

День рождения оптоволоконна

На сегодняшний день остается неразрешенным вопрос: "Какую дату по праву можно считать днем рождения оптоволоконна?". Быть может день, когда был сформулирован Закон Снеллиуса, описывающий преломление света на границе двух сред (984 г.)? Или день, когда немецкий математик, астроном и оптик Иоганн Кеплер впервые описал закон полного внутреннего отражения (1600 г.)? Или, когда швейцарский физик Даниэль Колладон и французский физик Жак Бабинье впервые продемонстрировали отражение светового луча в струе воды, показав, таким образом, возможность передачи светового луча в заданном направлении (1840 г.)? Или может, когда Норманн Р. Френч изобрел оптическую телефонную систему, в которой речевые сигналы могли передаваться через сеть оптических линий, изготавливаемых из стержней чистого стекла (1934 г.)?

Хотя закон назван в честь голландского астронома Виллеброрда Снеллиуса (1580-1626), он был впервые точно описан ученым Ибн Сахль в 984 г.

Напомним, что Кеплер также является первооткрывателем законов движения планет Солнечной системы.

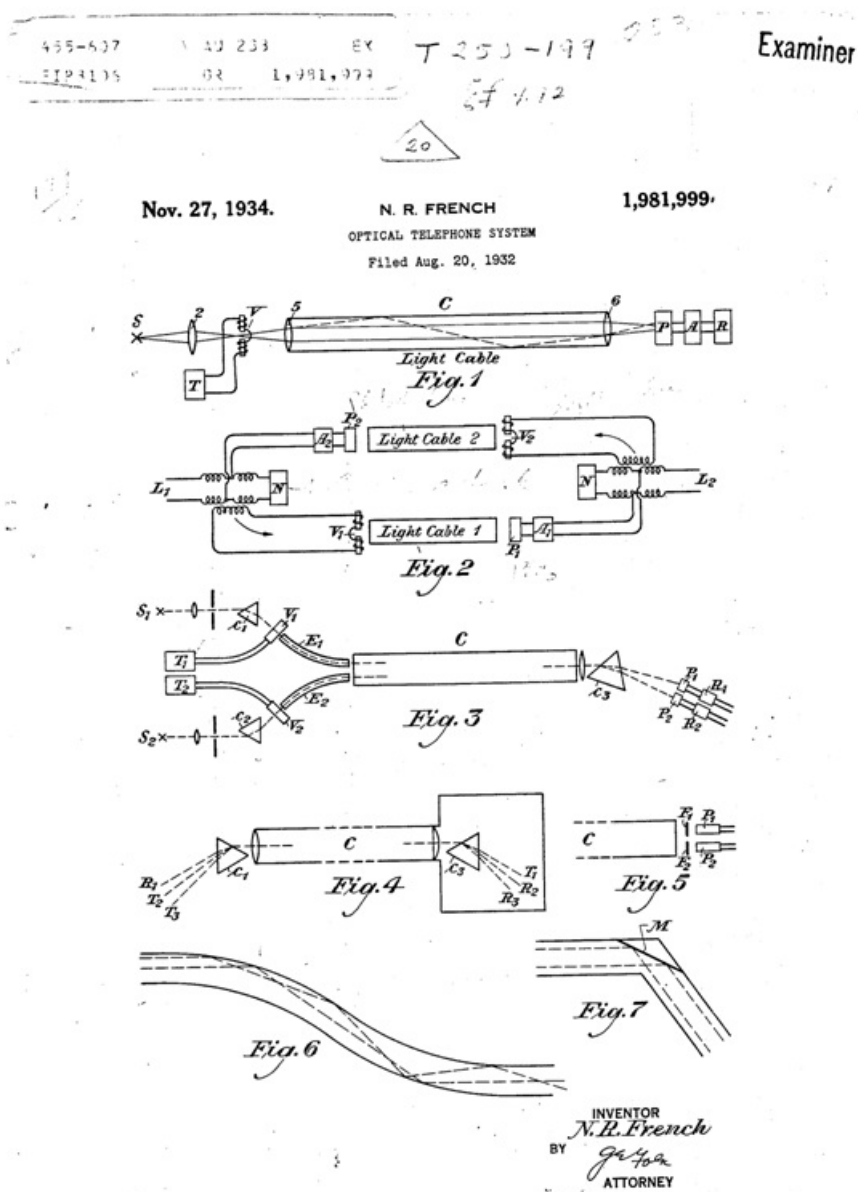


Рис. 1 Оптическая телефонная система Норманна Френча

Несомненно, каждое из этих открытий является важным событием для волоконной оптики, однако, наверное, все-таки самые значимые исследования в этой области произвел Чарльз Као Куэн – ученый родом из Китая. Сегодня он позиционируется уже как китайский, британский и американский ученый, автор ключевых исследований в области разработки и практического применения волоконно-оптических технологий, значительно повлиявших на развитие индустрии телекоммуникаций. Вообще Као скромно называют "Отцом оптоволоконной связи". В 2009 году ему присудили половину

Нобелевской премии по физике за "новаторские достижения в области передачи света по волокнам для оптической связи". Стоит отметить, что другая половина премии досталась Уилларду Бойлу и Джорджу Смиту, которые изобрели ПЗС-матрицы.

В 1966 г. Као представил результаты своего исследования в IEE (не путайте с международной ассоциацией IEEE, IEE – это Британская организация Institution of Electrical Engineers). Основная идея отчета научной работы Као состояла в возможности организации оптической связи с помощью стеклянного волокна (новизна идеи, в первую очередь, заключалась в представленных конструктивных особенностях волокна и его материалов). Изложенные в этом документе идеи по использованию волокна для потребностей связи по праву можно считать основой волоконно-оптических телекоммуникаций сегодняшнего дня. Таким образом, если считать данную работу Као началом становления и развития современной эпохи волоконно-оптической связи, то **у оптоволоконна в этом году юбилей – ему исполнилось 50 лет!**

Однако, впервые термин fiber optic (оптическое волокно) было использовано Американской компанией NS Карану в 1956 г. Если это событие считать днем рождения волокна, то получается другая круглая дата – **волокну 60 лет!**

То, что сегодня мы считаем само собой разумеющимся, в том числе высокоскоростной Интернет, межконтинентальная связь и даже мобильные сети – все, так или иначе, связано с оптоволоконными линиями связи. В этом нет ничего удивительного, ведь оптическое волокно сегодня по праву можно считать самым совершенным видом линий связи. ВОЛС обеспечивают более высокую пропускную способность при значительно меньшей стоимости на более большие расстояния, в сравнении со всеми другими линиями, будь то коаксиальный кабель, радиорелейные или спутниковые линии связи.

Интересные факты из истории волоконной оптики

Стоит отдать дань уважения всем исследователям, повлиявшим на развитие сферы волоконной оптики – в какой-то степени благодаря им сегодня мы имеем развитый высокоскоростной Интернет и можем общаться на данном форуме. Сейчас мы не ставим перед собой цель освятить всю историю становления волоконно-оптической связи, а рассмотрим лишь наиболее интересные с нашей точки зрения моменты.

Эксперимент с отражением светового луча в струе воды немного позднее Колладона и Бабини проводил английский физик Джон Тиндалл. Он досконально изучил данное явление, и вот что он записал в своей книге: "Если угол, под которым падает луч света из воды в воздух (т.е. угол между поверхностью двух сред и перпендикуляром), превышает 48 градусов, то луч не выходит из воды – он полностью отражается от границы вода-воздух... Если наименьший угол падения, при котором наблюдается полное внутреннее отражение, назвать предельным углом, то для воды он будет равным 48°27", для бесцветного стекла (флинтглас) – 38°41", а для алмаза – 23°42".

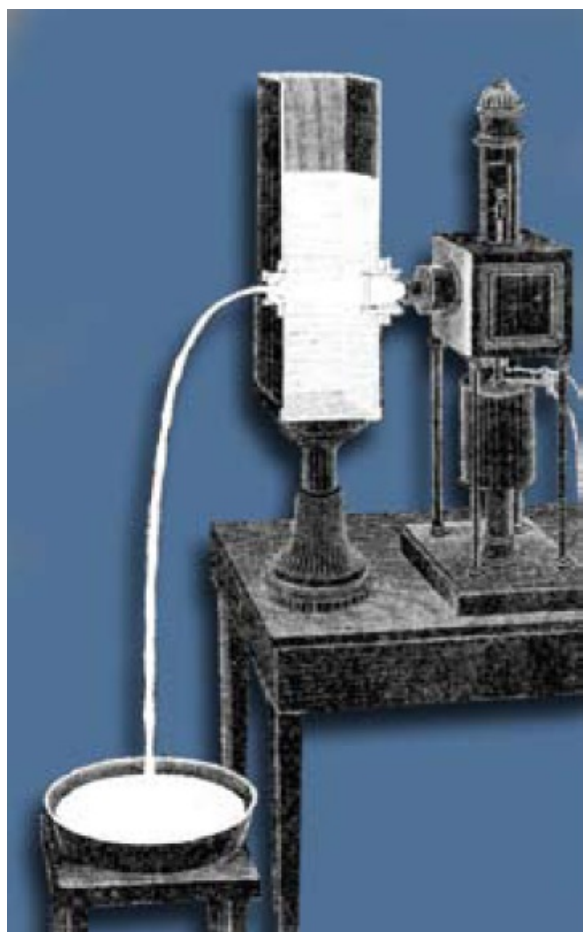


Рис. 2 Экспериментальная установка Джона Тиндалла



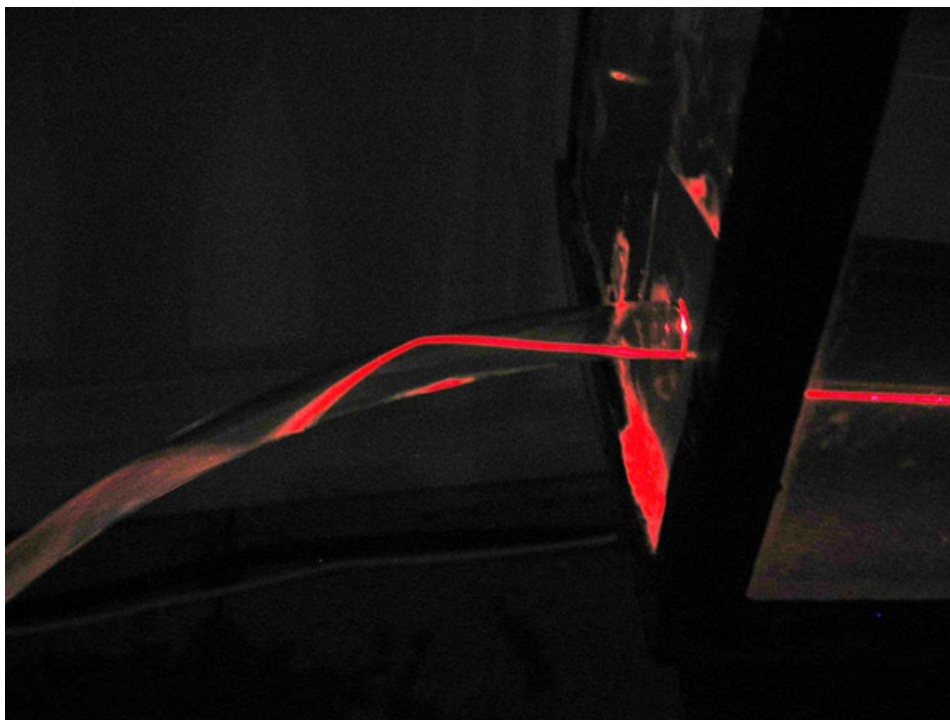


Рис. 3 Современные интерпретации опытов Джона Тиндалла

Можете сами провести этот эксперимент в домашних условиях и позабавить, таким образом, например, своих детей. Берем лазерную указку и светим под разными углами в ванной на струю воды из под крана. Подобрал нужный угол, можно добиться полного внутреннего отражения светового луча в потоке воды. Этот опыт будет еще более эффектным, если струя воды будет падать не строго вертикально, а под некоторым углом.



Рис. 4 Современные интерпретации опытов Джона Тиндалла

Если у вас нет лазерной указки, подобный эксперимент можно также провести и с обычным фонариком, однако в этом случае лучше всего взять прозрачную пластиковую бутылку (объемом 1-2 литра), и сбоку около ее дна сделать отверстие диаметром примерно пол сантиметра. Наливаем в бутылку воду, через проделанное отверстие начинается литься вода, с противоположной стороны бутылки светим фонариком. Если под струю воды подставить ладонь, то на ней можно будет наблюдать яркое световое пятно.

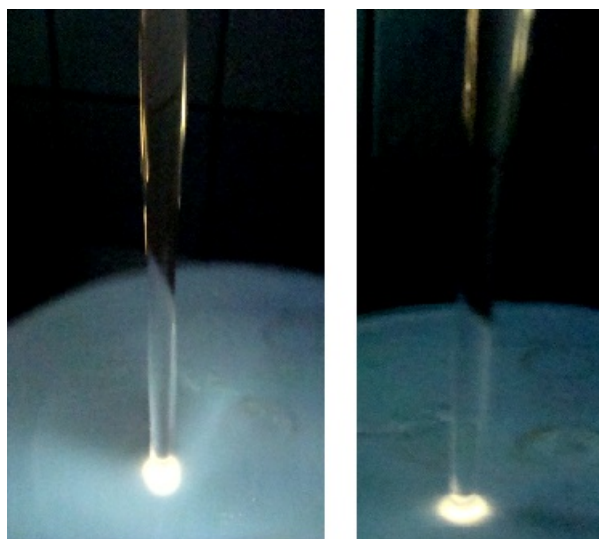


Рис. 5 Интерпретация опыта домашних условиях с помощью фонарика

Рассмотрим далее примечательные факты из более поздней истории волоконной оптики. Активные разговоры о волоконных световодах начались еще в начале 50-х годов прошлого века, именно к этому моменту научились их делать из различных прозрачных материалов. Но световоды того времени были недостаточно прозрачны, и при длине 5-10 метров свет в них полностью поглощался.

Стоит отметить, что в то время в сфере волоконной оптики СССР ничуть не отставал от западных стран, и даже наоборот, отечественные разработки во многом опережали иностранные. На первой общеевропейской конференции по волоконно-оптической связи в 1976 году лидерами в этой области были названы СССР и Япония.

У нас в стране первая оптическая линия связи была запущена в эксплуатацию в 1977 году в Зеленограде, соединив администрацию города с научным центром и предприятиями Северной промзоны. Изготовлена она была на оптическом кабеле разработки особого конструкторского бюро кабельной промышленности (ОКБ КП), входящего в Концерн "Радиоэлектронные технологии" (КРЭТ) Государственной корпорации Ростех, специализирующегося на производстве кабелей и кабельных сборок.

В мае 1981 года было принято Постановление ЦК КПСС и СМ СССР "О разработке и внедрении световодных систем связи и передачи информации". С его выходом было положено начало организации широкомасштабных работ в области ВОЛС. Оно поставило перед предприятиями заинтересованных министерств задачи по созданию (оптических волокон) ОВ и кабеля, оптоэлектронной элементной базы, контрольно-измерительной аппаратуры, специального технологического оборудования оптических соединителей и других компонентов.

В 1958 г. советские ученые В.В. Варган и Т.И. Вейнберг доказали, что "...светопоглощение стекол обуславливается примесями красящих металлов, вносимыми шихтой, и продуктами разьедания огнеупоров; экспериментально показано, что светопоглощение идеально чистого стекла очень мало и лежит за пределами чувствительности измерительных приборов".

Этот факт также четко осознал Чарльз Куэн Као совместно с Джорджем Хокхэмом в 1966 г. в лондонской лаборатории [ITT Corporation](#). В 1960-е годы волокно имело затухание 1000 дБ/км и более. Для возможности передачи информационного сигнала внутри волоконно-оптических каналов Као пытался достичь порогового значения величины затухания сигнала, по крайней мере в 20 [дБ/км](#). Но даже с таким затуханием дальность оптической линии была крайне мала. Данное обстоятельство подстегнуло исследователей к поиску материалов, которые лучше всего соответствовали бы установленным критериям. Специально для этих целей Као собрал коллектив из четырёх человек, в который, включая его самого, вошли Т. Дэвис, М. Джоунс, С. Райт. Тестируя разные материалы, группа приходит к выводу, что наиболее подходящим кандидатом для осуществления волоконно-оптической связи является [кварцевое стекло](#) (SiO_2), в котором наблюдался наименьший уровень затухания сигнала.

Као также утверждал, что основная причина затуханий в стекловоллокне состоит не в фундаментальных физических эффектах, например, рассеивание, как думали в то время многие физики, а в примесях стеклянного материала, которые можно удалить. Это привело к глобальному исследованию и производству сверхчистых стекловолокон. Когда Као предложил, что такое стекловоллокно можно использовать для передачи информации на дальние расстояния, и что оно может заменить медные провода, составляющие основу телекоммуникаций того времени, большинство его идеи не восприняли всерьез. Отметим, что на ранней стадии разработки оптических волокон Као уже строго предпочел одномодовый режим для дальней оптической связи, вместо того, чтобы использовать многомодовые системы.

В 1969 г. Као совместно с В. М. Джонсоном получил волокно с коэффициентом затухания на уровне 4 дБ/км, что явилось первым доказательством возможности получения сверхпрозрачного стекла. Только с этого момента компания Bell Labs начала серьезно рассматривать волоконную оптику как перспективную телекоммуникационную систему.

В 1970 г. фирма Corning Glass Works (позднее переименованная в Corning Incorporated) произвела оптические волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и достигла коэффициента затухания менее 20 дБ/км на длине волны 633 нм. Впервые кварцевое волокно пропустило световой луч на расстояние до 2 км.

В середине 1970-х он сделал оригинальное исследование по пределу усталости стекловолокна. Позднее Као запустил программу "Терабитная технология", посвященную ограничениям в возможностях обработки высокочастотных сигналов, поэтому Као также известен как "отец концепции терабитной технологий". Као опубликовал более 100 статей и получил более 30 патентов, в том числе на разработку водостойких высокопрочных волокон.

Приведем далее некоторые примеры использования волокон в современных отраслях промышленности и техники.

Области применения оптоволокон, помимо сферы телекоммуникаций

На сегодняшний день область применения оптического волокна не ограничивается лишь телекоммуникационными сетями. Оно используется в самых различных сферах человеческой деятельности. В области медицины ОВ используется в рентгеновских аппаратах. В них оптоволоконно обеспечивает гальваническую развязку между источником высокого напряжения и низковольтным управляющим оборудованием, изолируя, таким образом, пациентов и персонал от высоковольтной части аппаратуры. В распределительных устройствах электрических подстанций ОВ используется в системах защиты как датчик, регистрирующий возникновение дуги. Такой датчик, представляющий собой отрезок оптоволоконна с прозрачным покрытием, регистрирует всей своей поверхностью излучение вспышки света, возникающей при дуговом коротком замыкании.

Датчики на основе оптических волокон применяются в различных измерительных системах, где вследствие экстремальных условий (повышенная радиация, температура или электромагнитное поле) невозможно применение традиционных электрических приборов. Например, в системах измерения температуры в реактивных двигателях самолета, в аппаратах МРТ (томографические медицинские аппараты для исследования внутренних органов, в том числе головного мозга) и др. Датчики на основе оптических волокон могут измерять частоту вибраций, вращения, смещения, скорость и ускорение, вращающий момент, скручивание и другие параметры.

Сегодня разработаны волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), работающие на основе эффекта Саньяка. Данный гироскоп не имеет никаких подвижных частей, что делает его весьма надежным устройством. Конечно, в современных навигационных системах используется целый ряд различных датчиков, позволяющих определить положение подвижного объекта: спутниковая навигация (GPS, GLONASS), гироскопы, акселерометры и т.д. Однако независимую навигационную систему можно создать только на основе инерциальных датчиков, таких как гироскопы. К настоящему времени достигнута разрешающая способность и стабильность нулевой точки оптического гироскопа примерно $0,001^\circ/\text{ч}$. В последнее время кольцевые лазерные гироскопы стали применяться в инерциальной системе отсчета не только в самолетах "Боинг" 757/767, но и в аэробусах A310. В Японии опубликованы сообщения об измерении ими угловой скорости $0,01^\circ/\text{ч}$.

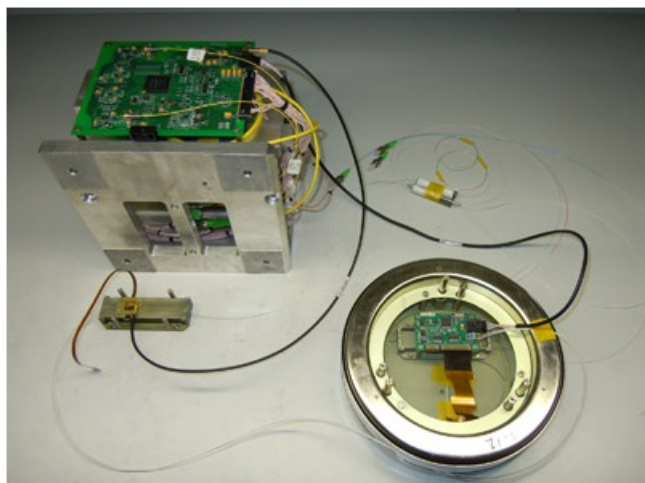


Рис. 6 Пример реализации волоконно-оптического гироскопа



Рис. 7 Трехосевой волоконно-оптический инерциальный измерительный модуль серии ASTRIX производства фирмы AIRBUS DEFENCE&SPACE; в датчик по каждому направлению встроен LiNbO₃ модулятор

Также оптоволокно применяется в охранной сигнализации на особо важных объектах. Когда злоумышленник проникает в запретную зону, условия прохождения света через световод изменяются, и срабатывает сигнализация.

Оптические волокна используются в декоративных целях, включая коммерческую рекламу, искусство и искусственные рождественские ёлки (что сейчас перед Новым годом довольно актуально).





Рис. 8

Периодически создаются новые типы оптических волокон. Например, были разработаны фотонно-кристаллические световоды, в которых распространение света основано на принципах, отличных от полного внутреннего отражения. Такие волокна могут использоваться в качестве газовых, жидкостных или химических датчиков, для транспортировки мощного излучения в промышленных или медицинских целях, для создания новых типов источников излучения на основе нелинейных явлений (при условии заполнения сердцевины газом) и т.д.

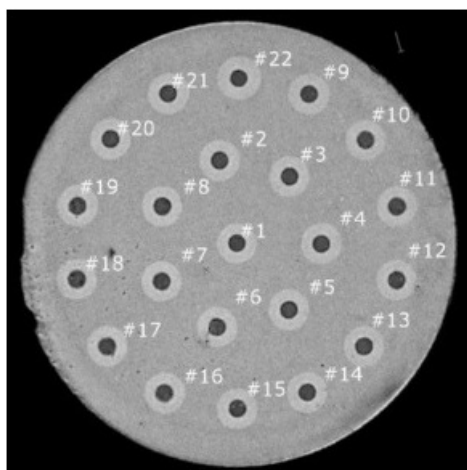
Появляются волоконные лазеры, выходная мощность непрерывного излучения которых достигает нескольких десятков киловатт. Оружие ВМФ США, испытанное в 2014 г., состоит из 6-волоконных 5.5 кВт лазеров, объединенных в один пучок и излучающих через формирующую оптическую систему. Самая высокая мощность одномодового источника когерентного излучения компании IPG Photonics составляет 10 кВт. Самый мощный многомодовый волоконный лазер - установка для резки металлов того же производителя достигает 100 кВт. Волоконный лазер мощностью 4 кВт может использоваться для резки и бурения бетона.

Разрабатываются также ОВ, которые обеспечивают возможность передачи энергии лазерного излучения высокой мощности (нескольких киловатт). Теоретически установлено, что возможна передача излучения мощностью 10 кВт по волокну длиной 250 м при диаметре сердцевины 150 мкм. Главным физическим явлением, которое ограничивает передаваемую мощность, является вынужденное рамановское рассеяние.



Рис. 9 Фотонно-кристаллическое волокно

Также стоит отметить, что сегодня активно разрабатываются многосердцевинные волокна. Их использование позволит значительно увеличить общую пропускную способность ВОЛС.



В 50 лет волокно ищет досрочный выход на пенсию? Отнюдь нет! Как видно, инновации в сфере волоконной оптики появляются постоянно, и отрасль телекоммуникаций не является единственной заинтересованной отраслью в развитии оптических волокон – область применения ОВ крайне широка. В будущем мы планируем представить материал о современных достижениях в области волоконно-оптической связи.