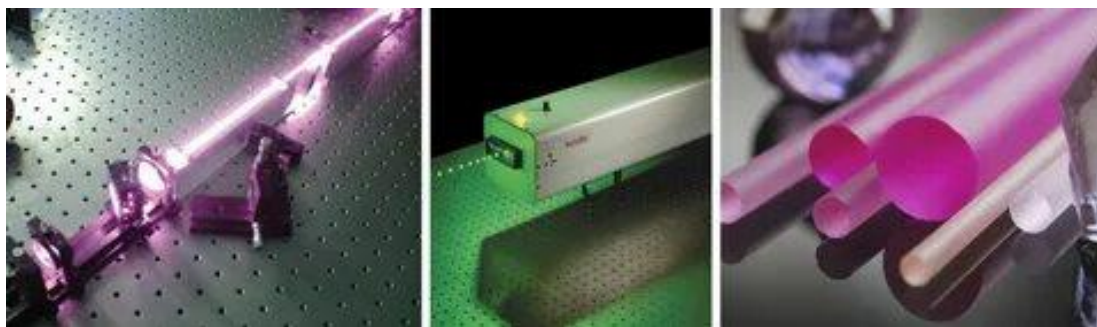
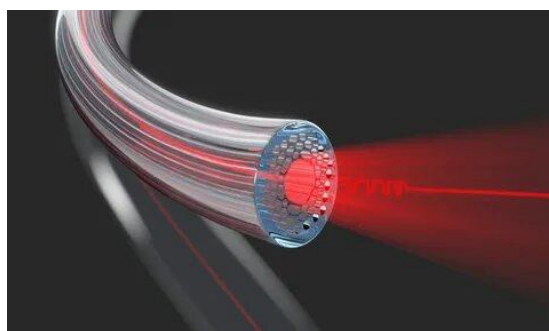
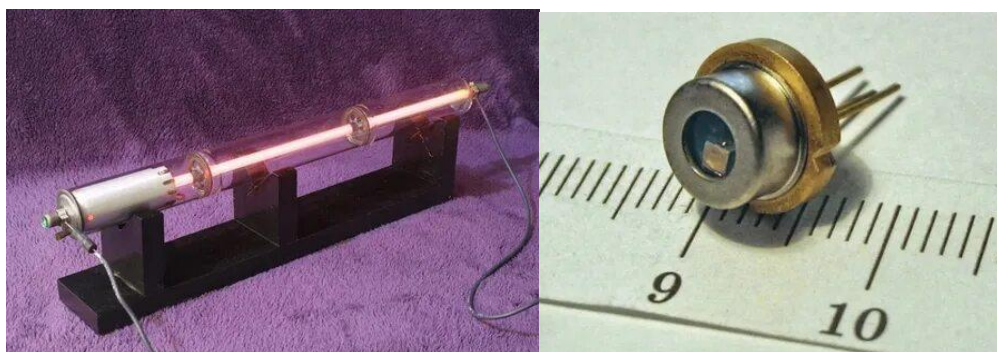
Лазеры – это устройства, создающие направленный поток света, основанный на излучении света атомами среды (активной среды), в результате чего высвобождается энергия (*вынужденное излучение*). Этот процесс представляет собой явление, когда атомы с низкой энергией получают энергию от атомов с высокой энергией, и пока в среде есть атомы с разницей энергий, то такой процесс поглощения существует всегда. Поскольку в ансамбле атомов материала число атомов с высокой энергией всегда меньше, чем число атомов с низкой энергией, то обычное поглощение преобладает над вынужденным излучением. Однако если атомам среды тем или иным образом придать энергию (произвести *накачку активной среды*), то число атомов с высокой энергией возрастет и может стать большим, и тогда падающая на среду внешняя световая волна усилится. Но это произойдет лишь при условии, если частота падающей световой волны (или длина волны) соответствует свойствам этих атомов среды (*резонанс*). Производить накачку активной среды можно либо путем подачи электрической энергии (так происходит накачка диодных лазеров, CO₂-лазеров), либо световым

излучением (накачка твердотельных лазеров). По режиму работы лазеры классифицируют на импульсные лазеры и лазеры непрерывного действия. По виду активной среды лазеры делятся на газовые, жидкостные, полупроводниковые и твердотельные. По способу накачки различают: лазеры с оптической накачкой, газоразрядные лазеры, химические лазеры, инжекционные лазеры и лазеры с электронной накачкой.

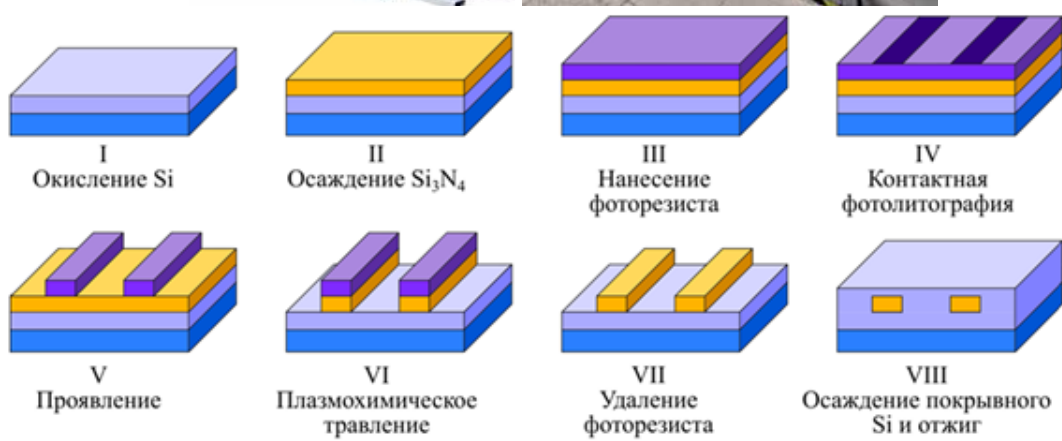
Основные части лазера: активная среда, резонатор и накачка.



- На схеме обозначены:
1. Рабочая среда
 2. Энергия накачки лазера
 3. Непрозрачное зеркало
 4. Полупрозрачное зеркало
 5. Лазерный луч



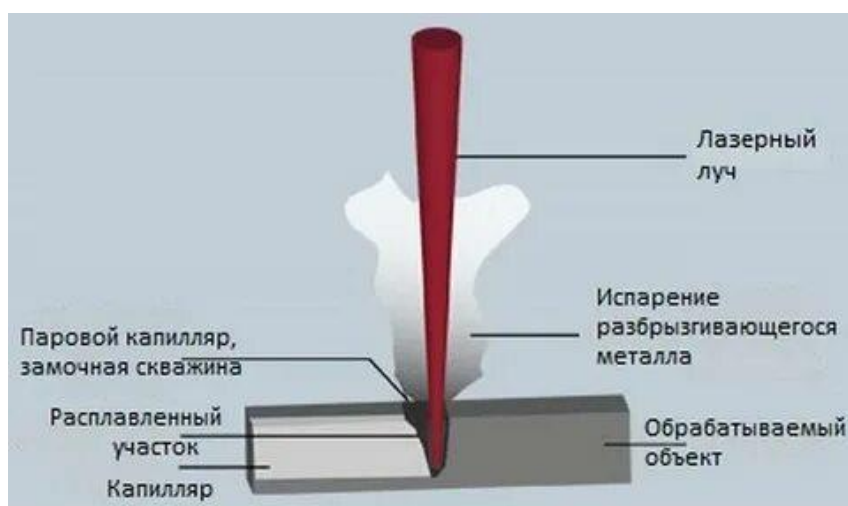
Созданию лазеров сопутствуют технологии изготовления материалов для создания активных сред: вытяжка оптического волокна с помощью башен вытяжки с использованием газа гелия при охлаждении волокна, создание гетероэпитаксиальных структур методами микроэлектроники, выращивание кристаллов из расплава.



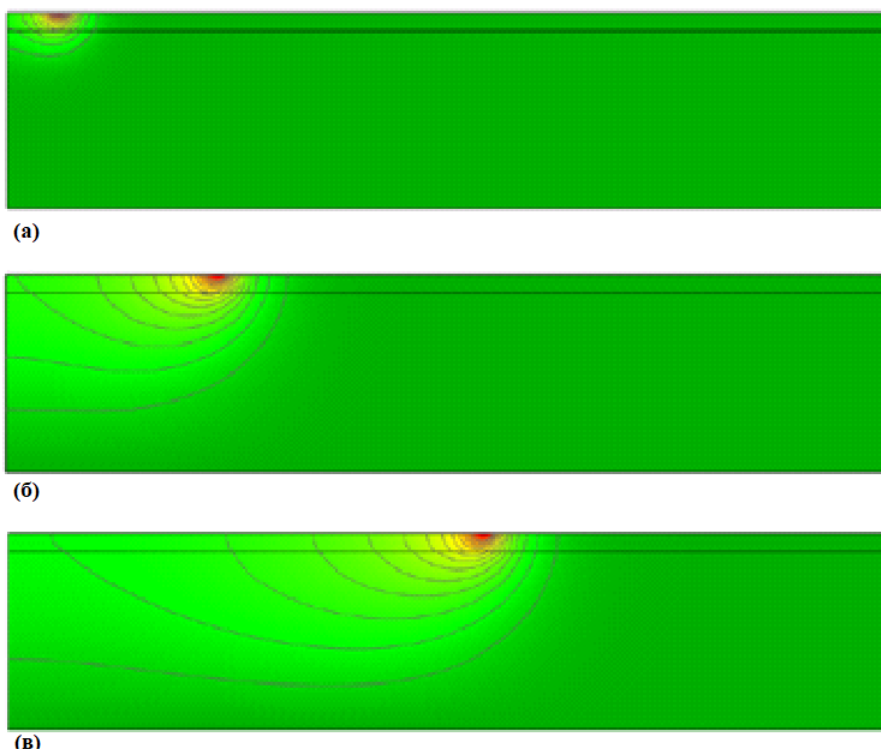
Скорость вытягивания зависит от физико-химических характеристик кристаллизуемого вещества и от диаметра кристалла (чаще всего составляет от 1 до 80 мм/час). Верхний предел скорости роста лимитируется максимально допустимой интенсивностью отвода теплоты.

Освоение технологий фотоники по своей значимости для цивилизации эксперты сравнивают с электрификацией в начале XX века. Трудно назвать область человеческой деятельности, где бы сегодня не использовалась фотоника. Использование энергии в форме лазерного излучения революционным образом обогатило технические возможности человечества. Когерентность этого излучения и обусловленная этим возможность его концентрации в пространстве и в спектральном диапазоне, преобразования с высокой эффективностью по частоте, широкое разнообразие режимов излучения (от непрерывного до ультракоротких импульсов) и механизмов воздействия на вещество (от простого нагрева до селективного возбуждения квантовых систем) позволили создать большое количество принципиально новых методов и технологий, которые перспективны для многих практических применений.

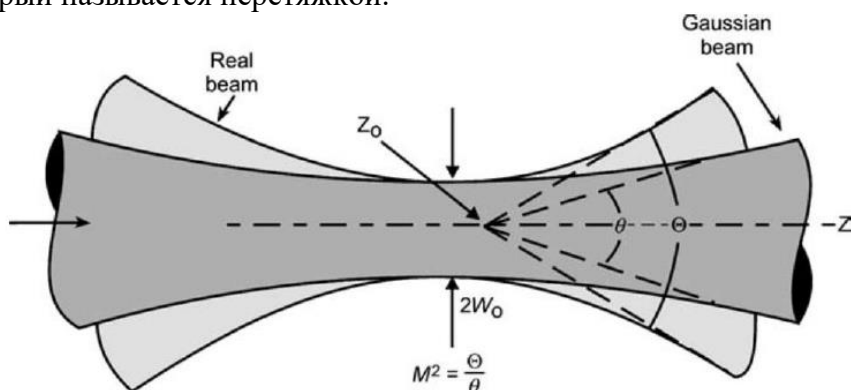
Для любого производства важны новые индустриальные и цифровые технологии получения рентабельной продукции без значительной трансформации рутинных операций. Процессы, которые были классикой обработки металлов – резка, сварка, наплавка, закалка, литье – с использованием мощных лазеров с ультракороткими импульсами приобрели новые улучшенные характеристики.



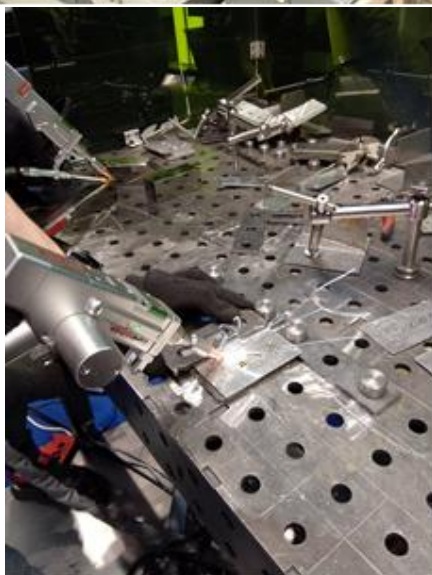
В случае движения лазерного пучка относительно поверхности обрабатываемой детали, лазерный пучок постоянно перемещается от уже нагретых зон детали к холодным, еще не нагретым, зонам. Такое движение обеспечивает баланс между поставляемой лазерной энергией и энергией, необходимой для нагрева холодных участков. Нужный для обработки эффект достигается при соответствующем подборе скорости движения пучка. При этом распределение температуры в лазерном пятне на локальной поверхности детали, оказывающимся в фокальной плоскости пучка, дает максимум в его центре и падение значения температуры по всем направлениям от него как по поверхности, так и в глубину детали.



При этом надо учитывать, что лазерный пучок имеет форму каустики и никогда не может фокусироваться в точку. В фокальной плоскости он имеет минимальный размер диаметра, который называется перетяжкой.



Среди всех сварочных процессов лазерная сварка реализует самые разнообразные соединения металлов или пластиков толщиной от очень тонких листов, примерно 0,01 мм, до толстых пластин, около 150 мм, в среде защитного газа, такого как гелий (He), аргон (Ar) или иногда азот (N₂) в воздушной среде. Данный способ приобрел большую популярность как перспективная высококачественная технология соединения, обеспечивающая высокую точность, высокую производительность, высокую скорость, гибкость и низкое искажение

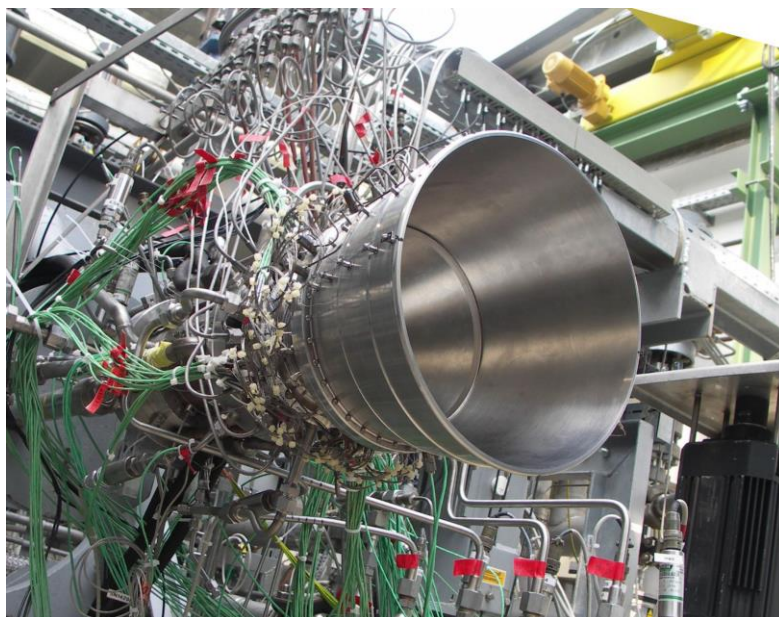


К преимуществам лазерной маркировки относится бесконтактный метод нанесения, высокая скорость маркировки (500 символов в секунду), высокое разрешение (1000 dpi) и точность (0,01 мм) при отсутствии расходных материалов, высокой экологичности и энергопотреблении в 0,5 кВт.

Другая технология, набирающая скорость внедрения в производственные процессы – это аддитивные технологии лазерного сплавления и спекания. Аддитивным технологиям, использующим в своей основе металлические порошки, чуть менее 30 лет. Инновация появилась в 1992 году, а индустриального применения она достигла только в 2002 году – 10 лет развития технологии. Методы, отражающие их суть, сильно различаются между собой, но и имеют много схожих черт. Более похожи между собой методы SLM (селективное лазерное плавление) и SLS (селективное лазерное спекание). Если в SLS-технологии частицы порошка спекаются друг с другом и не расплавляются полностью, то в SLM-технологии происходит прямое плавление (это улучшает микроструктуру получаемого изделия). Базовая основа обоих методов – это разработки Института Лазерных Технологий Фраунгофера (Германия) и компании TRUMPF. Им принадлежат первые "ноу-хау" технологии в 1992 году. А компания TRUMPF продала лицензию на использование технологии "Powder Bed" – опускание платформы после каждого шага спекания одного слоя порошка под действием лазерного луча на глубину, равную высоте этого слоя.



В 1998 году зрители впервые увидели печать деталей на основе металлических порошковых сплавов. Затем в 1992–2002 годы эти технологии развились до индустриального применения, и появилось много запатентованных изобретений. С тех пор начался стремительный взлет компаний, использующих аддитивные технологии (АТ), который сопровождался бурной историей разделений и слияний. Аддитивные технологии испытали на себе взрыв интереса со стороны потребителей. В 2003 году появилось оборудование на основе волоконных лазеров, а в 2006 году были выпущены модели под размер платформы 125 мм. В этом же году впервые удалось произвести печать на основе титановых и алюминиевых сплавов. В 2007 году в производстве волоконных лазеров удалось достичь мощности 400 Вт, а это значит, что удалось дойти до плавления вещества и обеспечить возможность создания платформы большего размера. В 2009 появилась первая платформа 250 мм. Теперь, когда в конструкции стали использовать четыре волоконных лазера, появились машины для аддитивной печати металлических порошков с размером платформы 500 мм, а более позднее и 2000 мм.



В 2008–2010 годах началось удешевление АТ-оборудования, и возникла возможность стабильной 3D-печати в металле путем послойного спекания гранул мелкодисперсных порошков сплавов стали, алюминия, никеля и титана. Понятно, что если использовать титановые или алюминиевые сплавы, то можно уменьшить вес. Но это очень горючие материалы, потому что они являются взрывоопасными порошками и работа с ними очень сложна. Для обеспечения безопасности работы с ними в рабочей камере первоначально создается вакуум, а затем камеру заполняют инертным газом. Сплавление происходит в среде аргона или другого инертного газа. Доля остаточного кислорода не более 0,1%.

Фотоника имеет принципиальное значение для систем связи и систем оптических коммуникаций. Основные магистральные линии связи построены на оптическом волокне с использованием фотонных приборов. Ежегодный рост трафика в сети Интернет в последние годы составляет примерно 60%. Применение фотонных интегральных схем, оптических переключателей и соединителей, повсеместный переход на оптоволоконные сети позволят достичь 1000-кратного увеличения объемов переносимой информации.

Без оптики в современных линиях связи (особенно магистральных) не обойтись. Это связано с тем, что для передачи любого высокочастотного модулированного сигнала (в аналоговом или цифровом формате) необходимо, чтобы несущая частота опорного сигнала была существенно выше частоты информационной модуляции. Несущая частота света приблизительно 10^{15} Гц, частоты же информационной модуляции (без учёта мультиплексирования) не превышают 10^{11} Гц, что на четыре порядка ниже световой частоты. Поэтому свет является идеальной несущей с точки зрения повышения ёмкости информационного потока. Генератором светового опорного сигнала (10^{15} Гц) служит обычно лазер, а информационная модуляция осуществляется либо прямой модуляцией лазера (в формате амплитудной модуляции до частот порядка 10^{10} Гц), либо с помощью электрооптического модулятора для более высоких частот и более сложных форматов модуляции. Части оптических систем, отвечающие за преобразование из оптики в электрический сигнал – это детекторы, или приёмники, а из электричества в оптику – лазеры и модуляторы.

Технология плотного спектрального мультиплексирования с разделением по длинам волн (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing) позволяет передавать несколько информационных каналов (отдельных световых волн) по одному оптическому волокну). Это позволяет многократно увеличить суммарный поток

передаваемой по одному волокну информации за счет использования нескольких несущих. Суть спектрального уплотнения заключается в одновременной передаче по одному волокну нескольких независимых сигналов на разных оптических длинах волн. На каждой длине волны организуется отдельный оптический канал передачи информации со своим передатчиком и приемником. Количество каналов может составлять от двух (в самых простых системах) до сотни и более (при использовании расширенного спектрального диапазона). Кроме того, для мультиплексирования информационных потоков используются разные поляризации светового поля, что позволяет вдвое увеличивать количество передаваемой информации на одной длине волны. Ну и, наконец, таких длин волн может быть несколько сотен.

Для повышения спектральной эффективности необходимо повысить скорость передачи данных при той же занимаемой спектральной полосе. Для этого используются многоуровневые форматы модуляции. Однако, при этом неизбежной платой за повышение скорости является снижение качества передаваемого сигнала и, как следствие, снижение дальности передачи.

Прибор, на который возложены функции преобразования электрического сигнала в оптический, называется трансмиттер (передатчик). Он состоит из источников когерентного излучения (лазеров), модуляторов (современные модуляторы могут одновременно модулировать и амплитуду, и фазу оптического сигнала), а также необходимых пассивных оптических элементов и электроники. Ранее все эти компоненты поставлялись и монтировались отдельно. Но с внедрением в фотонные изделия микроэлектронных технологий все эти компоненты изготавливаются сразу в рамках сложного, многоступенчатого технологического процесса. Такие изделия носят название фотонные интегральные схемы (ФИС).

Принципиально новая ступень развития фотоники связана с фундаментальным процессом перехода от электронно-ориентированных систем (то есть систем, функциональные характеристики которых обусловлены свойствами электронов) к фотонноориентированным системам. Электрон, будучи простым в управлении, в то же время обладает заметной массой, а значит и инертностью. Частоты, с которыми оперируют электронные устройства, фундаментально ограничены величинами приблизительно 100 ГГц.

Фотон сам по себе является невзаимодействующей частицей, и поэтому плохо управляем. Но связанные состояния фотонов и электронов в самых разнообразных формах (квазичастицы) представляют собой как раз тот набор элементарных состояний, которые с одной стороны движутся со скоростью фотона, а с другой – прекрасно управляемы внешними полями.

Именно этот переход от электронно-ориентированных систем к системам на основе квазичастиц и представляет собой принципиально новый магистральный путь развития. Интегральная фотоника – это изучение, производство и применение фотонных систем, которые преобразуют «электронные сигналы» в «оптические сигналы», облегчая передачу как электрических, так и оптических сигналов. Использование фотонных интегральных схем (ФИС) позволяет увеличить скорость обработки и передачи данных в несколько десятков или даже сотен раз, уменьшить размеры функциональных элементов электроники. Это достигается за счет интеграции на чипе одновременно электронных и оптических компонентов, способных принять световой сигнал, обработать его и транслировать дальше. По мере дальнейшего развития технологий мы переместимся в эпоху «полностью оптической сети». Это означает, что вся связь между чипами будет опираться на оптические сигналы, включая хранение, передачу, коммутацию и обработку, причем все они будут передаваться как оптические сигналы.

Сейчас ФИС широко применяются в телекоммуникациях, в трансиверах – приборах, необходимых для одновременной обработки и передачи светового сигнала,

пришедшего по оптическому волокну. Рынок потребления трансиверов растет, так как становится все больше передаваемых данных, появляются новые дата-центры. В настоящее время многие международные компании активно внедряют технологии интегральной фотоники.

Другое крупное направление фотоники – это астрофизика, многоспектральная астрономия, дистанционное зондирование Земли и космическая навигация.

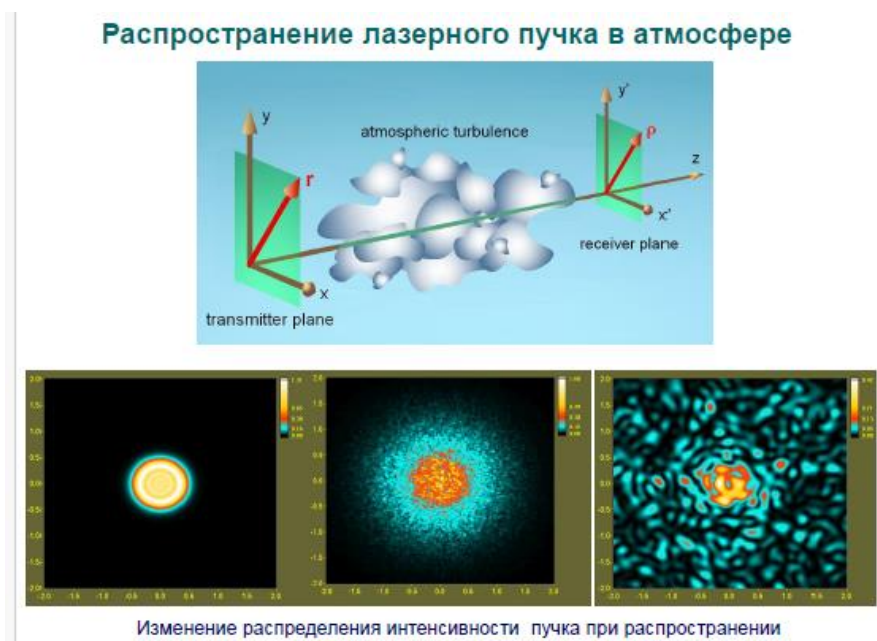
Лидары установленные на борту космических аппаратов, которые производят мониторинг земной поверхности, предоставляют информацию для навигации, экологической безопасности и задач связанных с построением карт местности. Лидары широко применяются в военных целях, их используют для высокоточной системы наведения, управления боевыми аппаратами, дальнометрии, батиметрии.

Первые конструкции лидаров использовали один лазерный пучок, что давало хорошие результаты, но со временем потребность в большем объеме информации и получения ее за короткий интервал времени привели к необходимости создания многолучевых лидаров, имеющих большое количество лучей. Лидары служат для измерения количества и выявления структуры атмосферных осадков, дают информацию для оценки механизмов, благодаря которым, возможно выявить изменения уровня моря на глобальном уровне. Также они используются для определения толщи морского льда, оценки размера растительности, измерения углекислого газа в растениях, мониторинга деформаций ледников, движения магмы и извержения вулканов, что важно для понимания глобальных изменений.



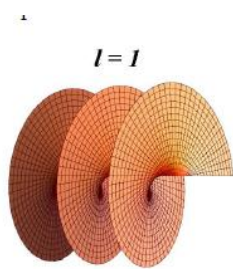


При распространении лазерного луча в атмосфере он подвергается влиянию флуктуаций атмосферы. При изучении ее влияния на получаемые изображения родилось новое современное направление – сингулярная оптика. В рамках теории сингулярной оптики изучаются явления, связанные с фазовыми сингулярностями (дислокациями) в волновых полях, исследуются свойства оптических вихрей, физические механизмы их образования.



Из наблюдений замечено, что вихревые природные структуры обладают устойчивостью. Поэтому возникла идея использовать для передачи информации вихревые лазерные пучки, обладающие орбитальным угловым моментом.

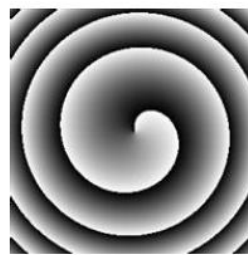
Оптический вихрь – это свет, волновой фронт которого представляет собой винтовую поверхность, ось которой совпадает с направлением распространения света. Для характеристики вихря используется значение топологического заряда, зависящее от количества полных оборотов волнового фронта вокруг своей оси на одной длине волны. Чем выше заряд, тем быстрее «закручивается» свет, а направление закручивания определяется положительным или отрицательным знаком заряда. С момента своего открытия оптические вихри нашли широкое применение в телекоммуникации и оптических .



волновой фронт



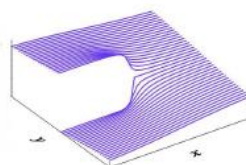
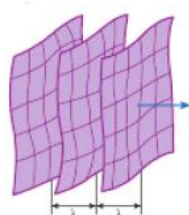
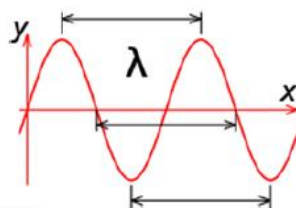
интенсивность



фаза



Волновой процесс

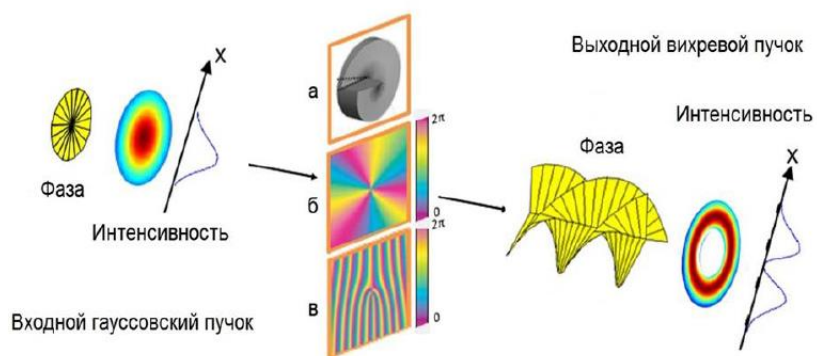


Структура волновых фронтов

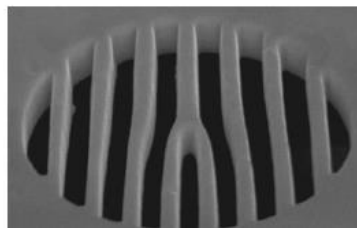
Аналогии



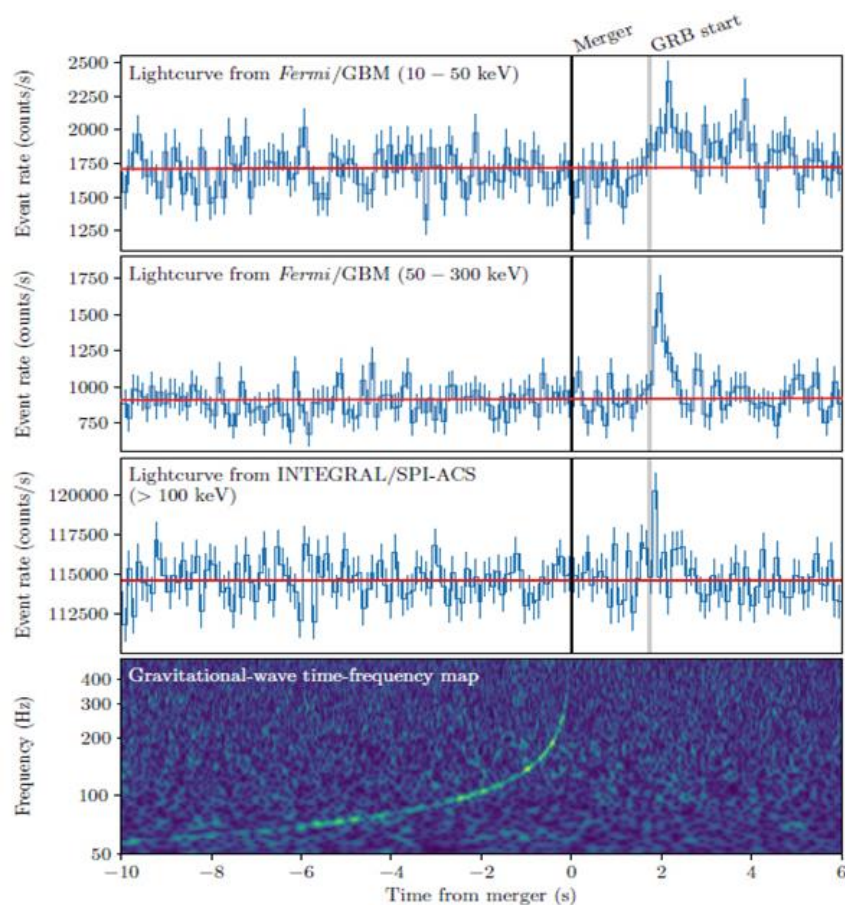
Генерация вихревых лазерных пучков



Методы конвертации: спиральная фазовая пластина (а), фазовая голограмма со спиральным фазовым распределением (б), фазовая голограмма с изображением «вилочки» (в)



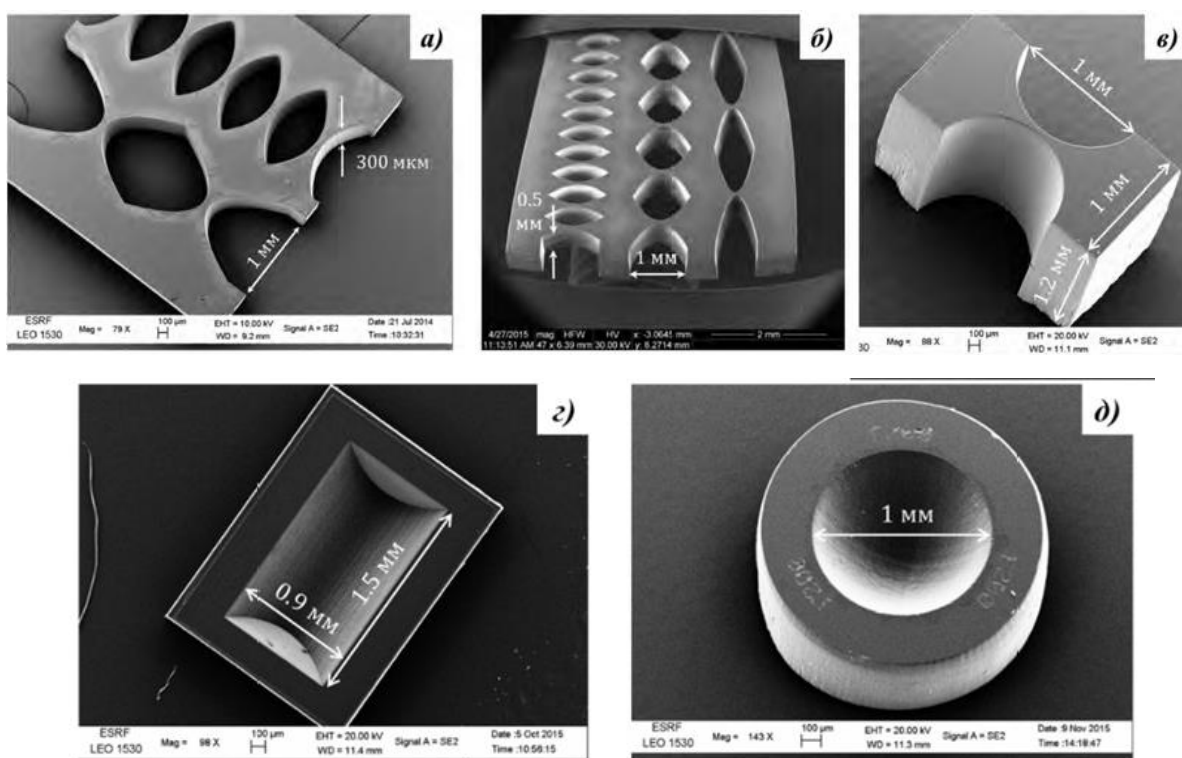
17 августа 2017 года впервые одновременно наблюдались гравитационно-волновой и электромагнитный сигналы, рождённые при слиянии нейтронных звёзд в двойной системе. События практически одновременно зарегистрированы детекторами эксперимента LIGO и космическими обсерваториями ИНТЕГРАЛ и Fermi. Сравнение времен прихода гравитационного и электромагнитного сигналов (запаздывание ~ 1.7 сек) позволило установить, что скорость распространения гравитационных волн с высокой точностью совпадает со скоростью света.



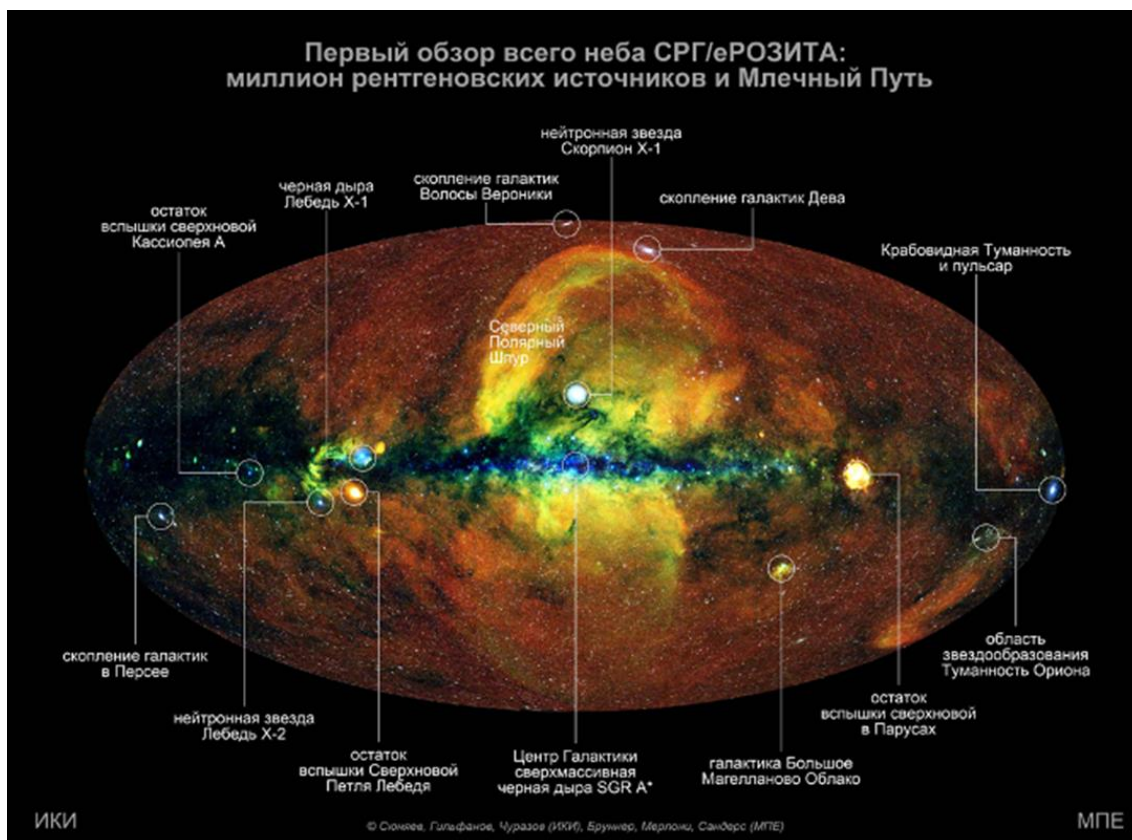
Благодаря короткой длине волны, низкому рассеянию и резонансному характеру взаимодействия с веществом, излучение рентгеновского диапазона предоставляет уникальные возможности для диагностики объектов. Наибольший объем информации о физических процессах, происходящих во Вселенной, получается из исследований в диапазонах ЭУФ и рентгене.

В рентгеновском диапазоне практически все материалы имеют показатель преломления, близкий к единице, причём вакуум для рентгеновских лучей является оптически более плотной средой, чем вещество, поэтому фокусирующие линзы должны быть выполнены в виде пустот в материале. Кроме того, отдельная линза имела бы чрезвычайно большое фокусное расстояние, что делает её непригодной для применения.

Проблема укорочения фокусного расстояния решается созданием в определённом материале, прозрачном для рентгеновских лучей пустот определённого размера и формы, которые ведут себя как стопка линз, а также, путём создания отдельных параболических линз, набор из которых имеет достаточно короткое фокусное расстояние. Элементы рентгеновской оптики на основе алмаза также выполняются с помощью лазерных технологий.



Российская орбитальная обсерватория «Спектр-РГ» функционирует на орбите с конца 2019 года и регулярно дает уникальные данные, обеспечивающие новые открытия в области астрофизики. Построена лучшая в мире детальная карта всего неба в рентгеновских лучах.



И вновь при построении средств групповой и индивидуальной радиоэлектронной защиты от дистанционного воздействия несанкционированных радиоканалов различного назначения повстречались два направления — радио и фотоника. Радиофотоника изучает взаимодействие между оптическими и радиочастотными электромагнитными полями в различных нелинейных средах и устройствах для создания новых методов генерации, управления, приема, обработки и анализа СВЧ-сигналов средствами фотоники.

Достоинства фотоники в отсутствии чувствительность к электронным наводкам, в том числе и к преднамеренным, а также сверхширокополосная обработка принятого радиосигнала в оптоэлектронном процессоре, соединилось с высокой эффективностью методов обработки радиосигналов.

Очевидные преимущества радиофотонных приемников СВЧ-сигналов — это чрезвычайно широкая полоса, которая может составлять 100 ГГц и более, возможность программного управления режимами работы, гибкость формирования новых устройств, выполняющих те или иные функции, защищенность от электромагнитных помех, массогабаритные характеристики и низкая стоимость при массовом производстве. Преимущества радиофотоники отражены не столько в быстродействии, сколько в возможности работать в жестких условиях подавления радиосвязи.

История науки и техники сделал круг. Радио и фотоника соединились в направлении радиофотоники.