



LAPLAS

От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

# Введение в современные проблемы физики

С.Е.Муравьев, А.С.Ольчак  
кафедра теоретической ядерной физики  
кафедра общей физики



LAPLAS

От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

# Лекция 4.

## «Самое прозрачное вещество на свете»

История оптоволоконна и оптических методов передачи информации



**Лекция 5.** История передачи информации: почта, телеграф, телефон. Оптический телеграф. Электрический телеграф. Азбука Морзе. Трансатлантический кабель. Уильям Томсон. Можно ли использовать свет? Полное внутреннее отражение. Затухание света в стекле. Окна прозрачности и очистка. Оптическое волокно – самое прозрачное вещество на свете. Механизмы передачи сигналов. Принципы усиления сигнала. Что дальше?



LAPLAS

В этой лекции мы будем говорить о современном способе передачи информации «по проводам» - с помощью удивительного изобретения человечества – оптического волокна. Человечество сделало огромную работу, чтобы научиться передавать информацию без потерь. Без искажений. В огромных количествах. Без опасности несанкционированного доступа. Обо всем, что связано с...

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

Мы поговорим сегодня



Но сначала «физический телеграф»

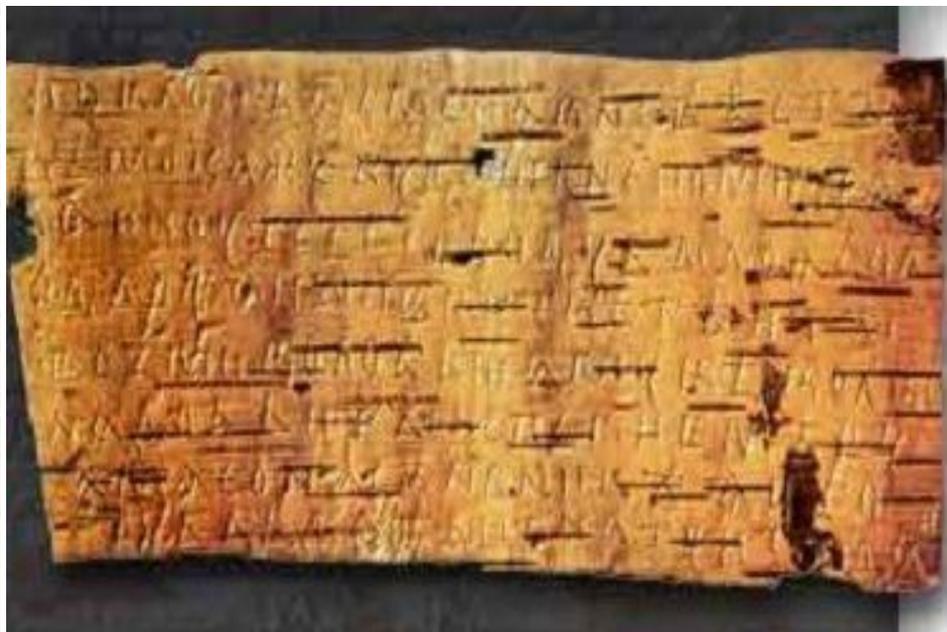
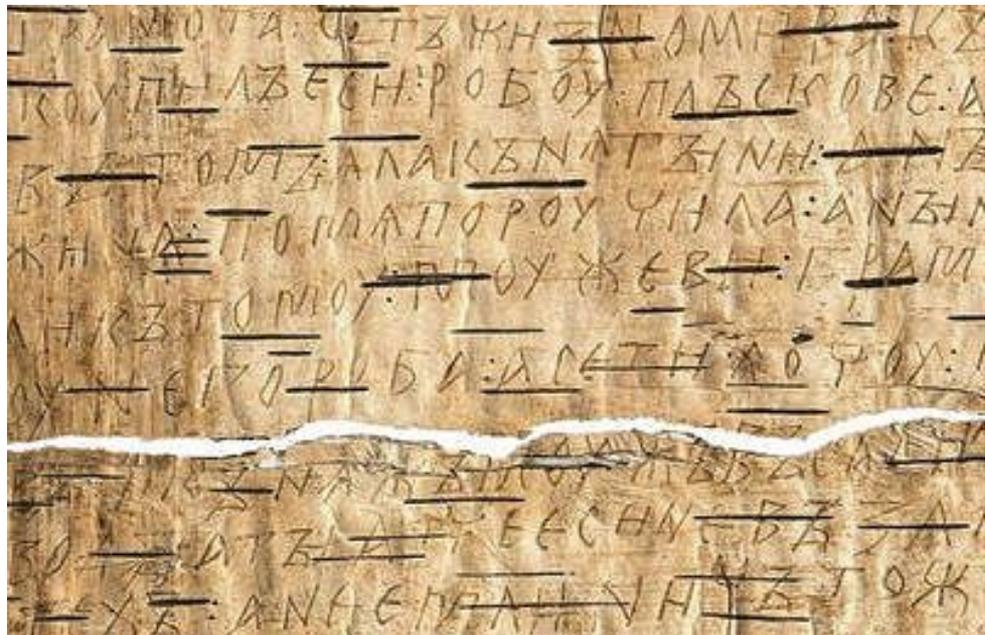
На Руси зачатки передачи почтовых сообщений курьерами (почта) существовали еще до ига (первое сообщение о передаче писем – берестяных грамот - 885 год). Голубиная почта.

Монголы расширили и упорядочили работу почт. Ямы. Система почтовых станций. Дороги. Лошади. Ямской налог. Регламенты.

Мертвые души. «Чудным звоном заливаются колокольчик. Гремит и становится ветром разорванный в куски воздух. Летит мимо все, что ни есть на земли... И, косясь, постараниваются и дают ей дорогу другие народы и другие государства...»



## Русские берестяные грамоты





LAPLAS

От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

«Возьми у Тимошки, Войцына шурина, одиннадцать гривен за коня, а также сани, хомут, вожжи, оголовье и попону»



# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

## «Оптический телеграф»

В древности - огни на холмах. Прямая видимость  
На великой китайское стене – на башнях зажигались  
костры. Средняя скорость – больше 1000 км/ч.  
Система дорогая – башни, много людей

В конце 17 века физики и инженеры стали  
приводить в порядок системы передачи. 1684 год –  
Роберт Гук - системы кругов, закрывающих огонь

1703 год – Гийом Амонтон показывал устройства с  
подвижными планками при дворе Людовика 14.





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

В конце 18 века оптический телеграф стал широко распространяться в Европе.

Использовался солнечный свет, который направлялся в сторону следующей станции

Именно таким образом – с помощью гелиографа – в 1778 году была организована оптическая связь между Парижской и Гринвичской обсерваториями.

На флоте гелиографы использовались повсеместно. После появления источников Вольты моряки стали сразу использовать электрическую дугу для прожекторов.





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Семафор братьев Шапп. Франция, 1780 год.  
Первая линия Париж-Лилль, 1794 год. 225 км, 22 башни с шестами и подвижными планками.  
Первое сообщение – 1 сентября 1794 года, Лазар Карно – сообщение об отбитии городка Конде у австрийцев.  
Скорости были такие: Париж – Брест (500 км) – 7 минут. Берлин-Кёльн (600 км) – 10 минут.

В Испании – Августин Бетанкур. Линия Мадрид-Кадис. Его заметил русский посол и пригласил в Россию.





В начале 19 века Бетанкур приехал в Россию.

И он сконструировал первые телеграфные линии в России, построил мосты, а также создал первую инженерную школу (корпус инженеров путей сообщения), фонтаны, лесопилки, завод по изготовлению бумажных денег, разработав все технологии. А еще каналы, дороги, шлюзы...

Первые телеграфные линии Петербург-Шлиссельбург, Петербург-Кронштадт, Петербург-Царское село, Петербург-Гатчина.





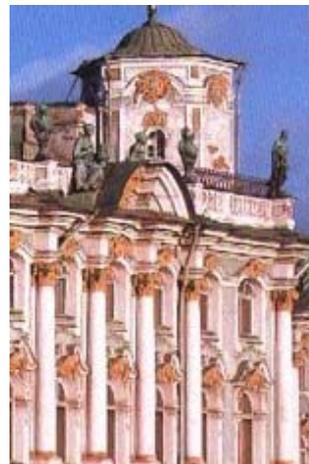
# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

1839 год «Телеграфная линия» Петербург-Варшава, 1200 км, 149 промежуточных станций (8 км между станциями) – башни 15-16 м, фонари, зеркала, отражатели, работали 1908 человек.

Начальная станция – «телеграфная» башня в Зимнем дворце. Затем – на здании Думы (Невский, 33), Технологический институт и т.д.

Общедоступная, телеграмма из 45 символов - 22 минуты. Стоило дорого, и этот вид связи распространения в России не получил





В Европе к 1830-1840 годам телеграф был распространен и широко использовался (в том числе и обычными людьми). Почты предоставляли коммерческие услуги по передаче телеграмм...

Эпизод в романе А.Дюма «Граф Монте-Кристо» (1845 год) с подменой Эдмоном Дантесом телеграммы для того чтобы разорить своего противника Данглара...





Но уже к 50-60 годам 19 века оптический телеграф стал терять свою актуальность в связи с распространением электрического телеграфа (в России – первая коммерческая электрическая телеграфная линия – 1852 год).

Башни использовались как пожарные каланчи. Один из оптических семафоров – на здании башни городской думы в Петербурге (47,5 м) – сохранился. Сохранилась и система подъема шаров на башне, которые выполняли функцию кодировки сообщений





## Электрический телеграф

Первые попытки – сразу же после изобретения А.Вольта источника тока.

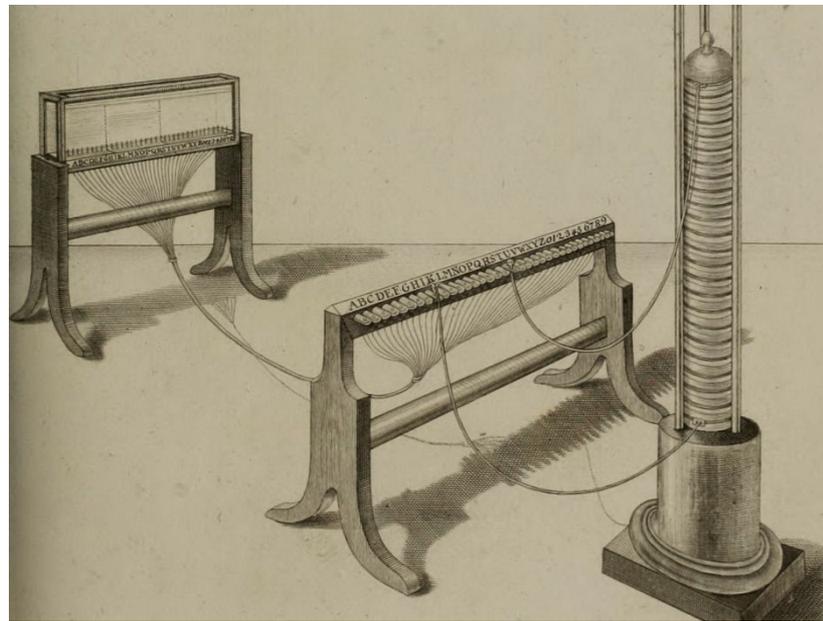
1809 г.

Самюэль Земмеринг – немецкий физиолог и врач.

Передавал информацию по проводам с помощью вольтова столба. Детектор – разложение серной кислоты под действием тока.

33 стаканчика – каждый соответствует какой-то букве.

Передал телеграмму на 3 километра.





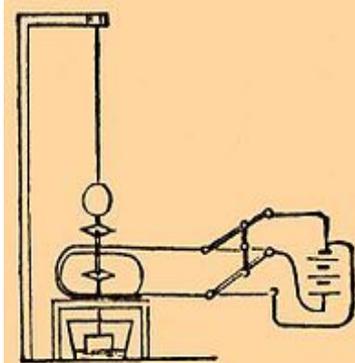
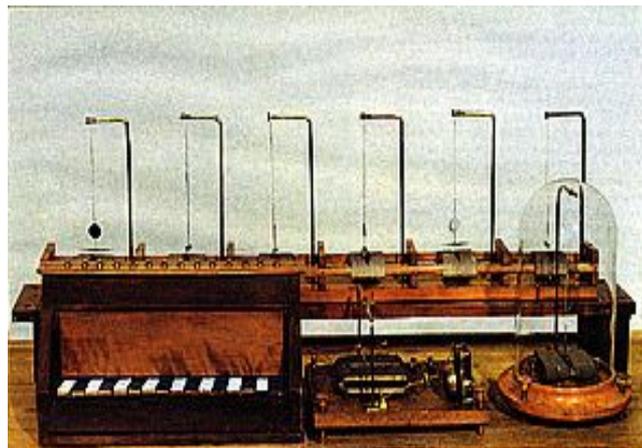
LAPLAS

# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

После открытия действия тока на магнитную стрелку появилась возможность регистрировать электрический ток, появились первые телеграфные системы.

Павел Львович Шиллинг. Каждая буква передавалась по своему проводу из одной комнаты его квартиры в другую (на демонстрации были Николай 1 и Пушкин).

Только одно устройство – связывающее Зимний дворец с министерством путей сообщения.



Фиг. 1



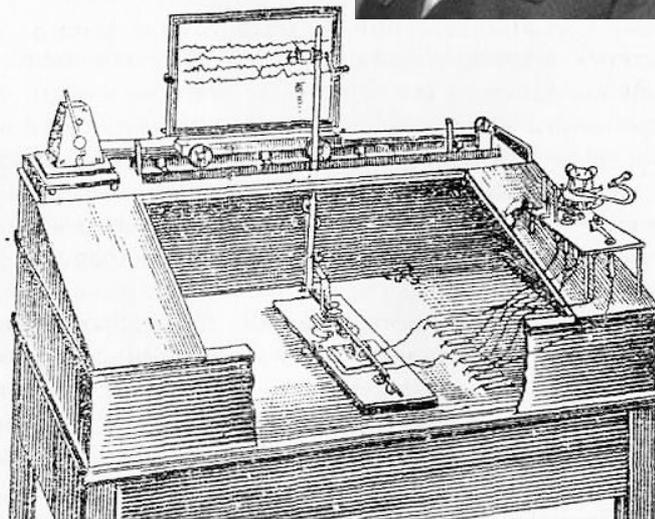


# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Такие системы неудобны тем, что не оставляют «материальных» свидетельств передачи информации. Пишущие аппараты. Идея – движение якоря электромагнита в приемнике и запись этих движений с помощью самописцев. Якоби, Морзе, Динье, Сименс и другие.

Один из первых пишущих телеграфов – Якоби. Условные знаки записывались карандашом, прикрепленным к якорю электромагнита. Прибор Якоби (1839 год) соединял кабинет императора Николая I в Царском Селе со зданием МПС. В 1950 г. Якоби придумал буквопечатающий телеграфный аппарат.





А в 1840 году Якоби получил огромную премию от русского правительства (3,5 тысячи рублей) с пожеланием широко опубликовать все идеи создания телеграфа.

Уже тогда российское правительство брало на себя ответственность за широкое распространение технических инноваций. Такое положение будет сохранено и в будущем, когда многие русские изобретатели не патентовали свои разработки



# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

В 1833 году – Гаусс и Вебер связали университет Геттингена с обсерваторией (700 метров).

Практическое распространение получил телеграф Уитстона и Кука в Англии. С 1837 года. Использовали принцип Шиллинга.

С 1838 года Штейнгейль в Мюнхене использовал только один провод. Второй – земля. Концы проводов соединялись с медными болванками, закопанными в землю. В 1837 году в Америке Самуэль Морзе придумал телеграф и код Морзе.

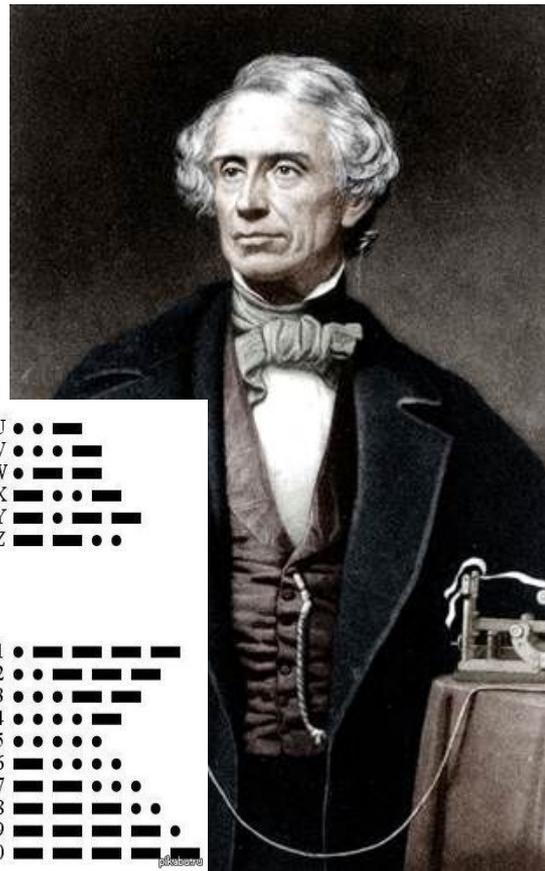




# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

В аппарате Морзе есть подпружиненный рычаг. При нажатии происходит замыкание цепи, связывающей источник и приемник. В приемнике есть электромагнит, железный стержень и часовой механизм для протягивания ленты. Электромагнит прижимает стержень к ленте, которая перемещается с помощью часового механизма. Острие стержня оставляет на ленте следы - точки или чёрточки. Алфавит Морзе. И человечество было готово прокладывать кабели по дну моря и связывать континенты



A	· —
B	····
C	·····
D	·····
E	·
F	····
G	····
H	····
I	··
J	·· —
K	·· —
L	····
M	····
N	··
O	····
P	····
Q	····
R	····
S	····
T	—

U	·· —
V	····
W	·· —
X	····
Y	····
Z	····

1	· — — — —
2	·· — — — —
3	···· — — — —
4	···· — — — —
5	····
6	····
7	····
8	····
9	····
0	····



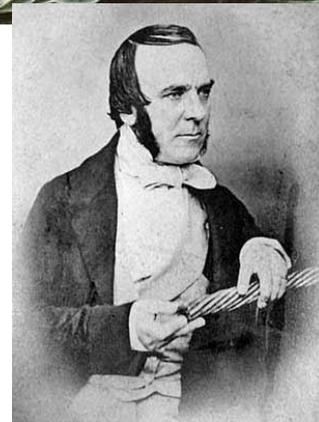
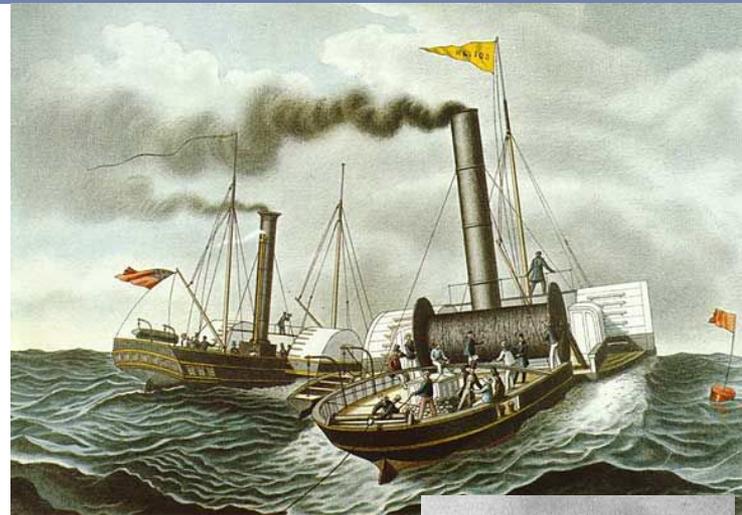
# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Сначала - небольшие расстояния. Ла-Манш. Гуттаперча (род каучука) для изоляции проводов. Медный провод, два миллиметра диаметром, три слоя гуттаперчи. Руководитель работ – Джон Бретт

Корабль Голиаф проложил кабель 23 августа 1850 года из французского Кале в английский Дувр была послана телеграмма. В Дувре зачитана при огромном стечении публики.

Но вдруг кабель перестал работать... Рыбаки повредили кабель.





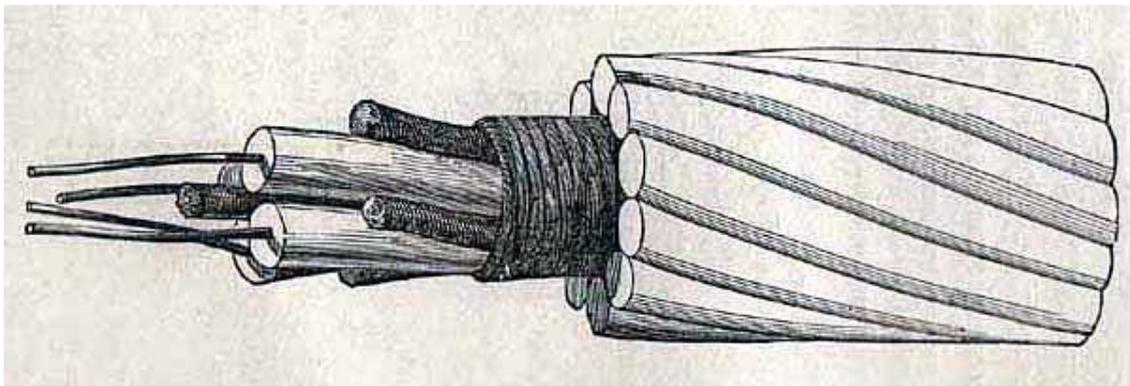
# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Бретт учел все недостатки...

В 1851 году проложили более серьезный кабель. Масса второго 166 тонн против 14 тонн первого(!). Успешно работал.

Потом были: Лондон-Париж, Англия-Ирландия, Швеция-Норвегия, Италия-Сардиния и Корсика. Кабели были проложены через Средиземное и Черное моря. По последнему кабелю командование союзных войск, осаждающих Севастополь, получало указания от своих правительств.





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Проблемы - высокопроводящая среда изменяла свойства кабеля. Из-за большой емкости сигналы распространяются с неодинаковой скоростью, зависящей от их продолжительности. Возникают помехи - получается полный хаос.

Поэтому передачи длились очень долго. Высокие напряжения. Но все равно на больших расстояниях получалось очень плохо.

Пригласили специалистов – Уильям Томсон. Понял все проблемы. Дал рекомендации как улучшить передачу





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

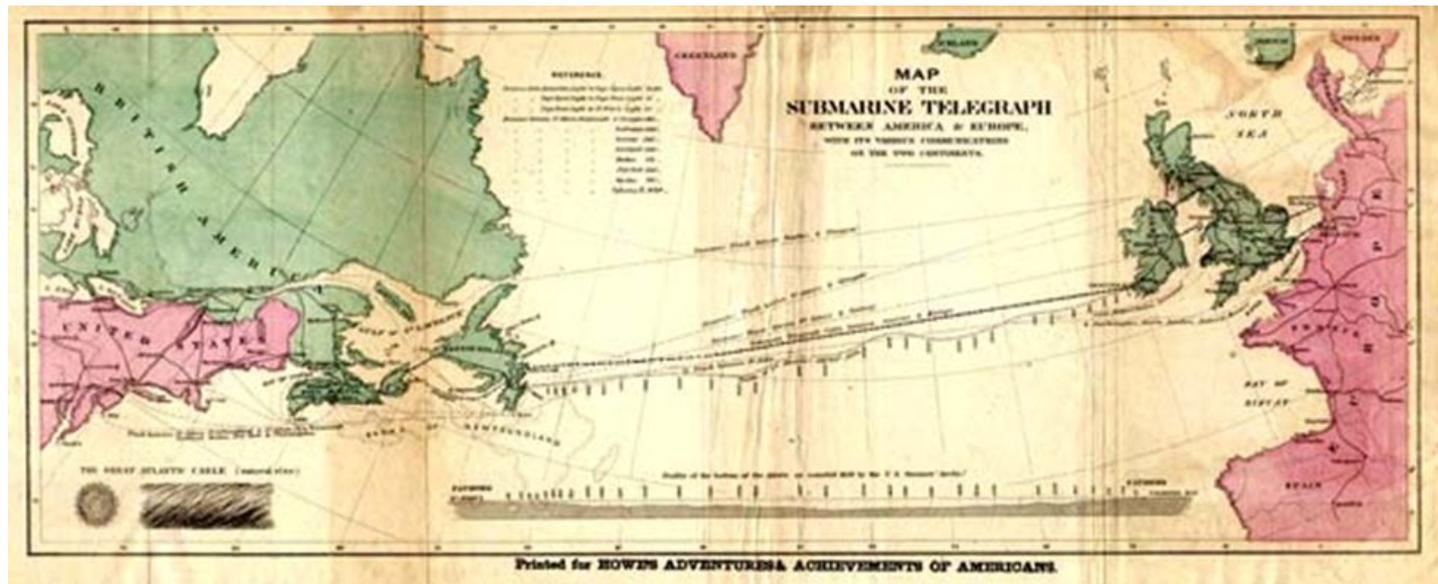
LAPLAS

И человечество было готово к прокладке трансатлантического кабеля.

Американский предприниматель Сайрос Филд. Пригласил экспертов.

Был выбран самый мелкий участок океана.

Кабель длиной 4000 км весил 4000 тонн. Для перевозки потребовались 200 вагонов.





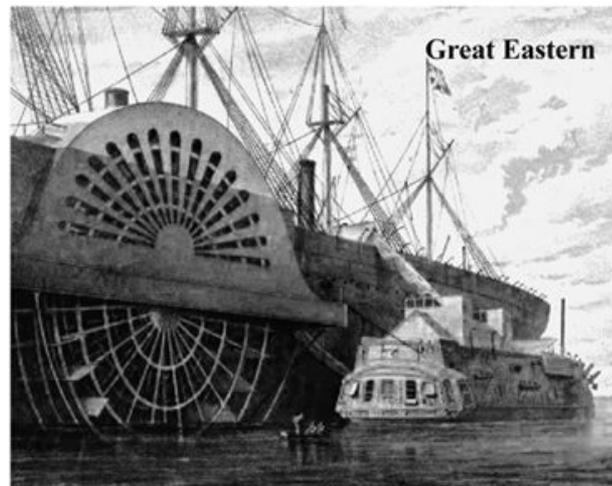
# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

В 1857 году начались работы по прокладке трансатлантического кабеля. Провал – обрыв и потеря кабеля.

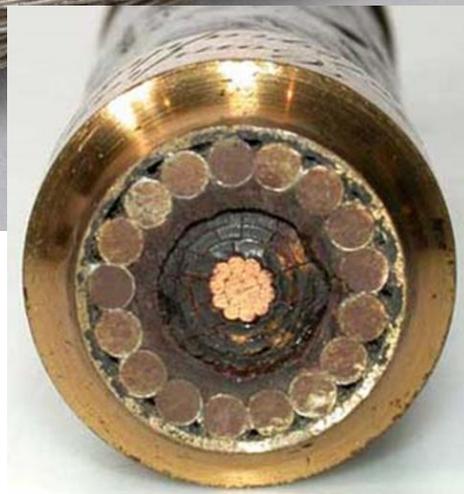
На следующий год - вторая попытка. 5 августа 1858 г. подводная кабельная линия длиной 3800 км была проложена.

16 августа 1858 года королева Великобритании Виктория и президент США Джеймс Бьюкенен обменялись телеграммами. Приветствие английской королевы - 103 слова, передача длилась 16 часов.





В течение августа 1858 года пытались организовать передачу информации. Линия работала крайне неустойчиво и 1 сентября окончательно вышла из строя. Причиной выхода кабеля из строя, скорее всего, стал пробой изоляции слишком высоким для нее напряжением береговой питающей батареи - 2000 В. Кабель бросили... Следующие кабели делали по рекомендациям Томсона. Это сложнейшее инженерное изделие



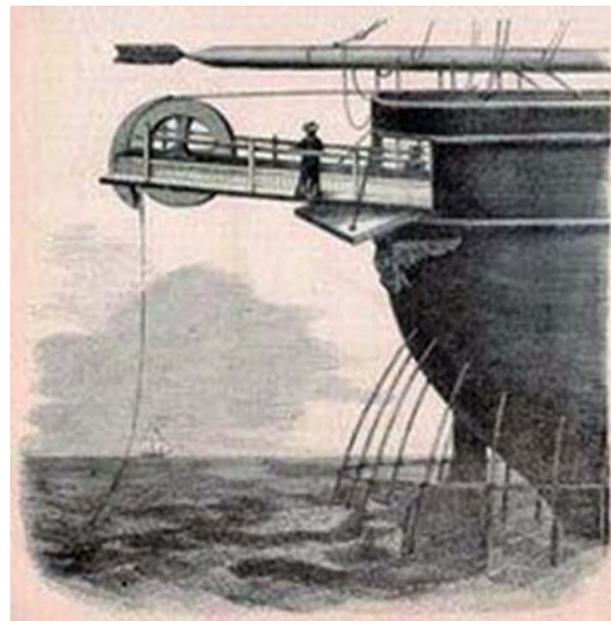


## От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

3 июля 1865 г. пароход «Грейт Истерн» вышел из Ирландии, соединив конец кабеля с береговой телеграфной станцией. Эта станция была соединена со всей европейской сетью, в течение рейса «Грейт Истерн» посылал сообщения о ходе работ. Руководитель - Уильям Томсон.

Изоляция была выполнена из четырех слоев гуттаперчи, покрытой влагозащитным клеем из гуттаперчи, смолы и гудрона. Снаружи - «броня» из стальных проволок. Благодаря усилению конструкции в целом разрывная прочность кабелей 1865 и 1866 гг. по сравнению с кабелями 1857 и 1858гг. возросла в 3 раза.





Кабель несколько раз теряли. Потом поднимали.

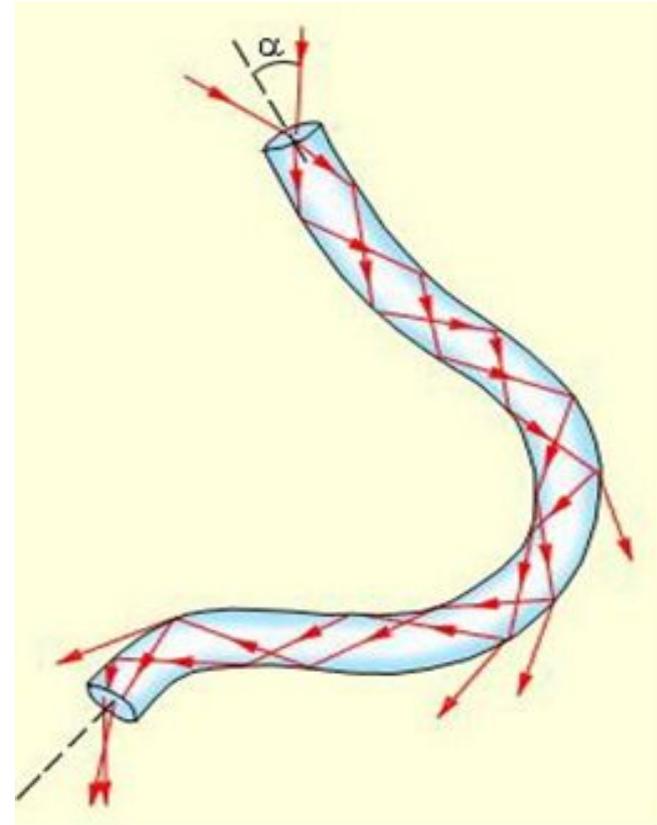
К сентябрю 1868 года связь работала. Но неустойчиво. С помехами.

Что же плохо с электрическим кабелем?

1. Совсем не скорость света! Индуктивное и емкостное сопротивление.
2. Из-за огромной емкости и индуктивности сигналы расплывались. Нужно было очень высокое напряжение и большие времена.
3. Из-за этого – невысокая «пропускная» способность.
4. Помехи. Принципиально нельзя убрать.
5. Возможность несанкционированного доступа.
6. Вот если бы использовать свет... А можно ли использовать свет?



И тут мы вспомнили об таком удивительном явлении, как полное внутреннее отражение. Если луч выходит из среды с большим показателем преломления в среду с маленьким показателем преломления (например, из стекла в воздух), то он преломляется так, что вышедший луч «прижимается» к границе раздела между средами. Поэтому при малых углах падения луч вообще не выходит из стекла или воды в воздух (это и есть полное внутреннее отражение).





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Есть световые фонтаны, которые «запирают» свет, а когда струя разбивается, свет выходит наружу.

В стеклянной палочке меняется направление света. Такие тонкие стеклянные палочки называются «световодами». Мы используем их, чтобы посмотреть «за угол». Врачи делают операции, проникая без разрезов в разные части организма.

И тут возникла идея: а нельзя ли с помощью таких световодов передавать информацию.





LAPLAS

# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

А как передать информацию с помощью света? Например, компьютерный файл?

Тоже ясно - кодировка. По проводам мы можем передавать аналоговые сигналы. Или цифровые, когда электрический сигнал кодируется по некоторым согласованным правилам набором цифр. Передается по проводам. А потом раскодируется назад. Причем каждая цифра – импульс тока. А давайте этот же сигнал закодируем вспышками света. И тогда любой сигнал, это последовательность вспышек.

А что может быть источником света для его передачи по световодам? Фонарик?

**Конечно ЛАЗЕР!**



# ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ и ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НИЯУ МИФИ

от фундаментальных исследований к новым  
технологиям



# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS



**Басов Н.Г., Прохоров А.М., Таунс Ч.  
Нобелевская премия 1964 года.  
За фундаментальные работы в области  
квантовой электроники, которые  
привели к созданию излучателей  
вынужденного излучения**





LAPLAS

От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

**Перспективы лазерных и плазменных технологий**

**Физика:**

**сверхсильные поля, лабораторная астрофизика**

**Инженерия:**

**промышленные технологии, квантовые технологии, термоядерный синтез, плазменные двигатели, ускорительные технологии, материалы, медицинские технологии, навигация**

**Жизнь:**

**специалисты, востребованные 21 веком**



# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS



ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



LAPLAS



# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS



ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS



ФИЗИКА ПЛАЗМЫ



LAPLAS



LAPLAS

# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии



КВАНТОВАЯ МЕТРОЛОГИЯ



LAPLAS



ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНДУСТРИИ



# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS



ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



LAPLAS



Но вернемся к оптоволокну...



Главная проблема передачи сигнала в оптоволокне – затухание света! Если мы нырнем в воду (например, с аквалангом) на глубину 25 метров, то даже в самый яркий солнечный день там будет полутемно. Свет поглощается морской водой и не доходит до такой глубины. А если 100 метров? А вот слой морской воды толщиной километр поглощает свет полностью. Ну а вода по своим оптическим свойствам похожа на стекло. Это значит, что стеклянный световод длиной 1 км поглотит свет полностью.

И тогда все оптические технологии передачи информации бессмысленны!



А давайте попробуем очистить стекло. Не станет ли оно более прозрачным?

Неочищенное стекло имеет затухание 1000 Дб/км.

Это означает, следующее.

10 дб – ослабление интенсивности в 10 раз.

20 дб - ослабление интенсивности в 100 раз.

30 дб - ослабление интенсивности в 1000 раз.

1000 дб - ослабление интенсивности в чудовищные  $10^4$  в сотой степени!

Или, другими словами, слой стекла в 1 км толщиной абсолютно непрозрачен для света. Как кирпичная стена.



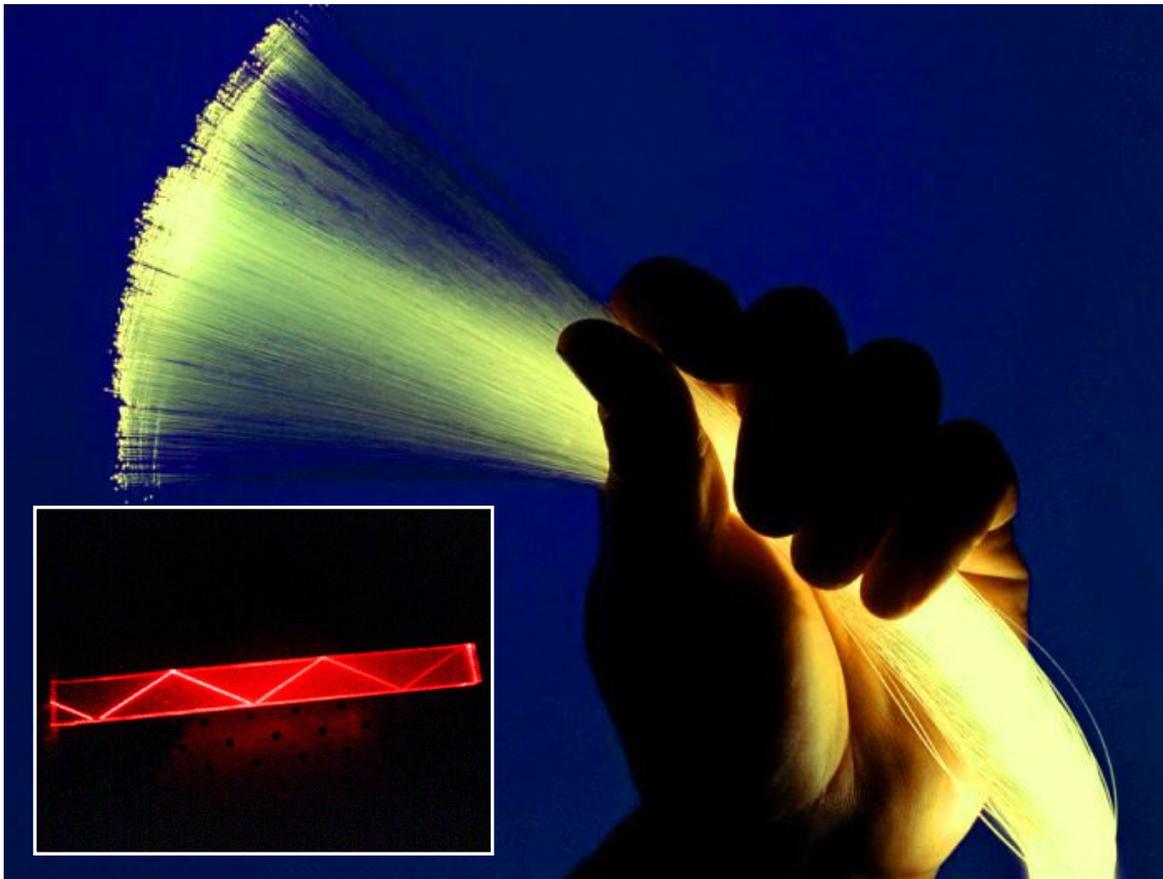
# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Но оказалось, что затухание в стекле связано с примесями. А если стекло очистить. В 1970 году – стекло с затуханием 20 дб/км.

1972 год - 4 дб/км  
И т.д.

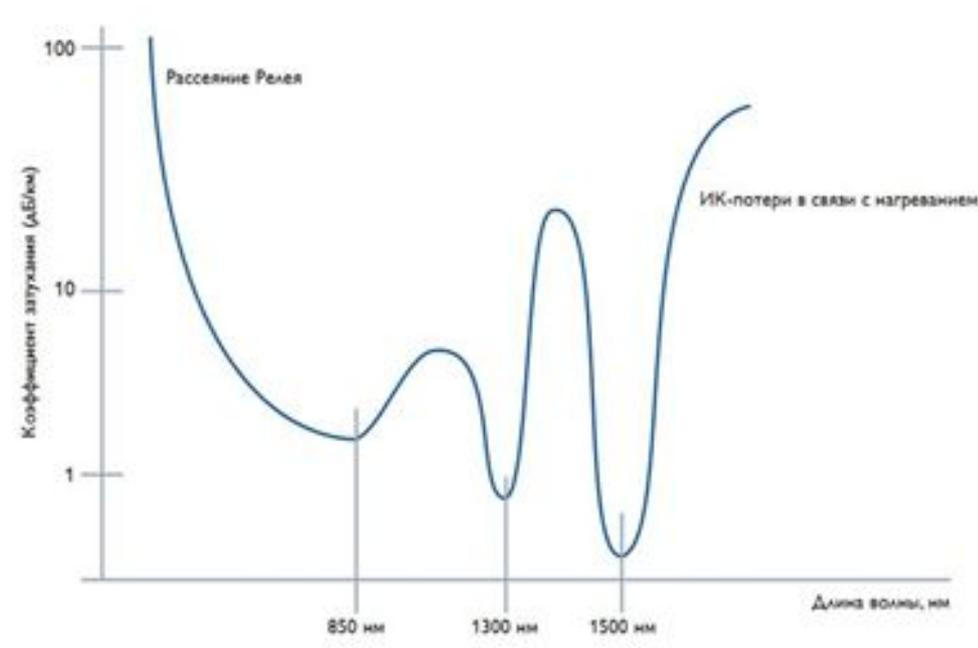
Сейчас - 0,2 дб/км.





LAPLAS

Затухание света с разной длиной волны в стекле разное. Окна прозрачности. Именно с такой длиной волны и выбирают лазер. Волокна, рассчитанные на передачи в пределах десяти километров, работают в первом окне прозрачности на длине волны 850 нм, на большие расстояния – во втором и третьем окнах с длиной волны 1300 и 1500 нм (все – инфракрасные; видимый свет – до 780 нм).





Оптоволокно - самое прозрачное вещество на свете. Его прозрачность близка к прозрачности воздуха, очищенного от пылинок и капелек воды. Как делают оптоволокно?

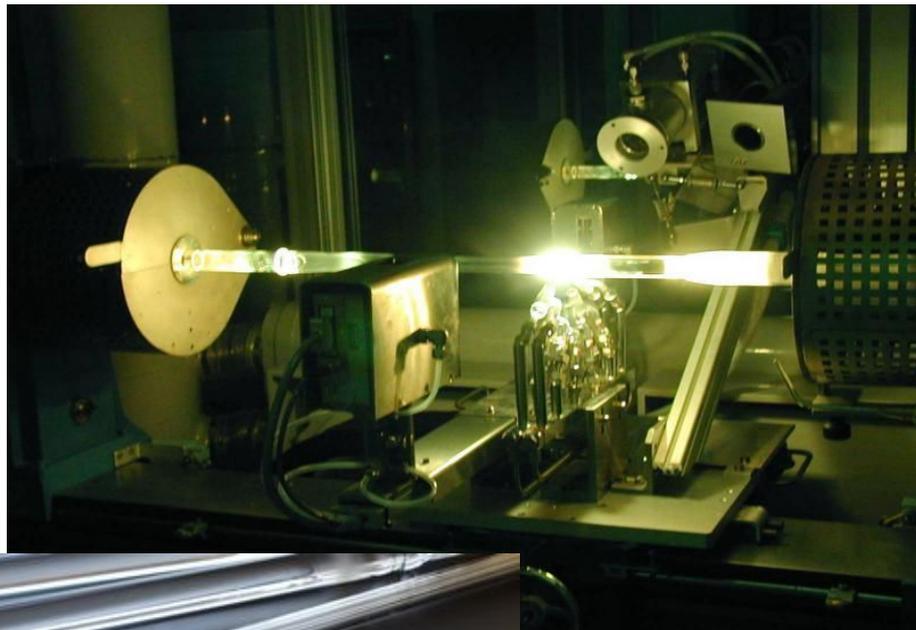
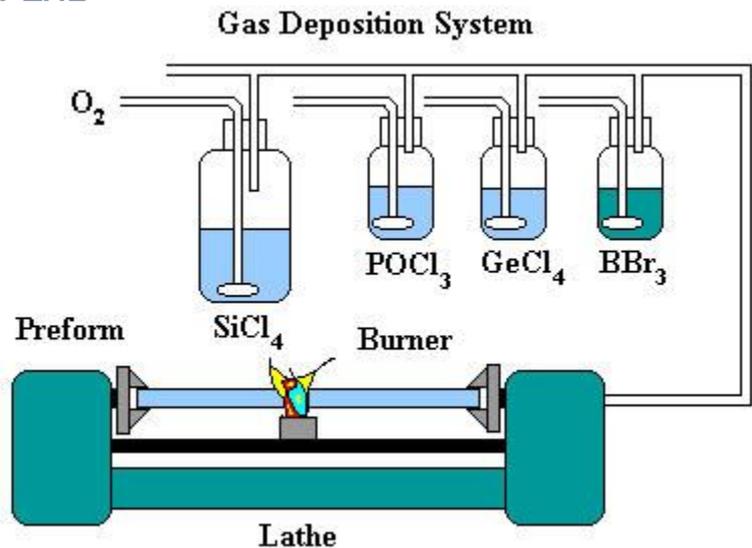
Трубка из кварцевого стекло глубокой степени очистки. На внутренней поверхности - осаждение стекла полученного с помощью многократной дистилляции тетрахлорида кремния и его последующего окисления.

Трубку нагревают до 2000 градусов, и благодаря поверхностному натяжению она превращается в сплошной стержень с очень чистой сердцевиной.



# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

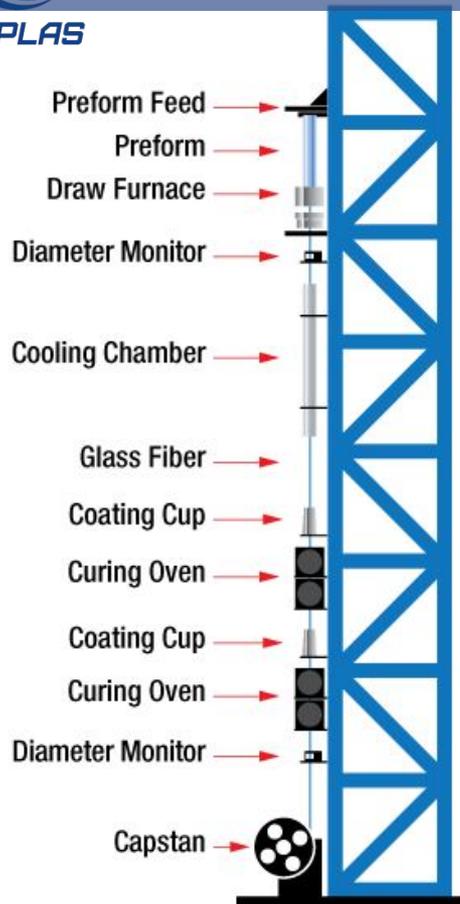
LAPLAS





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS



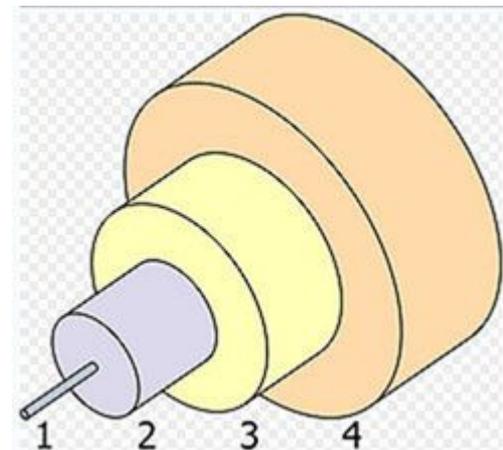
Затем из сердцевины горячей заготовки с помощью вытягивания получают тонкую стеклянную нить, которую сразу же покрывают несколькими оболочками (определенные полимеры, которые на волокне полимеризуются), предотвращающими образование трещин на поверхности



Вот так устроено волокно. Причем толщина самого волокна составляет либо 10 мкм, либо 50 мкм (есть 2 стандарта – так называемое одномодовое и многомодовое волокна).

Толщина среднего человеческого волоса – около 50 мкм!

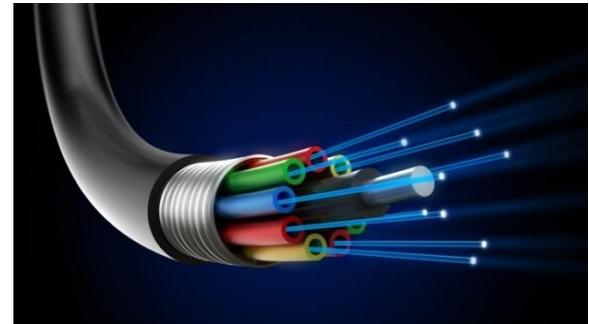
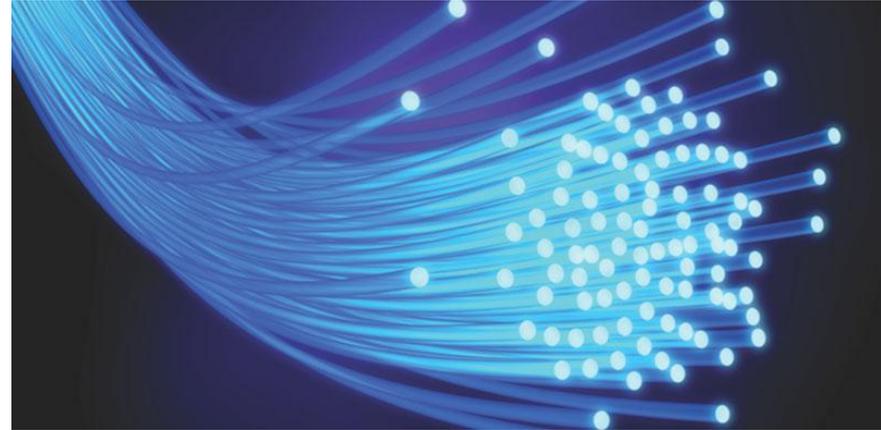
Толщина волокна со всеми оболочками – 1 мм





Одномодовое и многомодовое волокно по-разному проявляет волновые свойства света. Поскольку есть небольшая расходимость лазерного луча, устанавливается стоячая волна - разная в тонком и толстом волокне.

И еще. Лазерный свет чуть-чуть не монохроматический. Разная скорость. Сигнал расплывается. Участки с обратной дисперсией.





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS

Усиление сигнала. Электричество передают по обычным проводам, которые входят в состав оптического кабеля. Это - энергия. Участки волокна через 50 км легируют эрбием или иттербием. И на этих участках делается лазер, и при проходе через него сигнала излучает точно такой же сигнал, который усиливает сигнал.

Единственное отличие такого лазера от «настоящих» лазеров в том, что он односторонний, и эффективность излучения невелика. Но всю накачку снимать и не нужно, поскольку пойдет следующий сигнал.



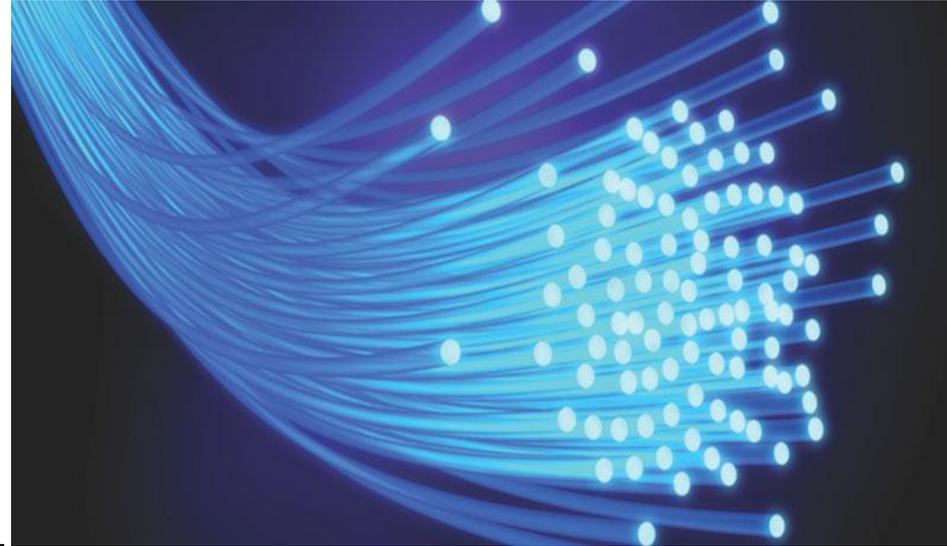


Усилители достаточно делать через 50 км.

Вдумайтесь!

50 км свет распространяется по такому волокну с таким затуханием, что позволяет делать усилители только через 50 км.

Т.е. распространяясь 50 км, свет затухает всего в несколько раз, затем мы его усиливаем, и «он опять как новый».





В настоящее время все линии связи переводятся на оптоволокно.

Гораздо лучше электрических линий.

1. Больше пропускная способность. Это связано с большой несущей частотой (свет). Возможны скорости «тарабиты в секунду».
2. Отсутствует выход поля наружу. Нет потерь.
3. Отсутствует несанкционированный доступ.
4. Подводным оптическим линиям – нет альтернативы

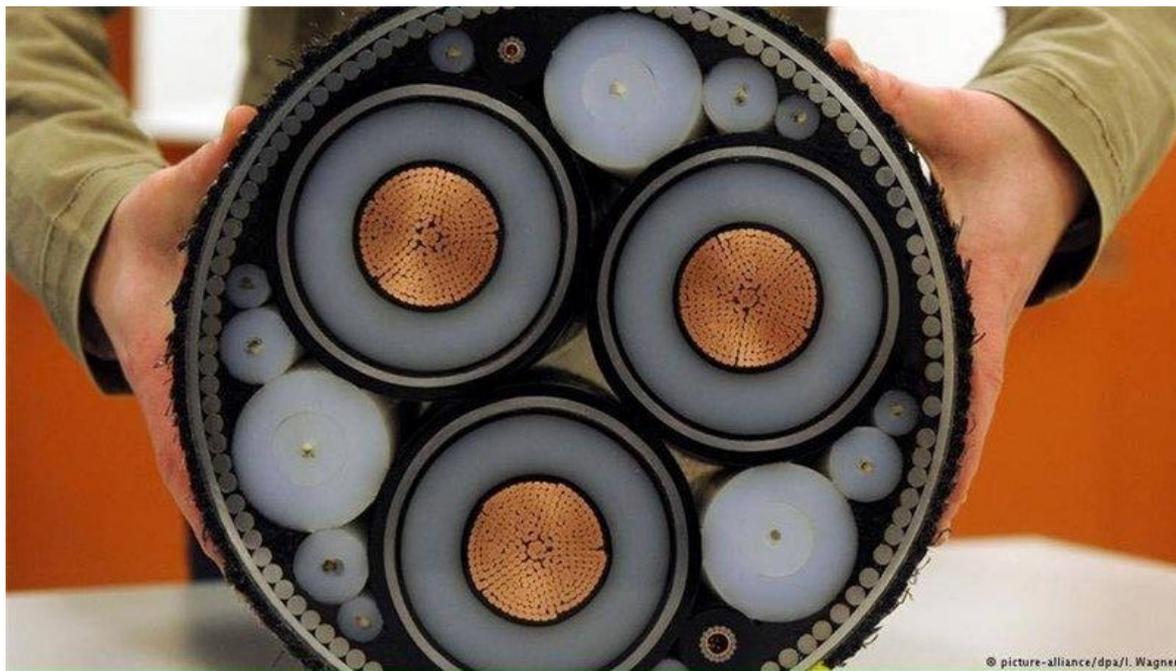
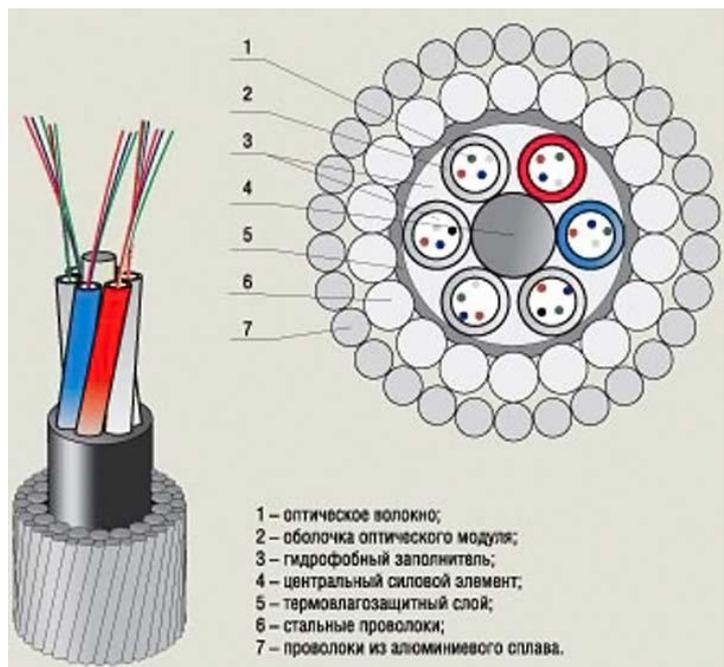
Недостатки

1. Очень чувствительно к изгибам
2. Не может быть проведено к каждому потребителю
3. Сложное сочетание с электрическим сигналом



LAPLAS

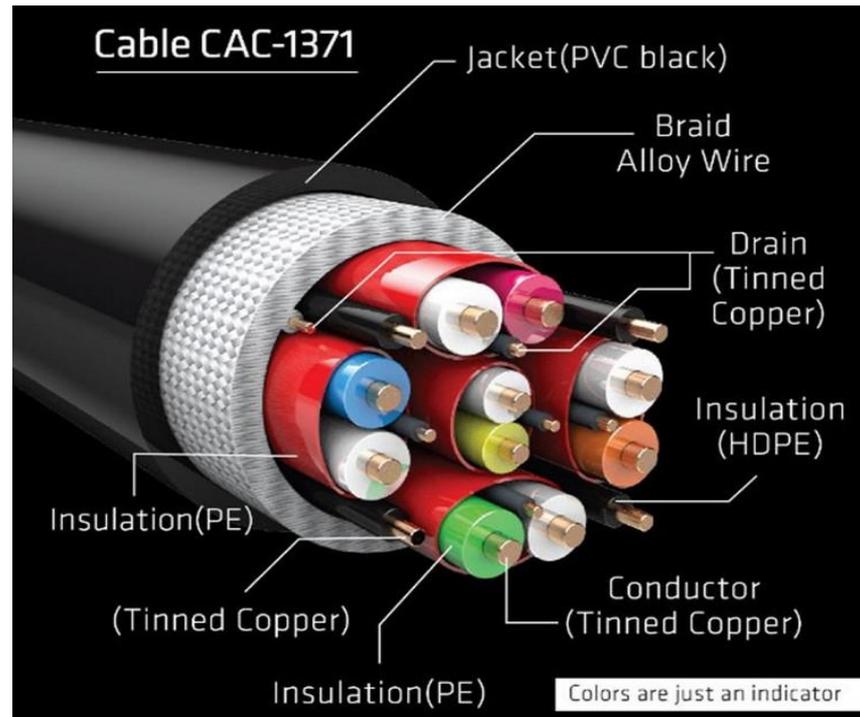
## Что же касается подводных кабелей – Оптоволокну нет альтернативы





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

LAPLAS





# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии

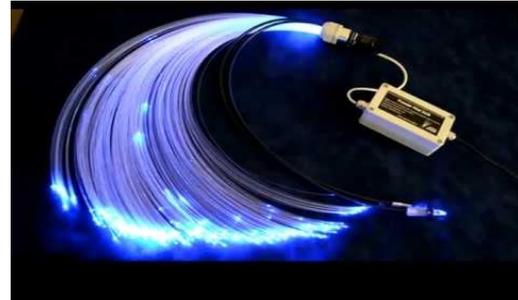
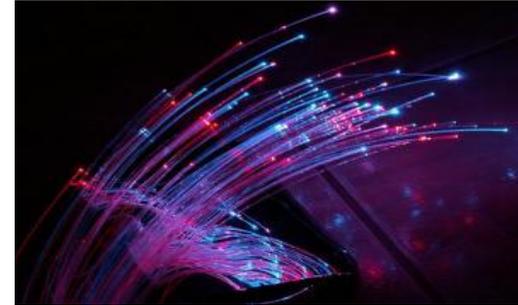
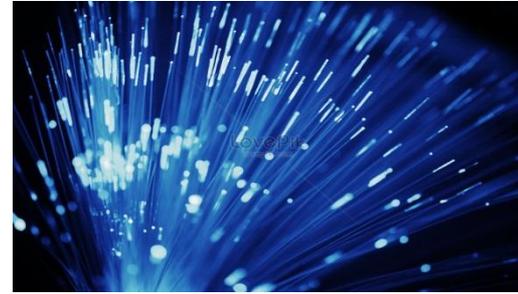
LAPLAS





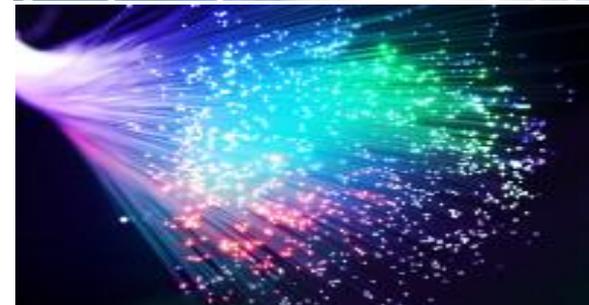
Преимущества оптоволоконных линий связи:

1. очень высокая скорость передачи информации, в том числе и при пиковых нагрузках;
2. высокая помехозащищенность;
3. практически отсутствует задержка сигнала
4. затруднен несанкционированный доступ к передаваемой информации;
5. возможность подключения видеонаблюдения, охранных систем, IP-телефонии, интерактивного телевидения и т. д.;





4. возможность прокладки оптоволоконного кабеля на большие расстояния;
5. химическая устойчивость стекловолокна в агрессивных средах;
6. небольшие габариты и вес;
7. защищенность от открытого огня и взрыва;
8. долговечность.
9. цена – ниже чем у электрических кабелей
10. Сейчас делаются полимерные оптические волокна, которые будут обладать дополнительными достоинствами, но будут лишены многих недостатков стеклянного волокна





LAPLAS

# От Архимеда до Басова - наука, техника, технологии



Подводные волоконно-оптические линии связи



**А какая связь у нас появится в будущем?**

**Но это уже  
совсем другая история...**