

*Приёмные устройства диапазона СВЧ  
и  
радиофотоника*

---

*Вольхин Юрий Николаевич  
E-mail: [ur-vol@yandex.ru](mailto:ur-vol@yandex.ru)*

# *Приёмные устройства диапазона СВЧ и радиофотоника*

---

*Продолжительность курса: 2 семестра*

*Программа 1-го семестра:*

- 4-ре «общих» лекции;*
- 9-ть практических занятий;*
- курсовая работа (оценка);*
- оформление результатов выполнения одной из практических работ;*
- «контрольная неделя»: 30.03.20 - 12.04.20;*
  - зачётная неделя: 01.06.20 - 07.06.20*
  - (недифференцированный зачёт)*

# Кентавр радиофотоники:



*Фотоника*

+

*Техника СВЧ  
(современная!!!)*

# *www.radiophotonics.ru*

*Радиофотоника*

[О проекте](#)

[Контакты](#)

## Зачем нам надо лезть в радиофотонику?

Колонка редактора  
от 30.08.2013 г.

Объяснять нашу потребность в радиофотонике (в международной терминологии microwave photonics) — очень сложно, так как труднее всего объяснить очевидные вещи.

Ну начнём с «простого» — с персональных компьютеров. Тактовая частота большинства из них не превышает 3 ГГц. Вопрос — почему? Ведь есть полупроводниковые аналоговые устройства — усилители, смесители и т. д., которые могут работать на частотах до 100 ГГц и выше. Причина одна — уровень интеграции. Каждый чип процессора содержит сотни миллионов элементарных ячеек — триггеров. И на каждый «удар бубна» — тактового генератора — происходит их переход из одного устойчивого состояния в другое, сопровождаемое протеканием микротока, и как следствие, выделением микродозы тепла. И если компьютер выполняет хотя бы один миллиард операций в секунду — это, как минимум, десятки миллиардов микротоков в секунду, а значит и десятки миллиардов микродоз выделяемого тепла. Каждая микродоза — это почти ничего, но сумма этих микродоз — начинает буквально жечь пальцы (до 120°C и более на корпусе чипа). И чем выше тактовая частота — тем больше выделяется тепла. И это тепло от чипа нужно как-то отводить. Для этого, в числе прочего:

- по самое немогу уменьшается толщина подложек процессоров,
- в качестве «несущей» конструкции процессоров используются пластины из диэлектриков с как можно более высокой теплопроводностью (технология кремний-на-изоляторе, где в качестве изолятора может использоваться сапфир, алмаз и т.д.),
- в процессоры заводятся специальные теплоотводящие микромагистральи,

[Введение в радиофотонику](#)

[Определение радиофотоники](#)

[Радиофотоника - это просто!](#)

[Основы радиофотоники](#)

[Фотонные и радиофотонные компоненты, устройства и системы](#)

[Моделирование и расчет параметров радиофотонных систем](#)

[Измерение параметров фотонных и радиофотонных систем](#)

[Основы фотоники, оптоэлектроники, волоконной и интегральной оптики, волоконной техники и цифровых ВОЛС и ВОЛП](#)

[Основы электроники и полупроводниковой схемотехники](#)

[Учебные материалы](#)

# *www.radiophotonics.ru*

---

[Введение в радиофотонику](#)

[Определение радиофотоники](#)

[Радиофотоника - это просто!](#)

[Основы радиофотоники](#)

[Фотонные и радиофотонные компоненты, устройства и системы](#)

[Моделирование и расчет параметров радиофотонных систем](#)

[Измерение параметров фотонных и радиофотонных систем](#)

[Основы фотоники, оптоэлектроники, волоконной и интегральной оптики, волоконной техники и цифровых ВОЛС и ВОЛП](#)

[Основы электроники и полупроводниковой схемотехники](#)

[Учебные материалы](#)

**Литературные источники:**

Технологические уклады:

1. Технологические уклады: [определения](#);
2. Шестой технологический [уклад](#);

*[www.radiophotonics.ru/  
materials/tech01.pdf](http://www.radiophotonics.ru/materials/tech01.pdf)*

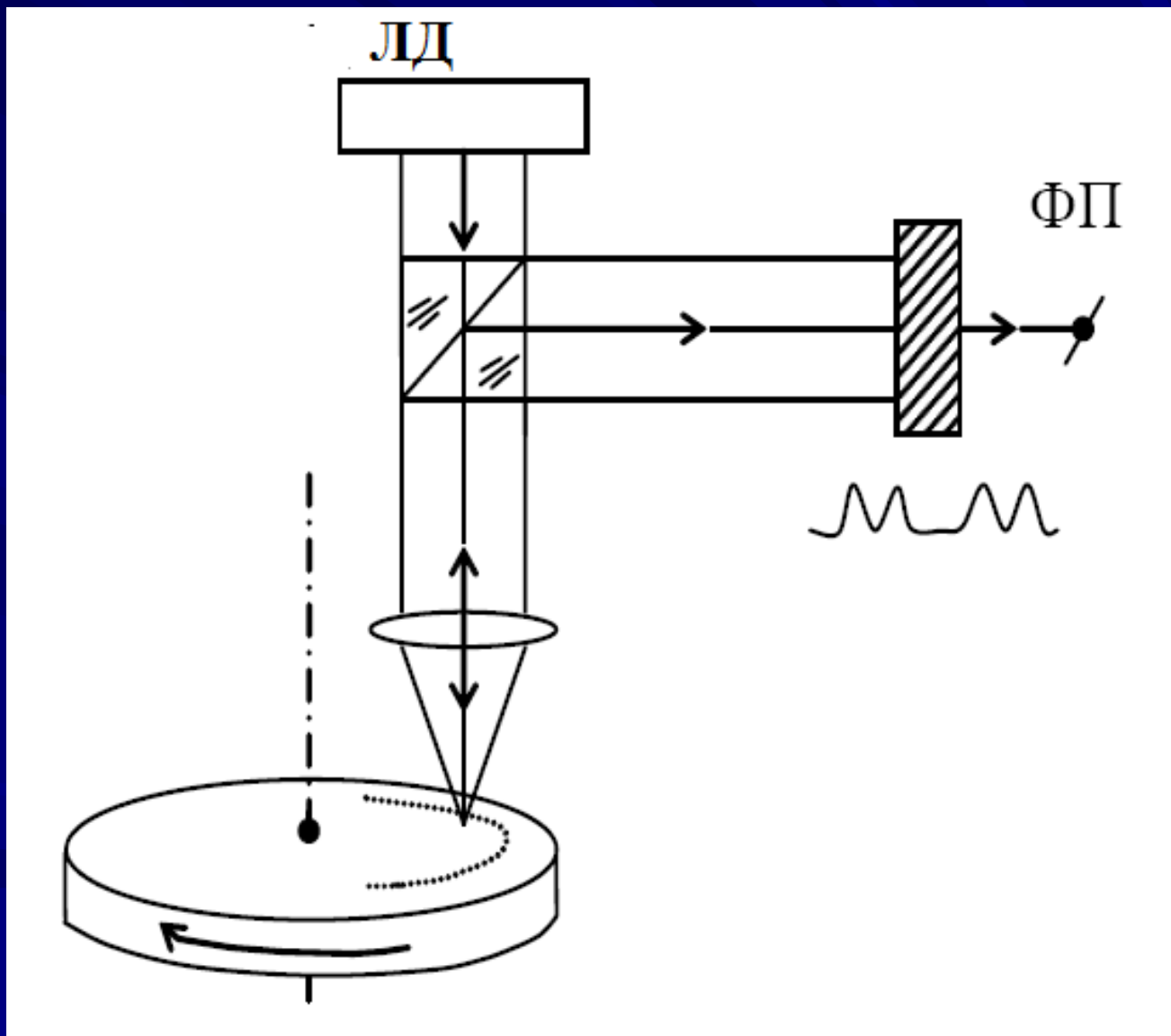
---

Страна	III техноуклад	IV техноуклад	V техноуклад	VI техноуклад
США <sup>[31]</sup>	-	20 %	60 %	5 %
Россия <sup>[31][32]</sup>	30%	50%	10%	-
Украина <sup>[33]</sup>	57,9 %	38 %	4 %	

# Применение лазерных и фотонных технологий в промышленности и медицине



# Принцип действия видеодиска

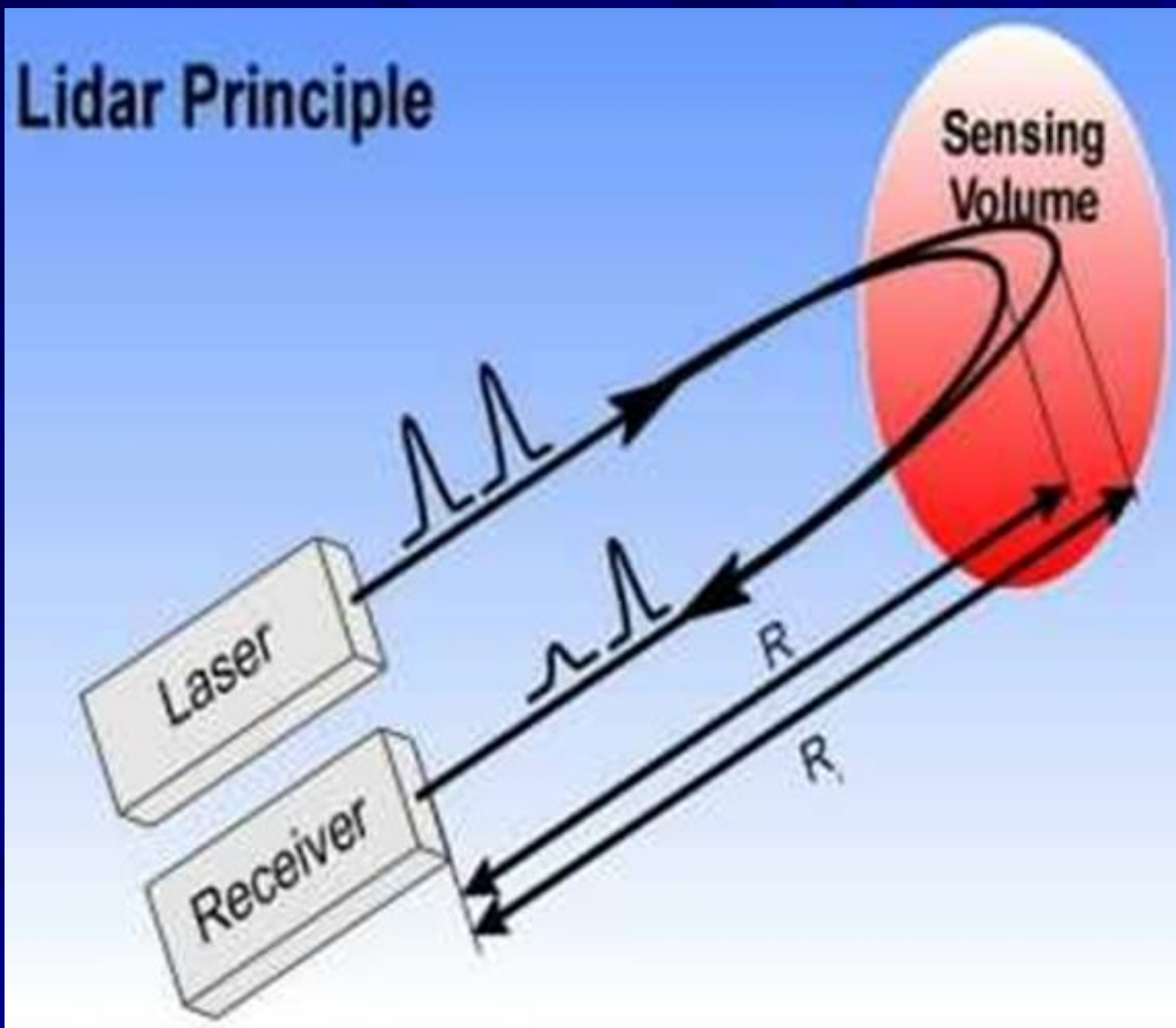




***LIDAR - LIght Detection and Ranging -  
световое обнаружение  
и определение дальности***

***RADAR - Radio Detection and Ranging -  
радиообнаружение и определение дальности***

# Принцип действия лидара



# Лазерные прицелы и дальномеры



# Авиационный лидар - сканер

**LIDAR Scanner** - Laser pulses at up to 167kHz and receives up to 4 returns per pulse, measuring a range and intensity for each.

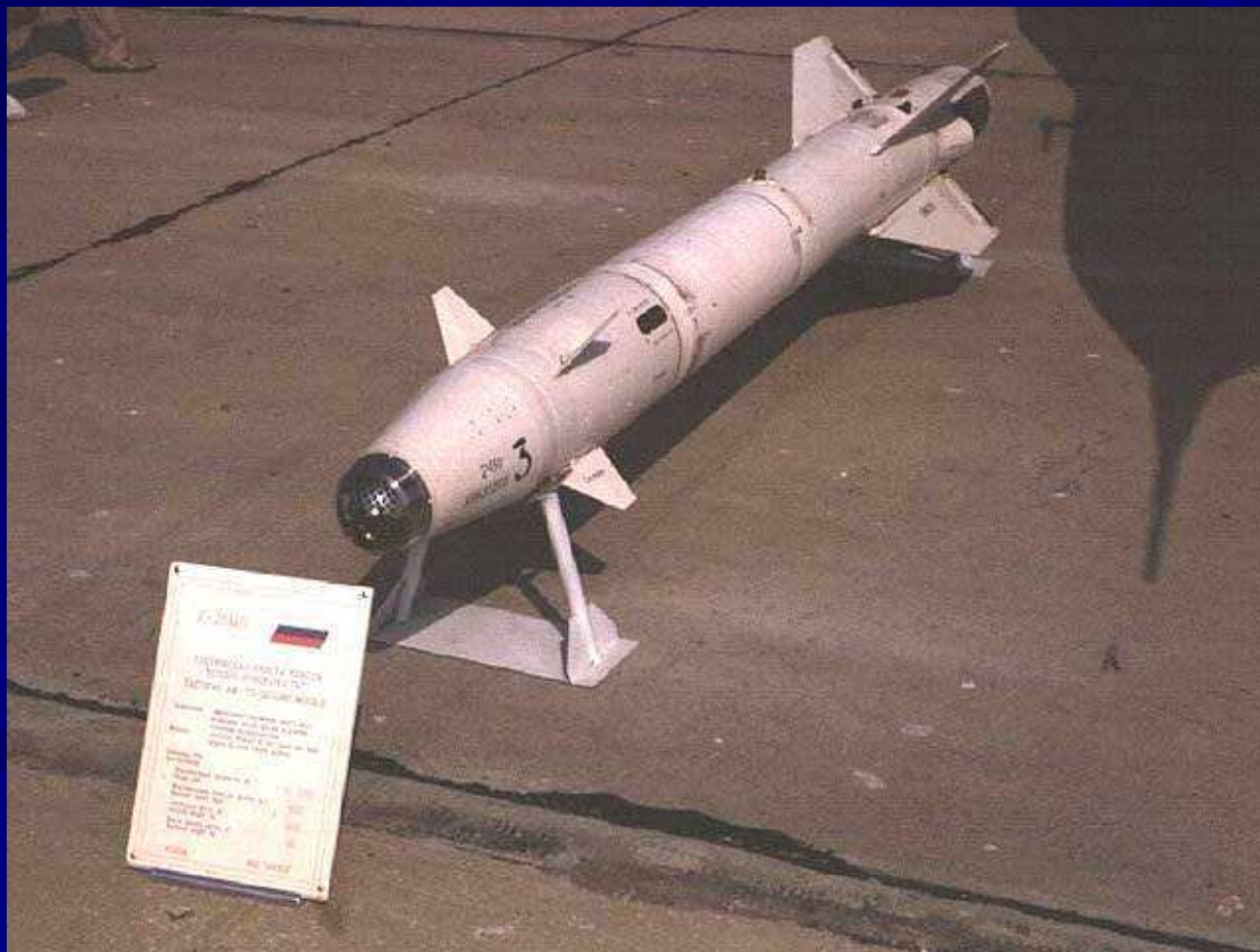


**Airborne GPS/INS** - Measures the location and altitude of the aircraft at up to 300 times per second.

**Ground GPS** - Records GPS data at up to 10Hz during flights to improve accuracy to CM level 1.



*Ракета Х-25МЛ*  
*с лазерной головкой самонаведения*  
*(СССР-РФ, ЦКБ "Геофизика")*



# *Бомбы Paveway III с лазерным наведением (Raytheon + Texas Instruments, США)*



*Алексей Толстой и его роман*

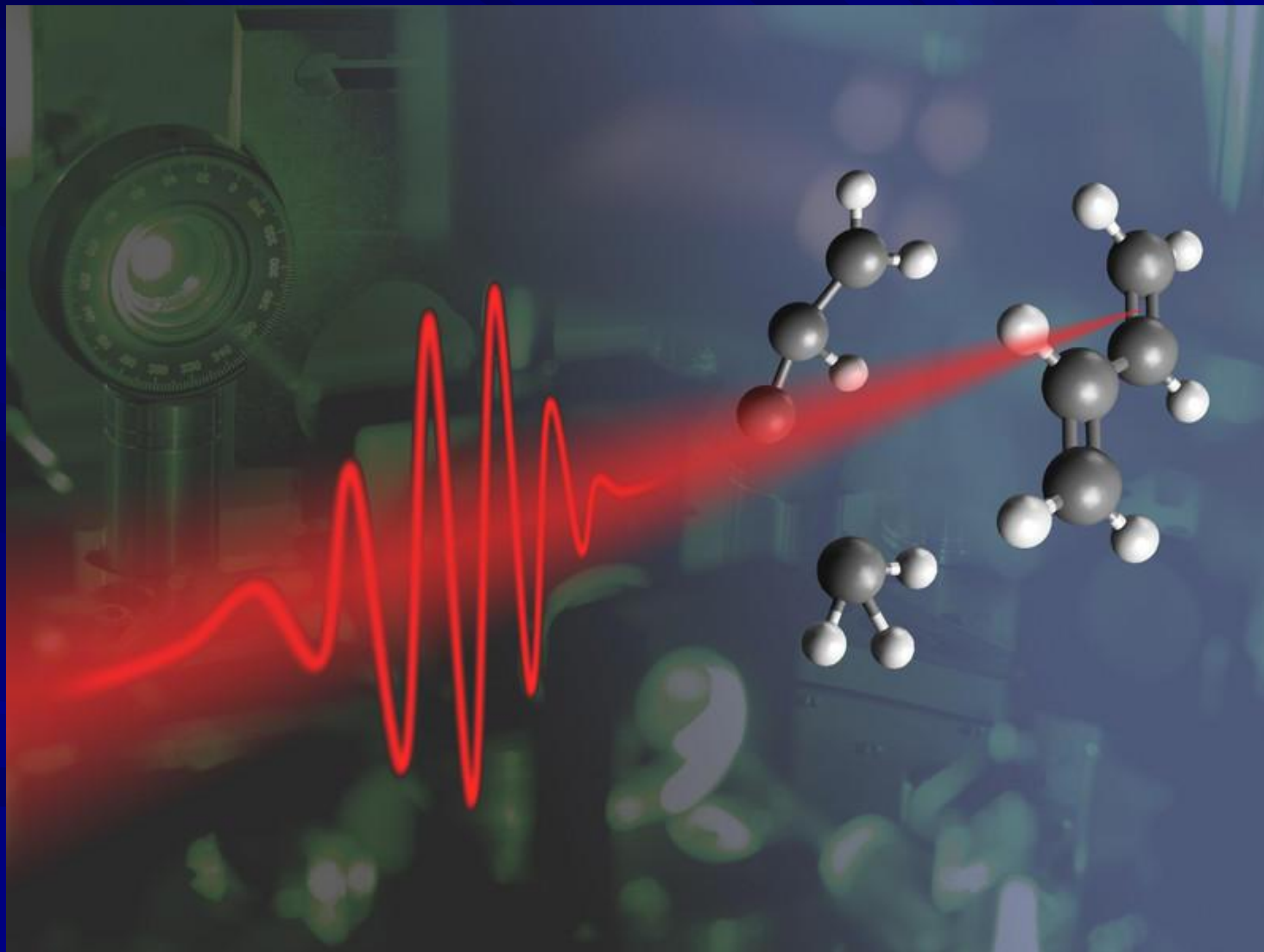


# Лазерный меч джедаев

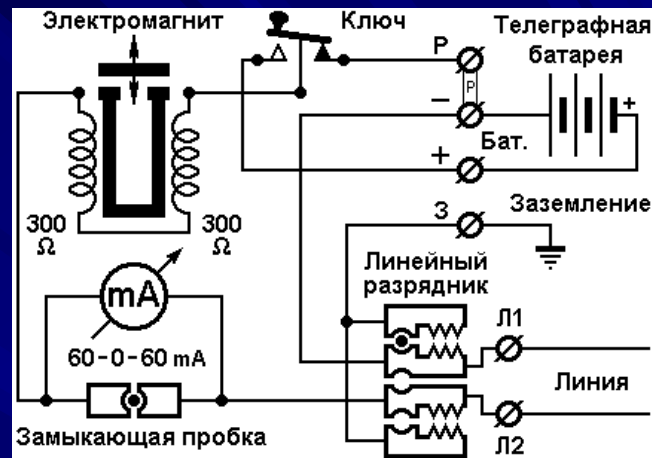
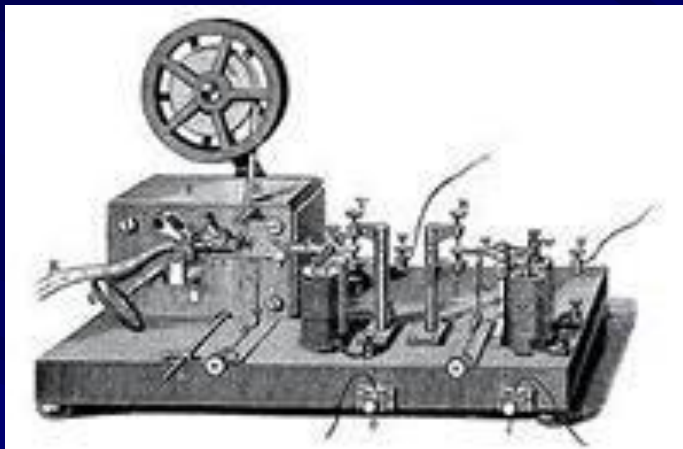




*Управление химическими процессами  
при помощи лазерных импульсов*

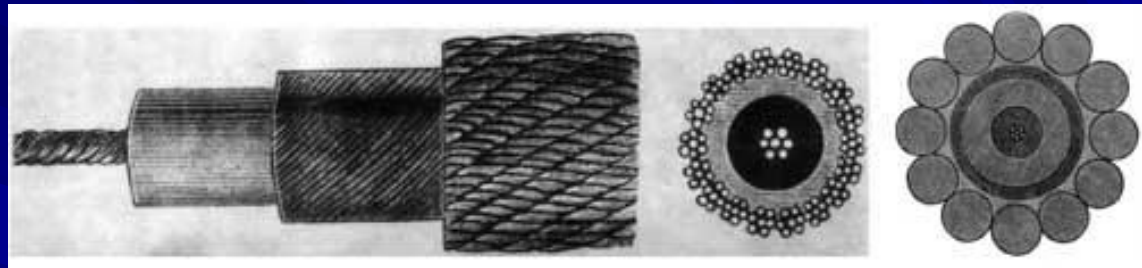
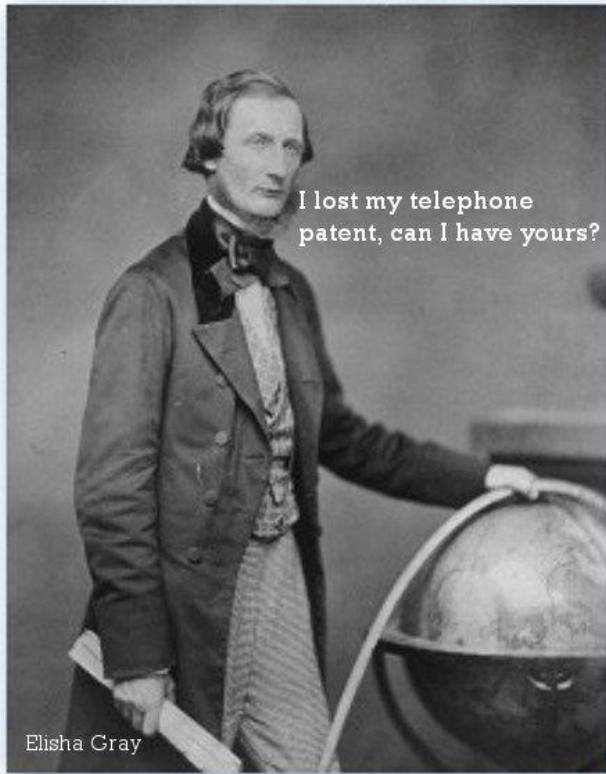


# Телеграфный аппарат Самуэля Морзе



Morse Telegraph Key  
(circa 1844)





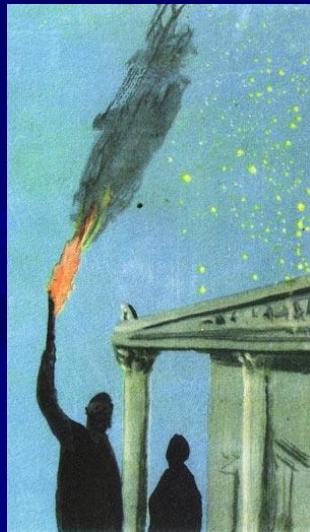
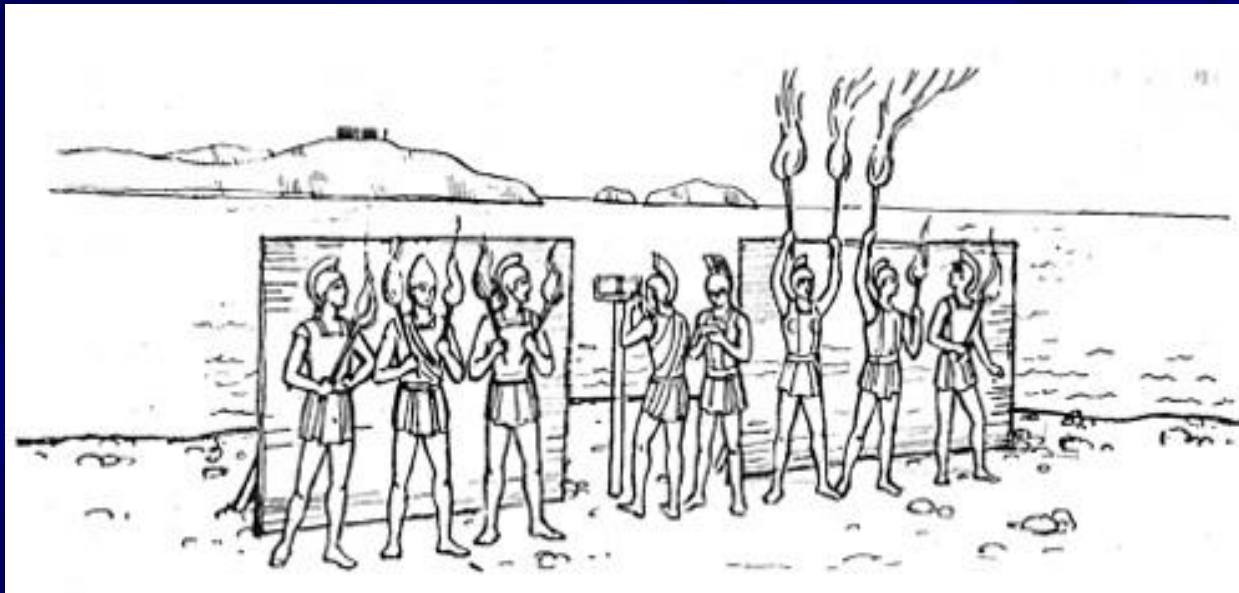
*Сайрус Филд*

*1857 - 1866 гг.*

*Стефан Цвейг*

*“Первое слово из-за океана”*

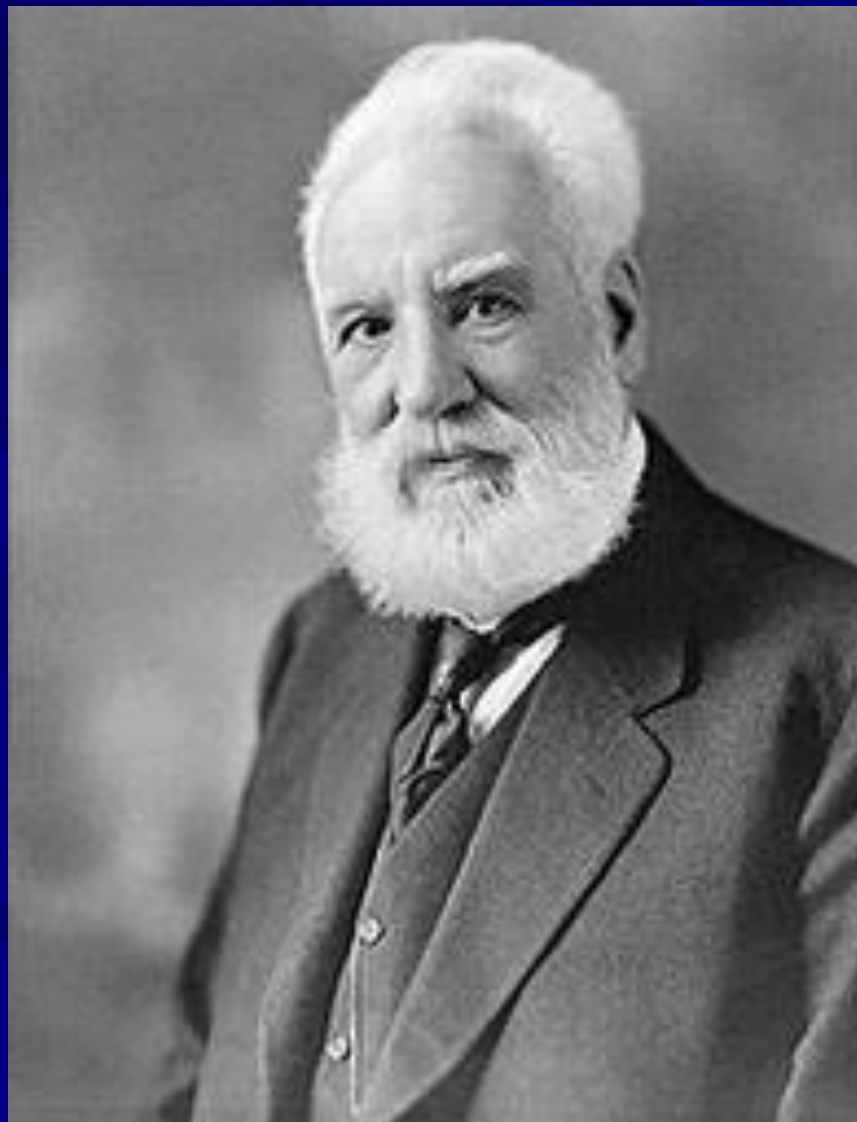
# Передача информации при помощи световых сигналов



**ОГОНЬ - ВЕСТНИК**



*Александр Грэхэм Белл*  
*( 1847 - 1922 )*





*Коммерческие и исследовательские структуры,  
созданные при участии Александра Белла*

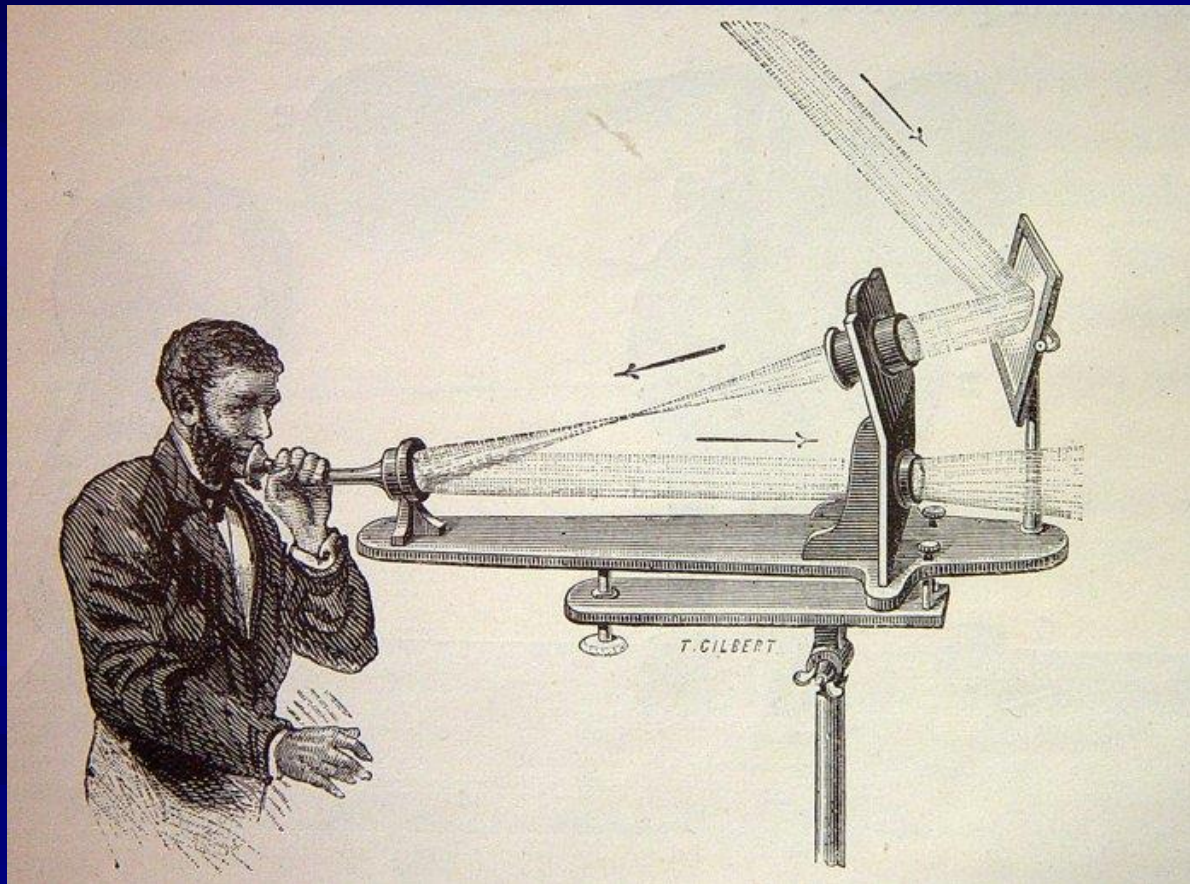
*- Bell Laboratories (в настоящий момент является  
исследовательским центром корпорации Alcatel-  
Lucent )*

*Количество нобелевских лауреатов - 13 (на 2009 г.)*

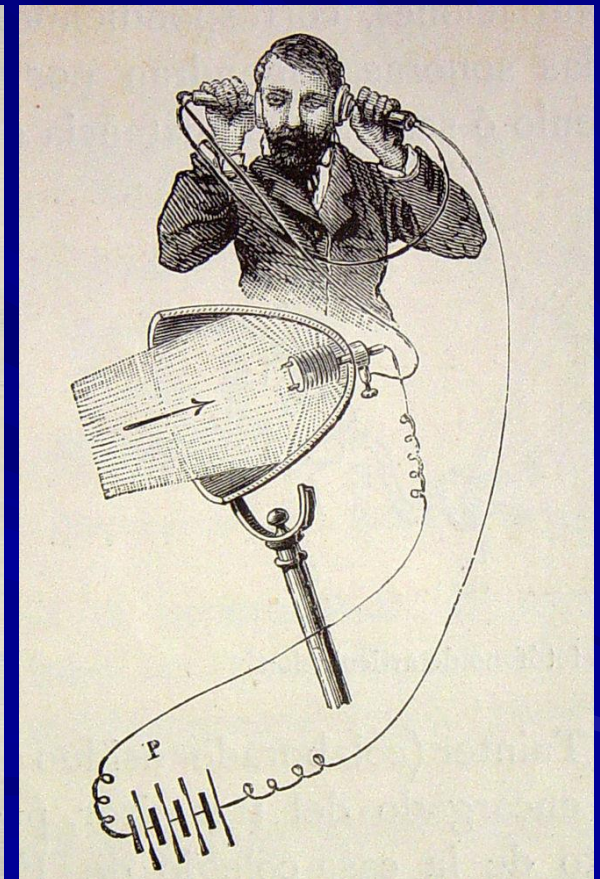
*- Bell Telephone Company*

# Фотофон Александра Белла

*Передатчик*



*Приёмник*





# Фотофон Александра Белла



*Натурные испытания*

## Почему фотофон Белла не имел коммерческих перспектив?

*В конце 19-го века наука и техника не были готовы решить две научно-технические задачи:*

- создания искусственного источника оптического излучения, работоспособность которого не зависела бы ни от времени суток, ни от состояния атмосферы*
- создания канализирующей оптическое излучение среды, по которой оптический сигнал мог бы распространяться так же эффективно, как электрический ток распространялся по медным телефонным проводам*

# Изобретатели радио



*Попов*

*Александр Степанович*



*Marconi*

*Guglielmo Marchese*

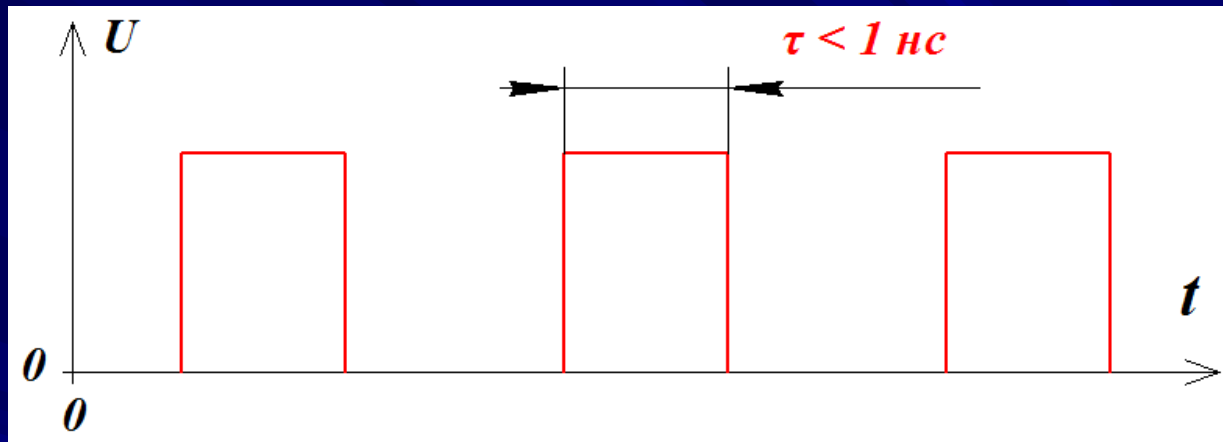
*Академик Дианов Евгений Михайлович*



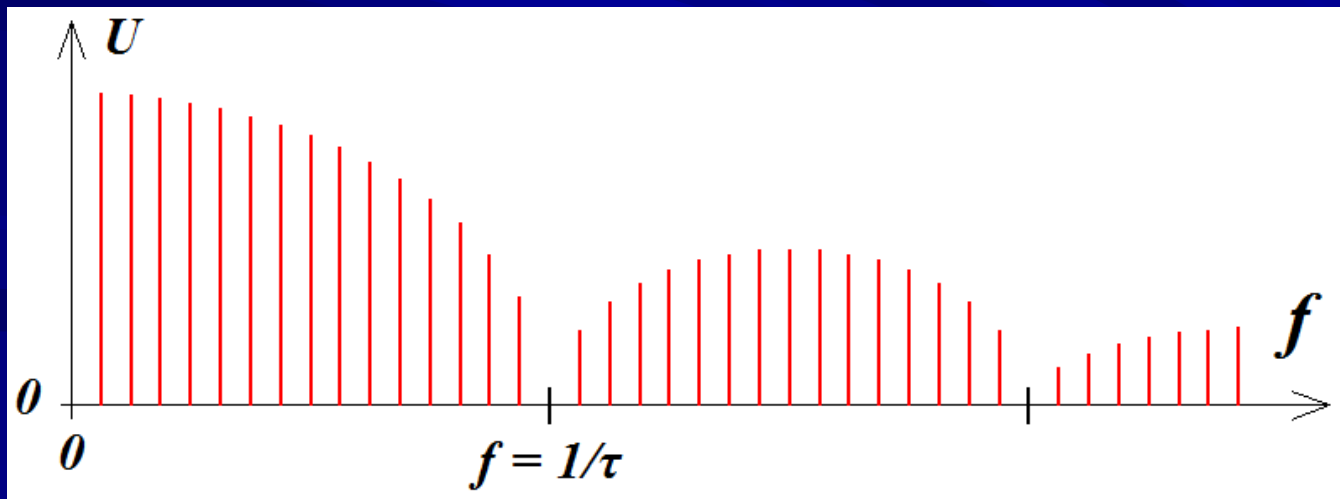
## Диапазоны частот

10000 м и более	30 кГц и ниже	Сверхдлинные (СДВ)
10000—1000 м	30—300 кГц	Длинные (ДВ)
1000—100 м	300—3000 кГц	Средние (СВ)
200—100 м	150—3000 кГц	Промежуточные (ПВ)
100—10 м	3—30 МГц	Короткие (КВ)
10 м—1 мм	30—300000 МГц	Ультракороткие (УКВ)
10—1 м	30—300 МГц	Метровые
100—10 см	300—3000 МГц	Дециметровые
10—1 см	3000—30000 МГц	Сантиметровые
1 см—1 мм	30000—300000 МГц	Миллиметровые

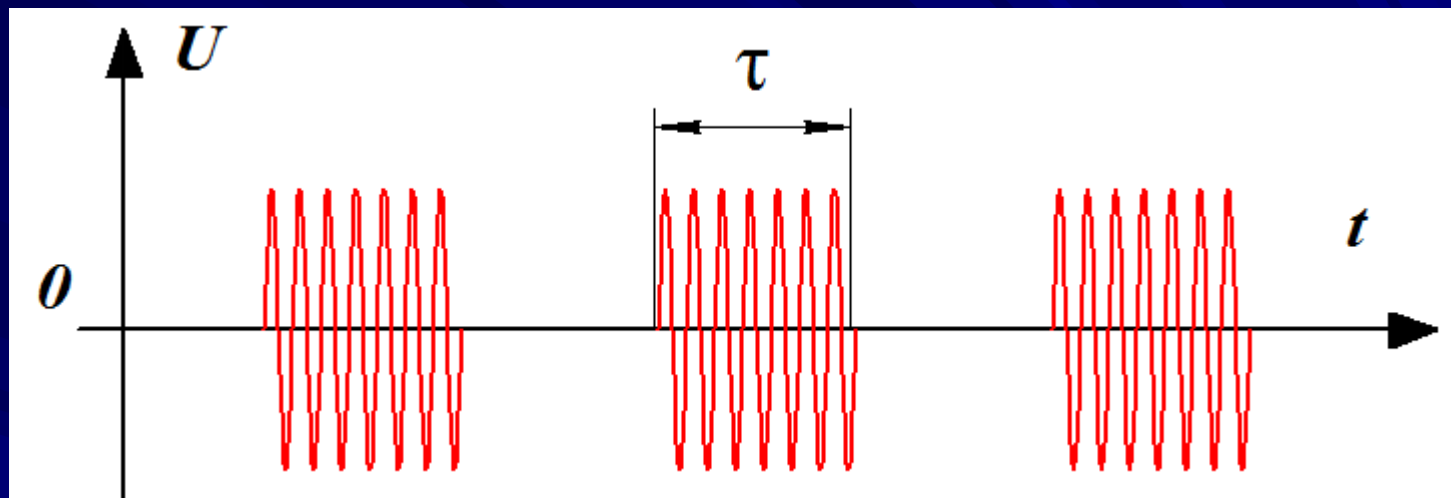
# Модулирующий сигнал во временной области



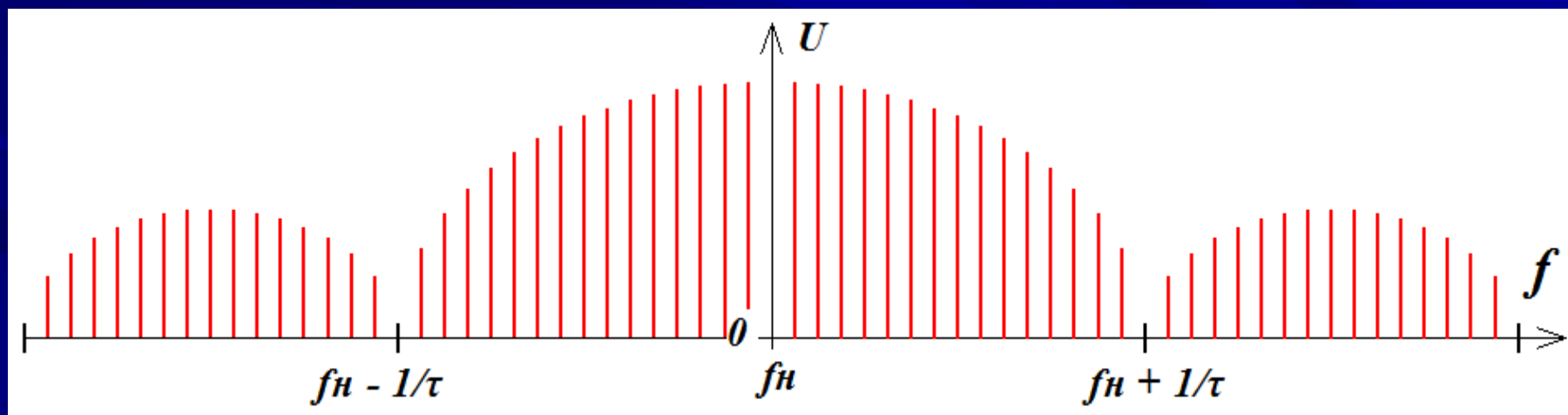
# Модулирующий сигнал в частотной области



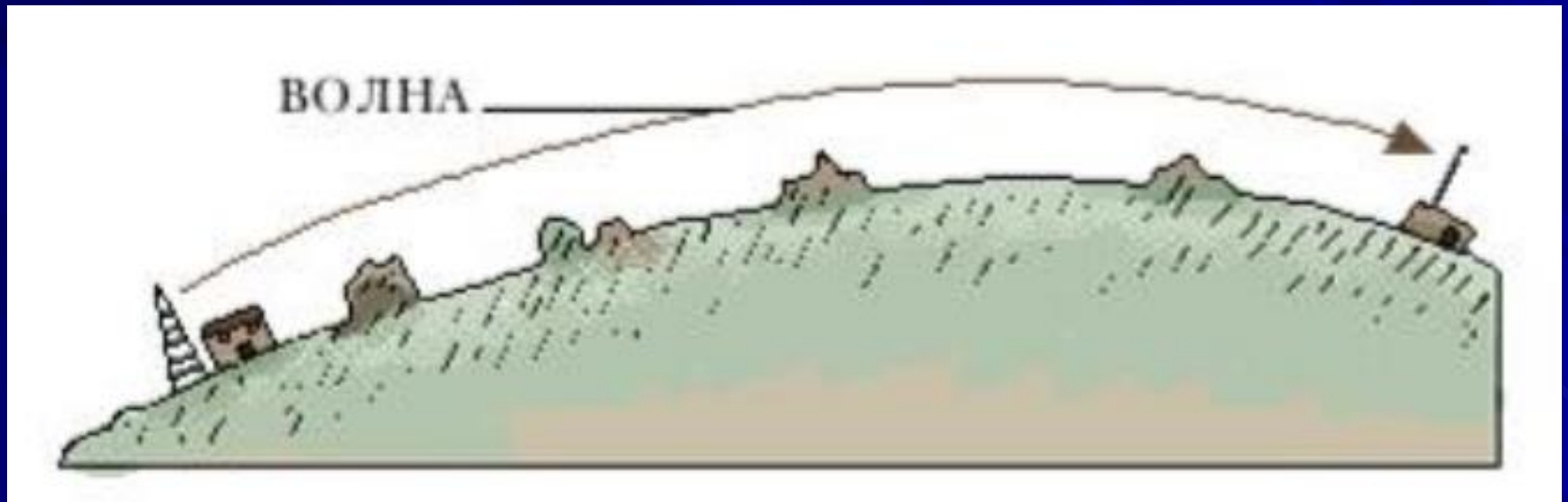
## Модулированный сигнал во временной области



## Модулированный сигнал в частотной области



*Огибание земной поверхности  
длинными и средними волнами*



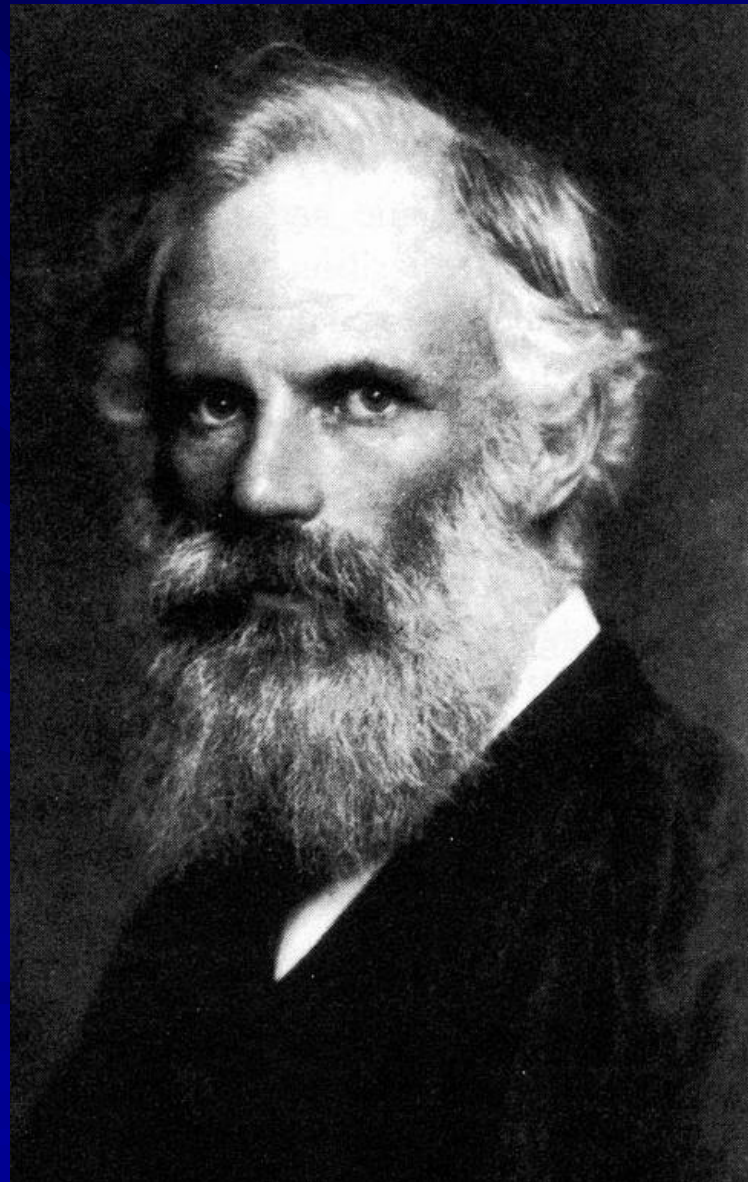


# Распространение коротких волн

## КОРОТКИЕ ВОЛНЫ



# Оливер Хэвисайд



# Эдуард Эптон



*Экспериментальное подтверждение  
существования ионосферы*

*1924 г.*

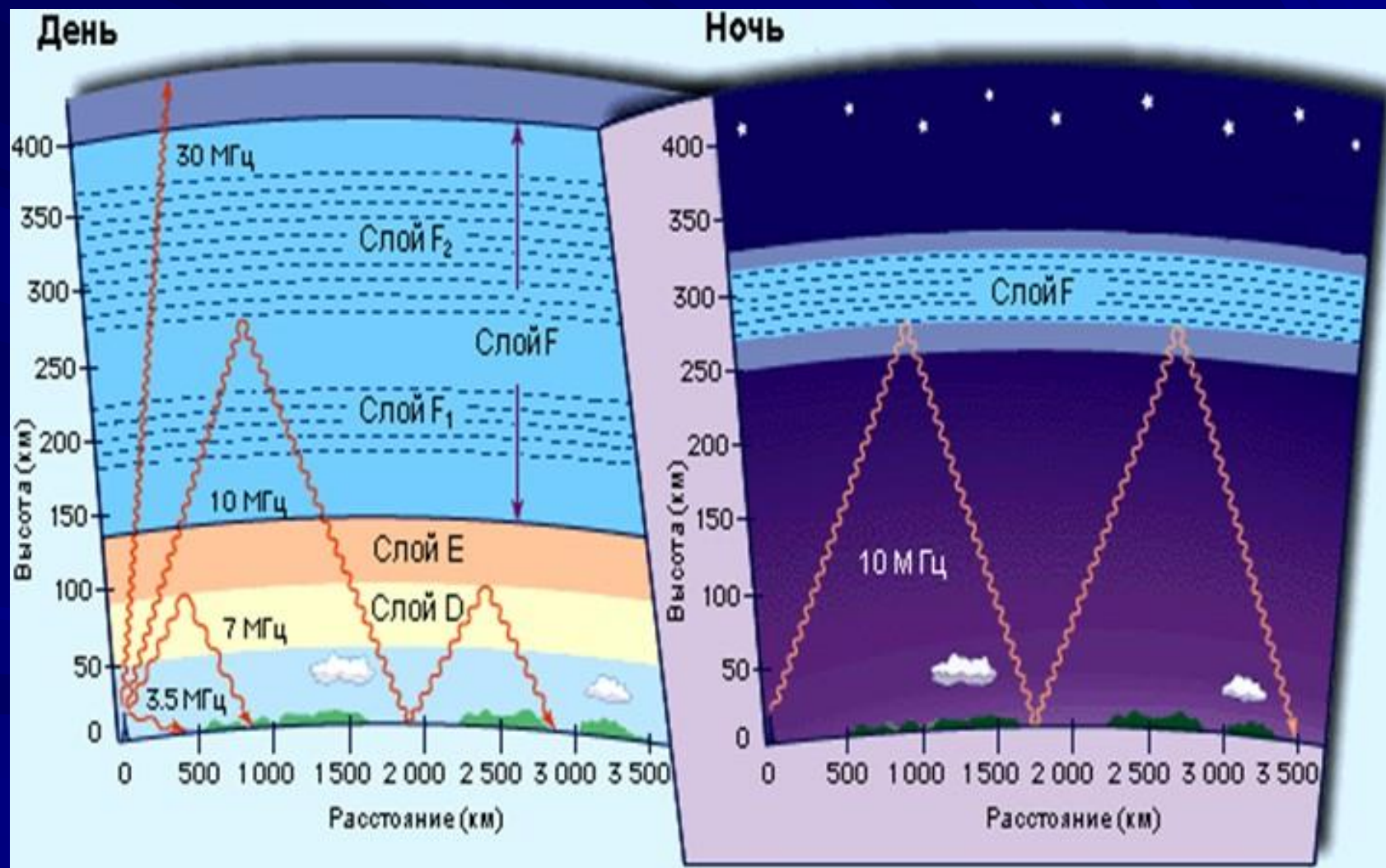
*Обнаружение  
верхнего отражающего слоя  
ионосферы*

*1927 г.*

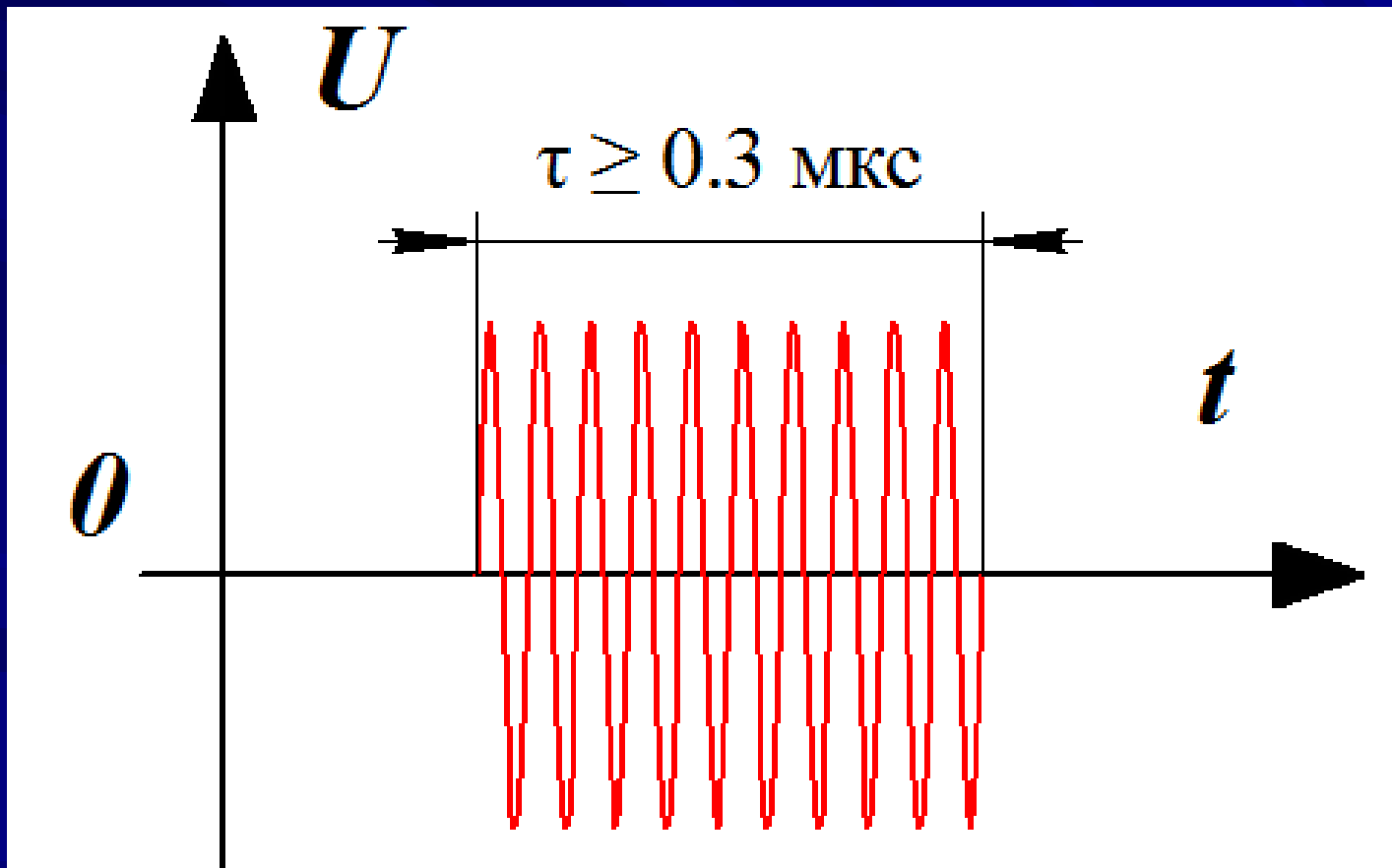
*Нобелевская премия*

*1947 г.*

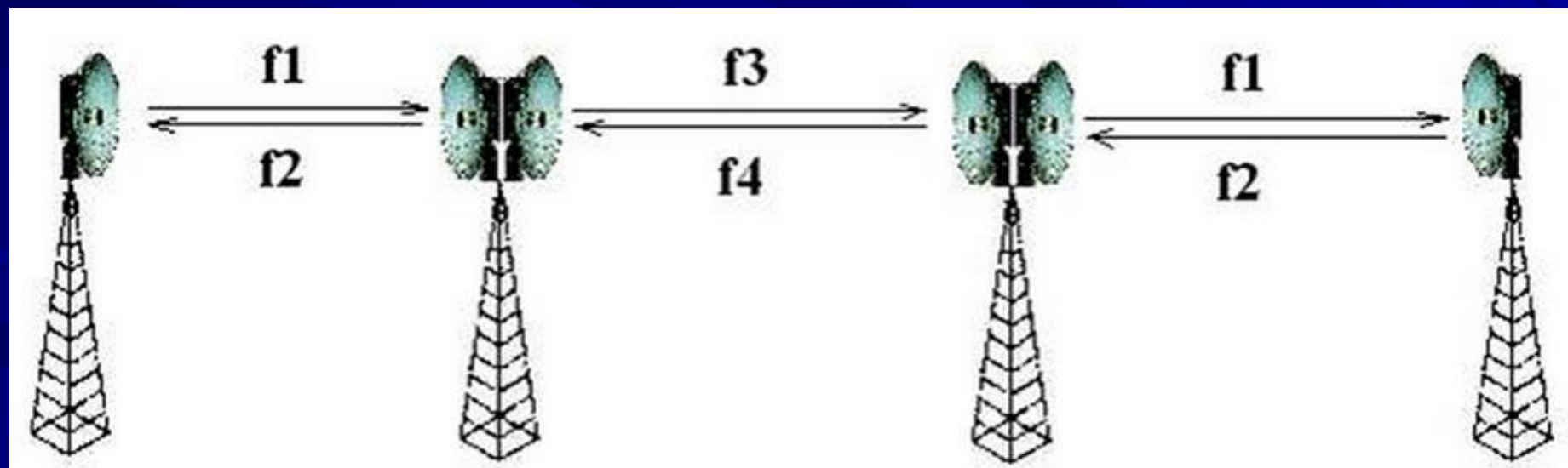
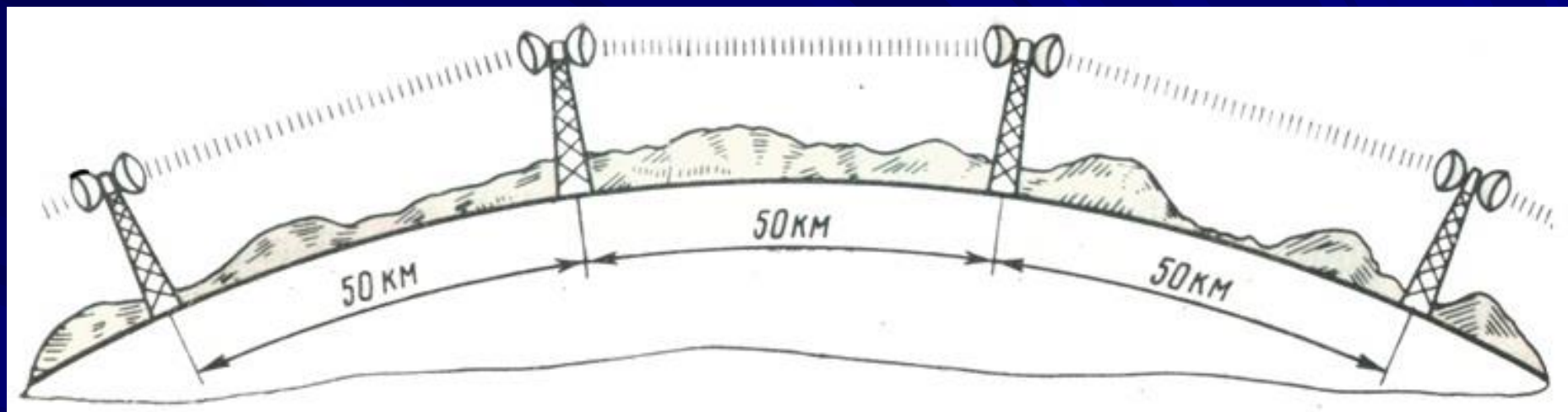
# О проблемах распространения коротких волн



Минимальная длительность радиоимпульса  
для случая  
максимальной применимой частоты  
(~30 МГц)



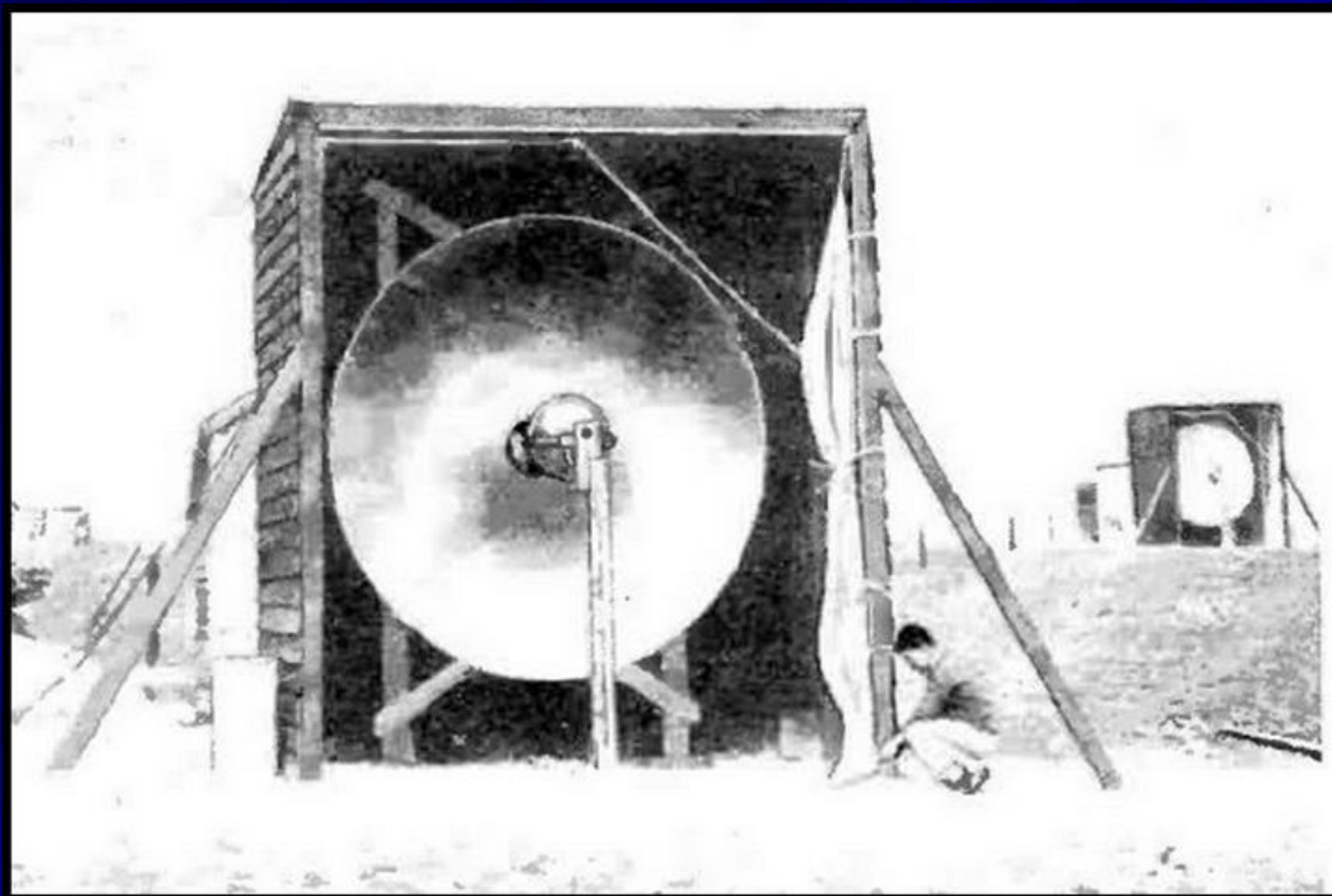
## Построение радио-релейных линий



Изобретатель радиорелейной связи Эмиль Г. Форесио (1899 г.)



*Ретрансляторы экспериментальной микроволновой (1.67 ГГц) радиорелейной линии, разработки ИТТ - ЛСТ (1931)*





*Ретрансляторы экспериментальной микроволновой (1.67 ГГц) радиорелейной линии, разработки ИТТ - ЛСТ (1931)*



## *Некролог Андрэ Габриэля Клавира*

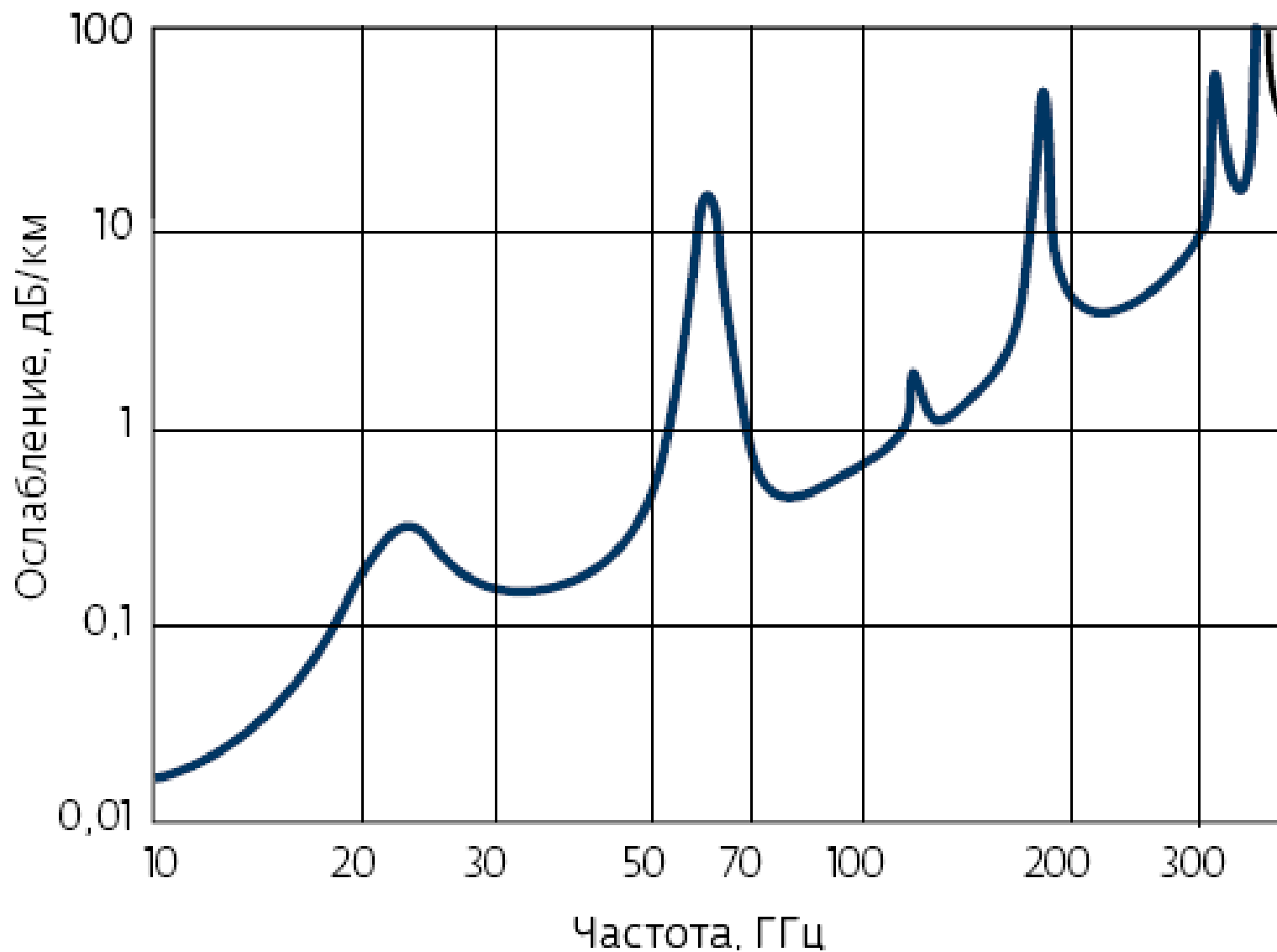
**Andre Clavier Is Dead at 77; A Pioneer in Microwave Radio**

*New York Times (1857-Current file); Jan 11, 1972; ProQuest Historical Newspapers The New York Times*  
pg. 40

# ***Andre Clavier Is Dead at 77; A Pioneer in Microwave Radio***



# Погонные потери в атмосфере



# *Ретранслятор радиорелейной линии*



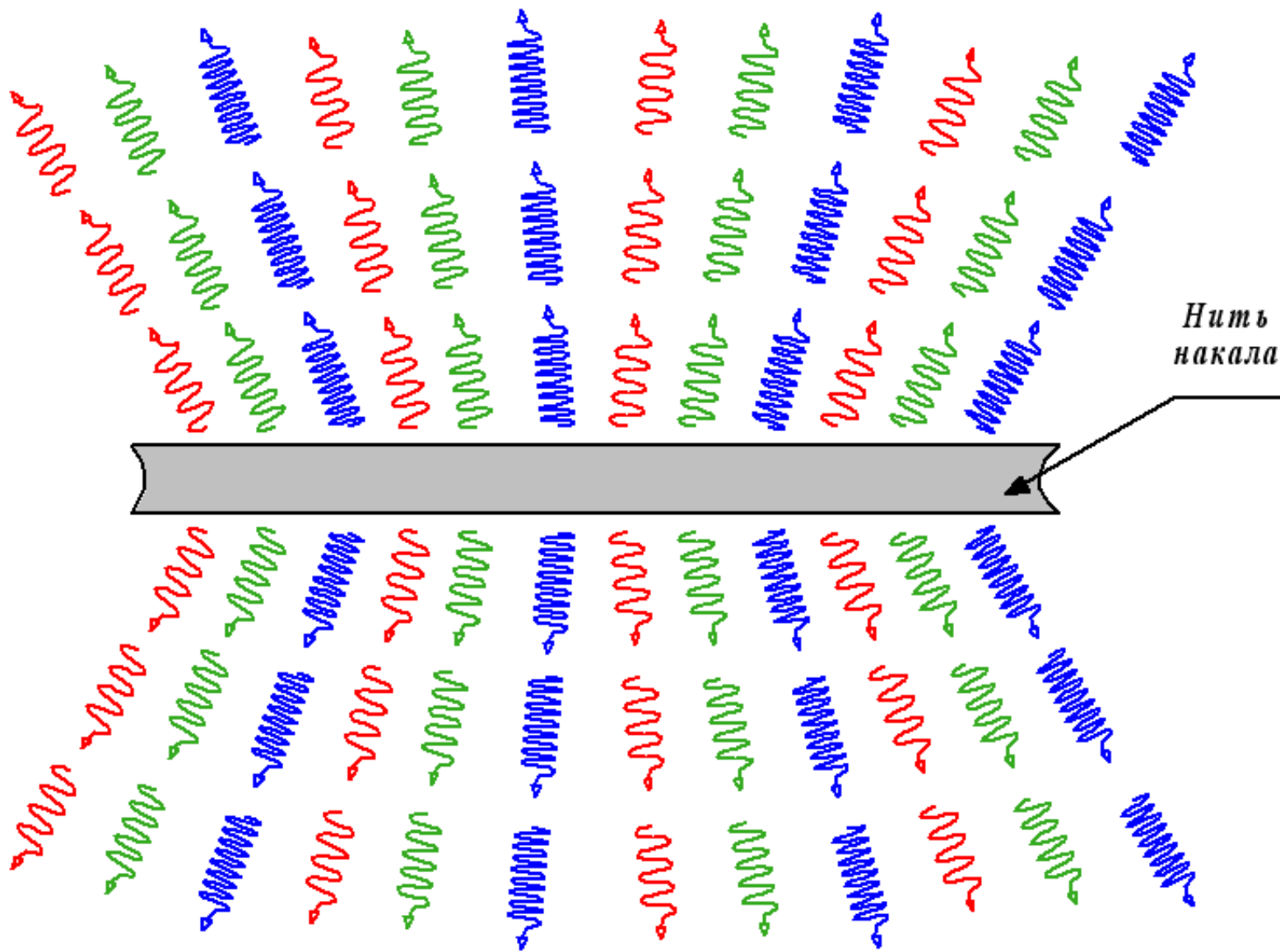
**Радиорелейное оборудование E-диапазона**  
**некоторых фирм-разработчиков**  
**(по данным производителей)**

<b>Производитель</b>	<b>Модель</b>	<b>Частоты, ГГц</b>	<b>Скорость, Гбит/с</b>	<b>Рабочее расстояние, км</b>
NEC (Япония) www.nec.com	ePASOLINK	71–76/81–86	До 1,2	Сотни метров
E-Band Communications (США) www.e-band.com	E-Link 1000-EXR	71–76/81–86	1,25	Порядка 5
	E-Link 1000- LR/ELR	71–76/81–86	1,25	Порядка 5
	E-Link 2500	71–76/81–86	2,5	Порядка 5
Tyco Electronics (ранее ADC Telecom- munications) (США) www.adc.com	FlexWave MMW 125	71–76/81–86	1	1–6
	FlexWave MMW 110	71–76/81–86	3,072	1–6

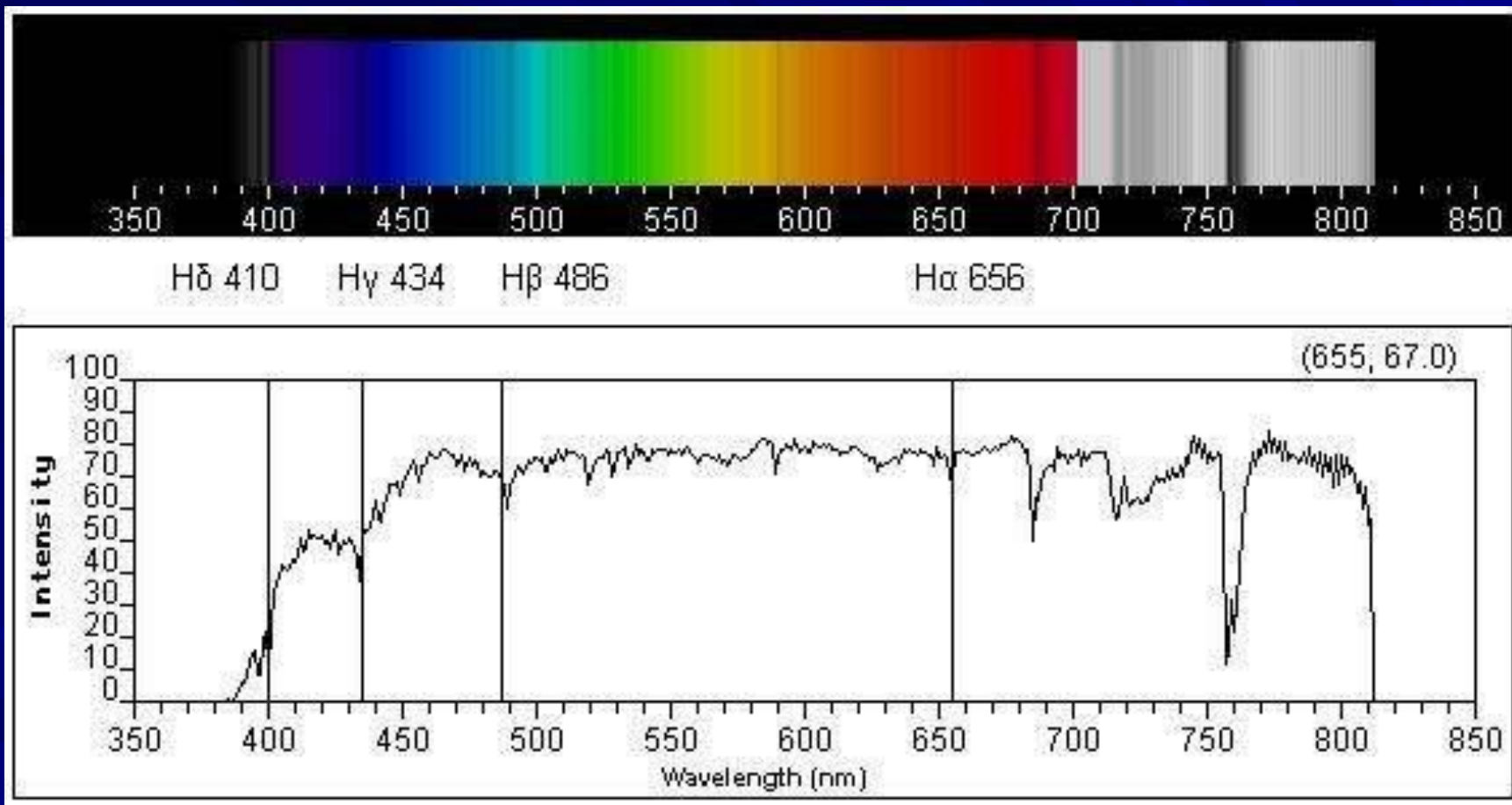
# Лампа накаливания



# Спонтанное излучение лампы накаливания



# Спектр излучения лампы накаливания





*Преломление электро-магнитной волны*  
*на границе раздела двух сред*

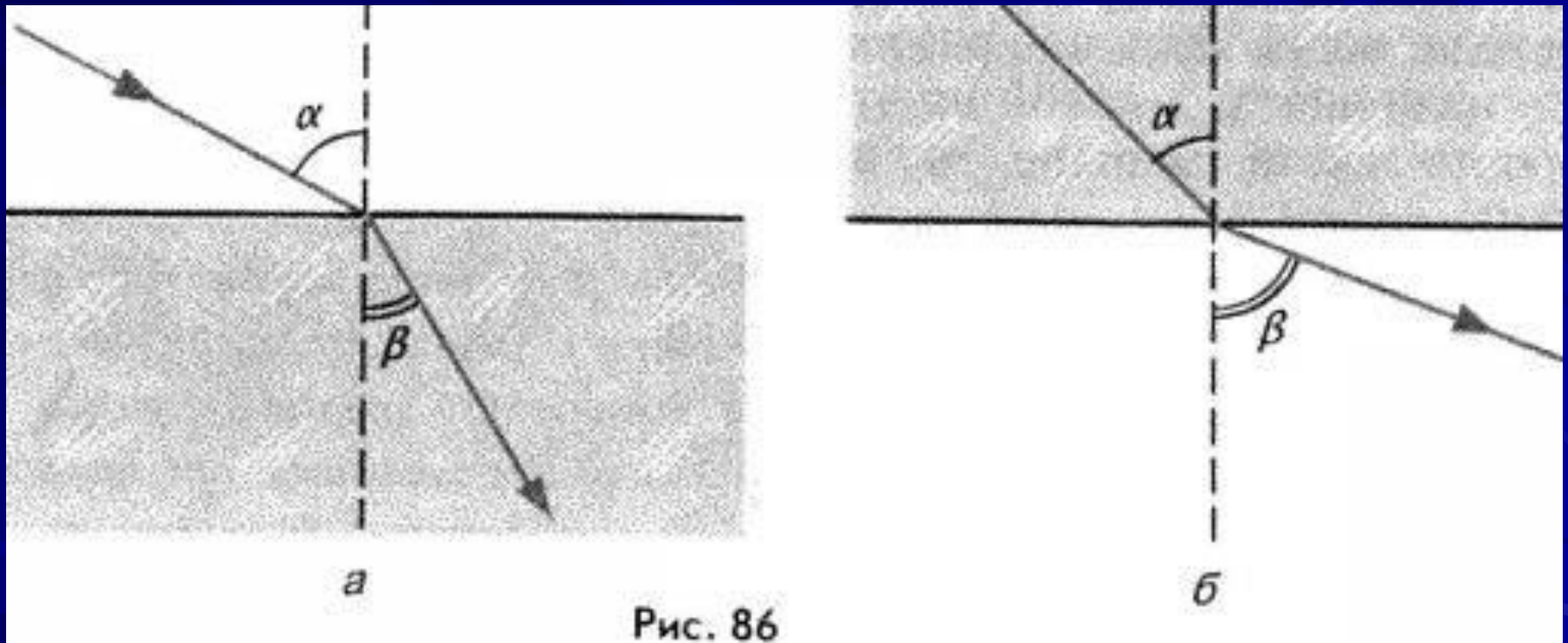
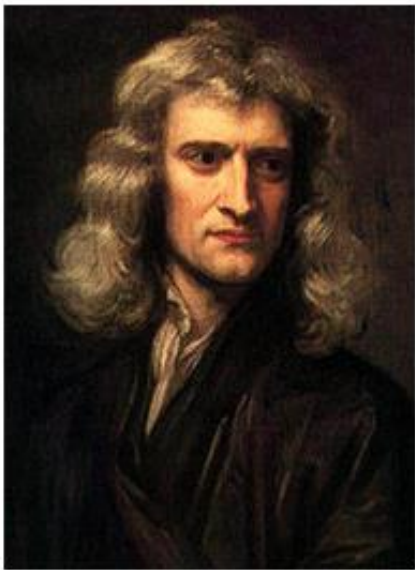
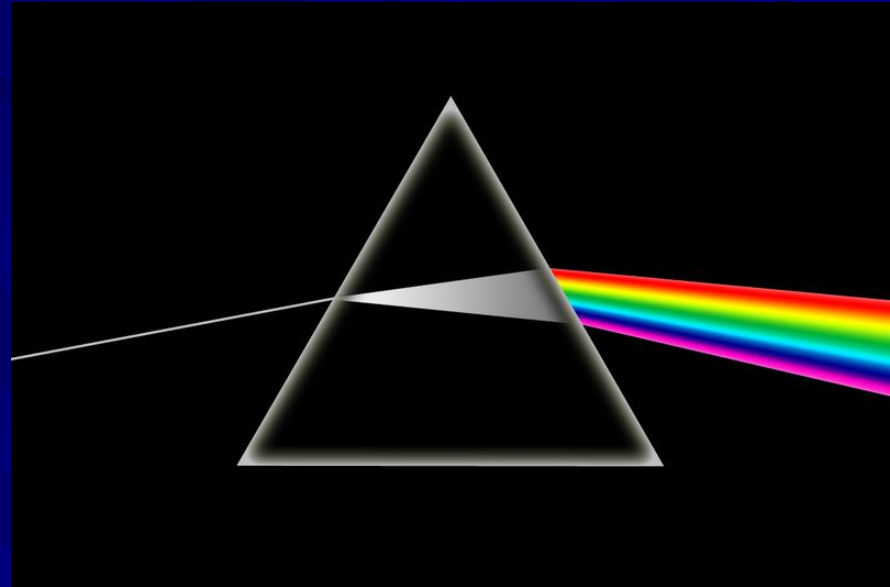


Рис. 86

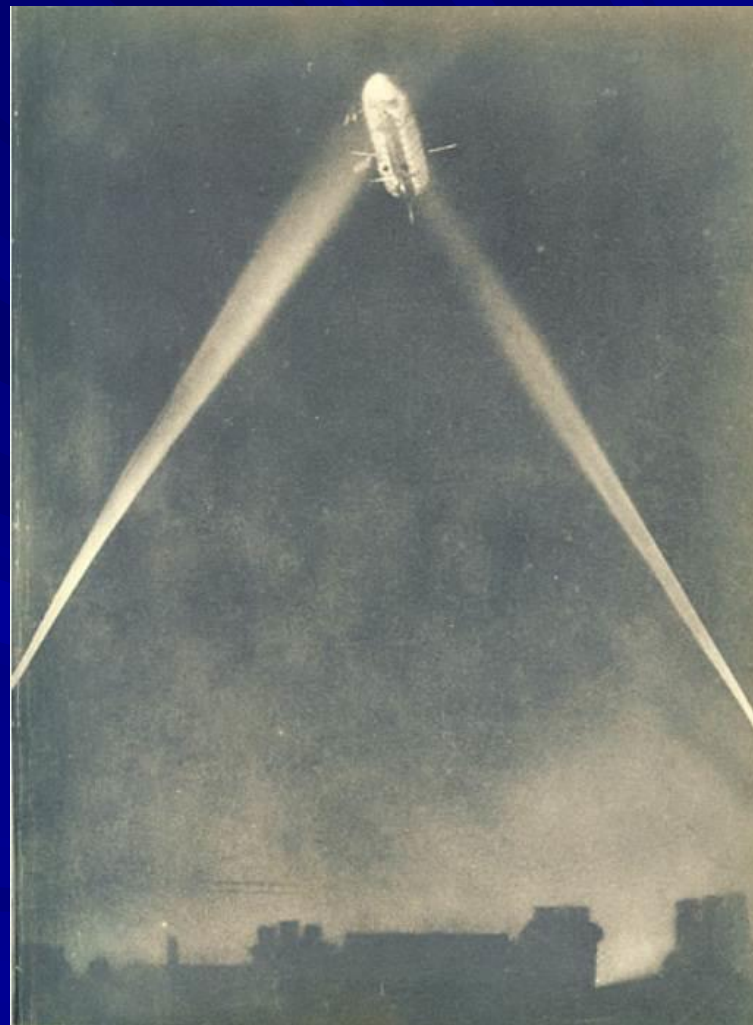
# 1666 г. Сэр Исаак Ньютон



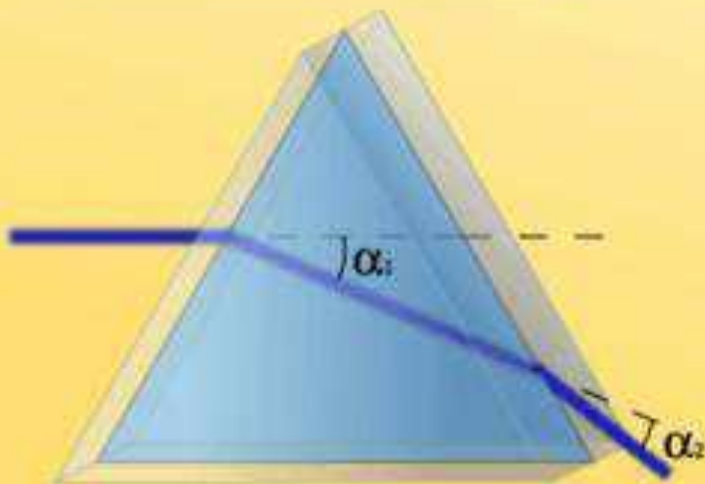
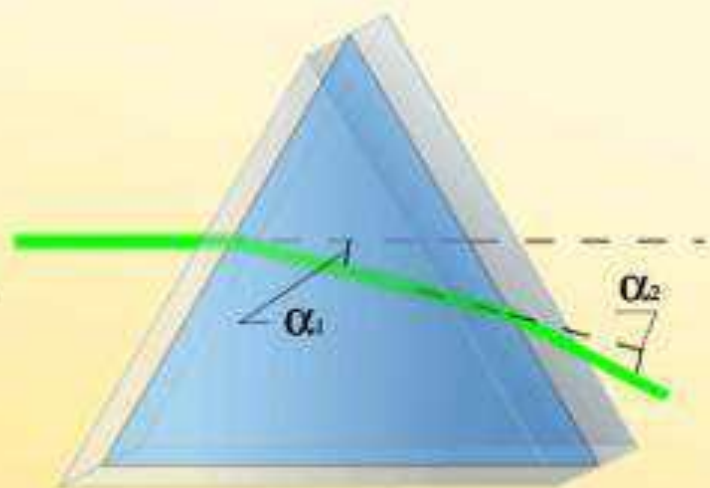
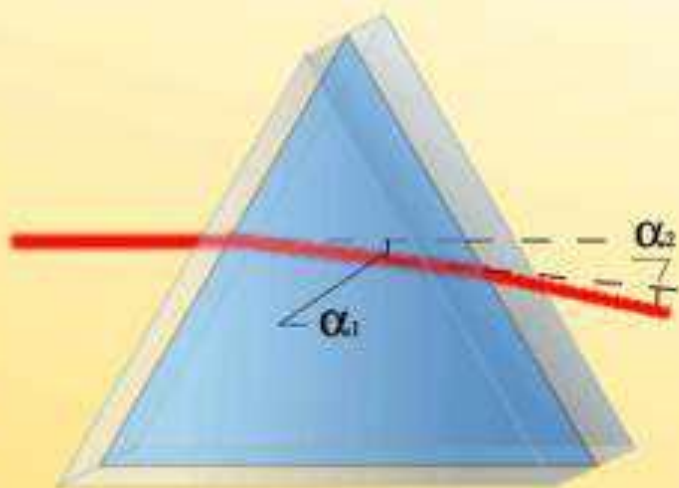
Исаак Ньютон



# Почему расфокусируются лучи прожекторов и фонарей?



# Преломление монохроматического света



$$\alpha_{1K} < \alpha_{13} < \alpha_{1C}$$

$$\alpha_{2K} < \alpha_{23} < \alpha_{2C}$$

*Излучение*  
*монохроматического источника сигнала*

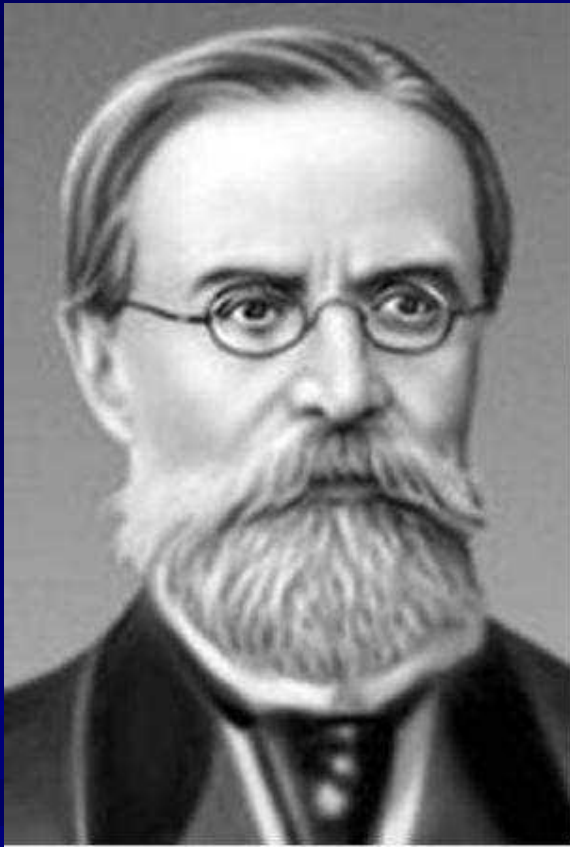


*Переотражение излучения*  
*монохроматического источника сигнала*

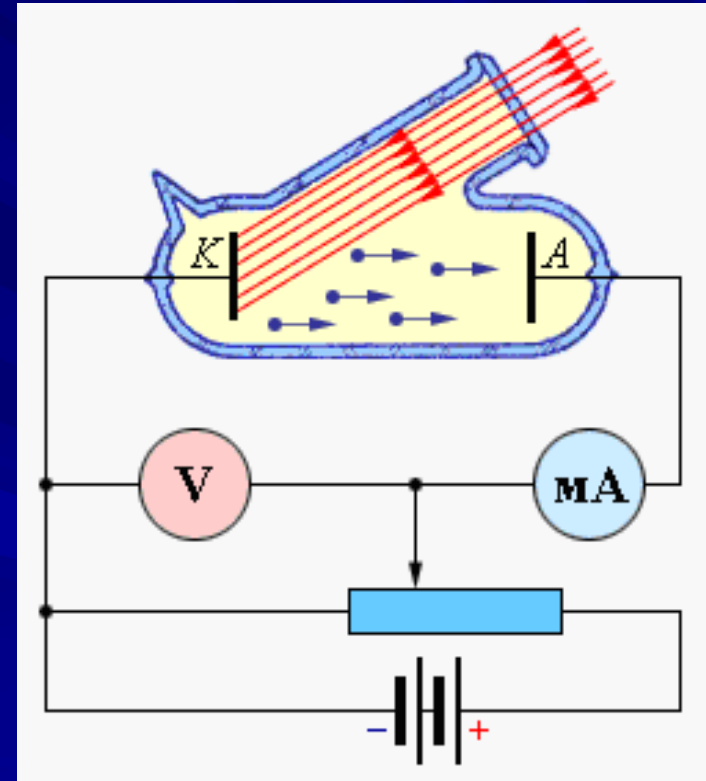


## Создание лазера : хронология событий

*Эпизод первый : 1888 год - проведены первые фундаментальные исследования фотоэффекта*

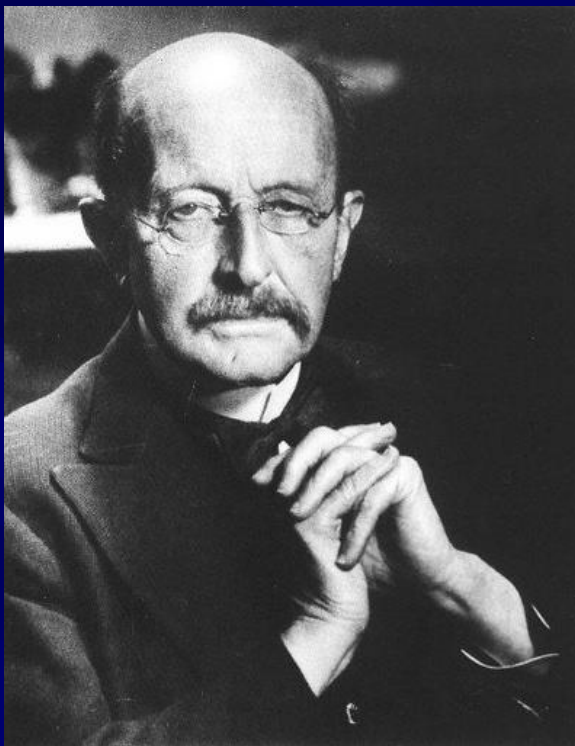


*А. Г. Столетов*



*Проявление  
фотоэффекта*

# Создание лазера : хронология событий



*Эпизод второй : 1900 год*

- Заложены основы квантовой теории*
- Введено понятие “квант”*
- Теоретически установлена взаимосвязь энергии кванта и его частоты:  $E = h \times f$*

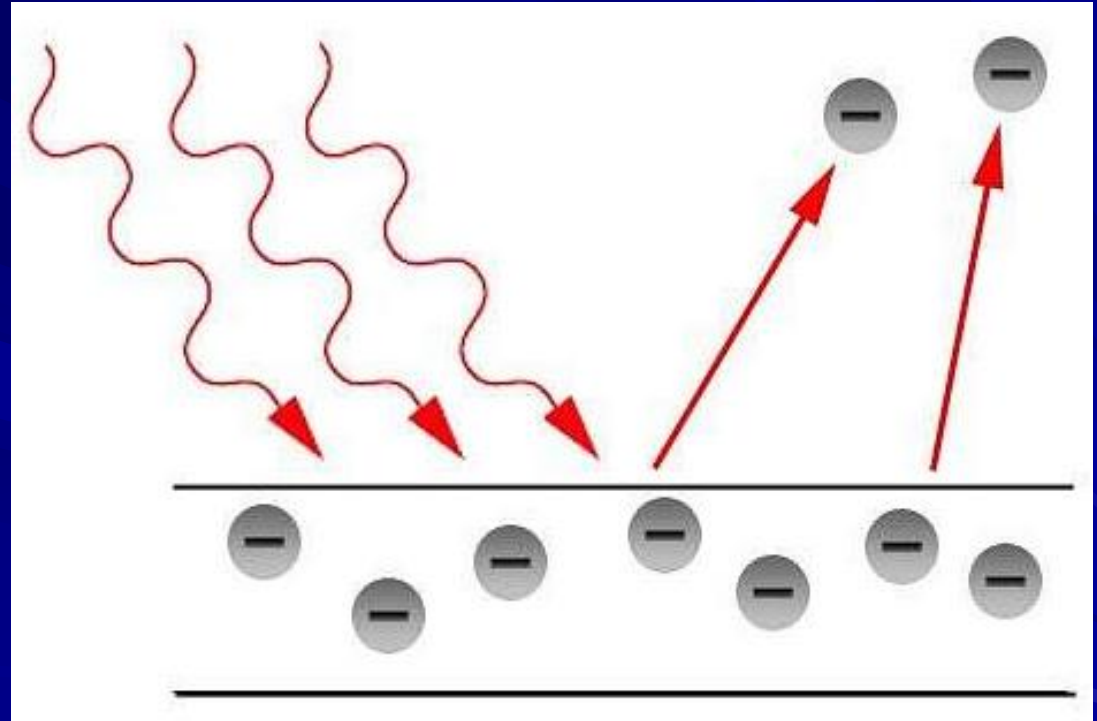
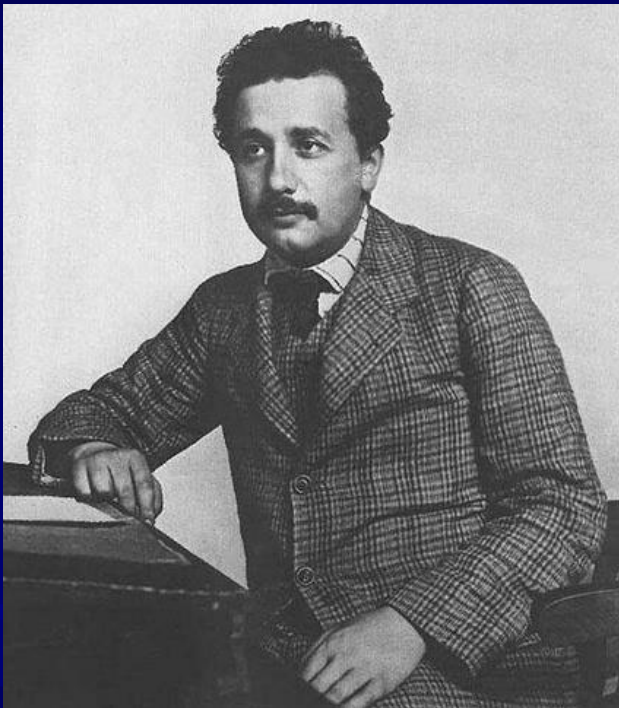
*Макс Планк*

Нобелевская премия по физике 1918 г. «в знак признания его заслуг в деле развития физики благодаря открытию квантов энергии»



## Создание лазера : хронология событий

*Эпизод третий : 1905 год - для объяснения фотоэффекта вводится понятие фотона - как кванта электромагнитного излучения*

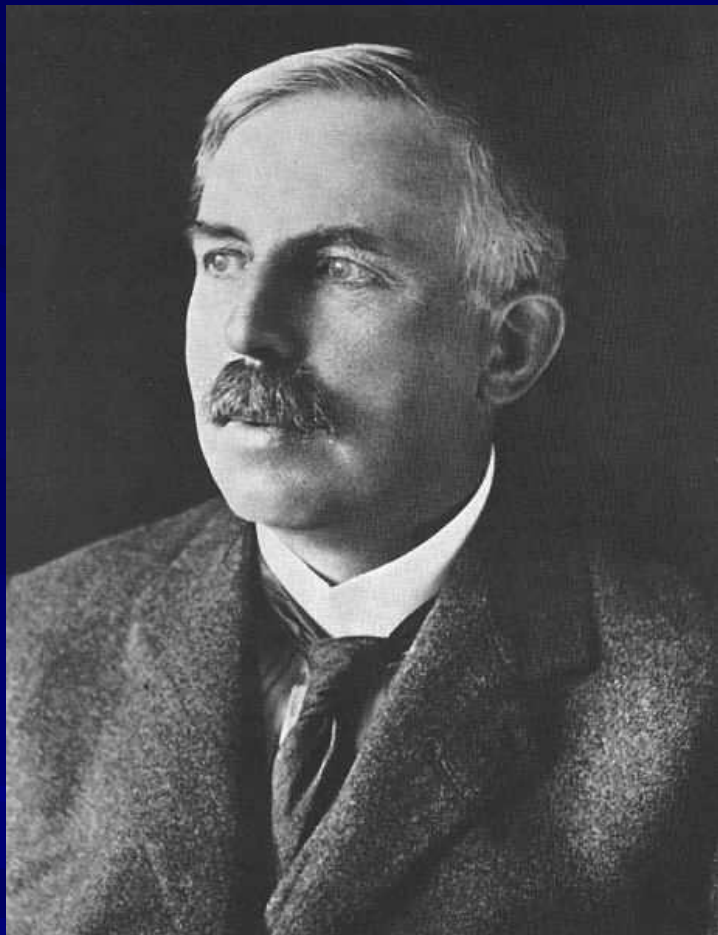


*Альберт Эйнштейн*

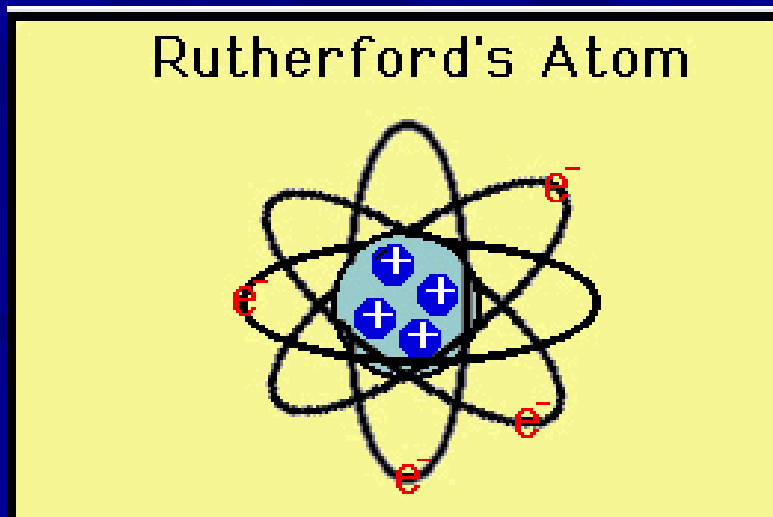
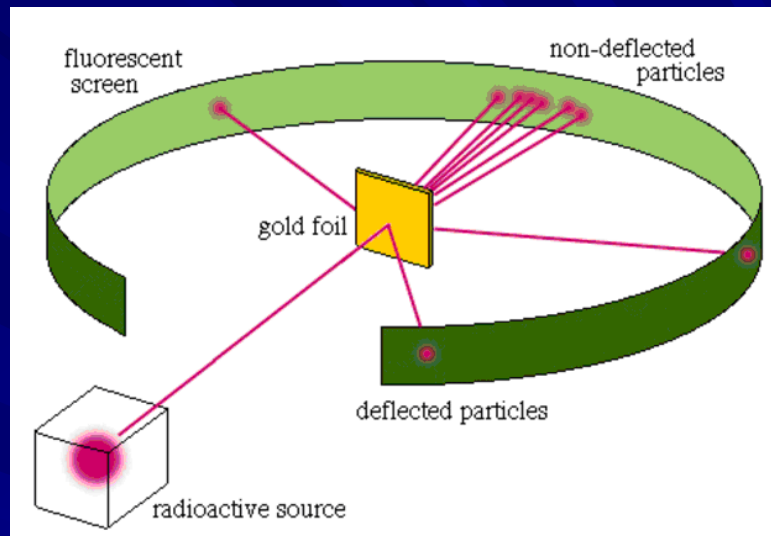
Нобелевская премия по физике 1921 г.

# Создание лазера : хронология событий

## Эпизод четвёртый : 1911 год - планетарная модель атома

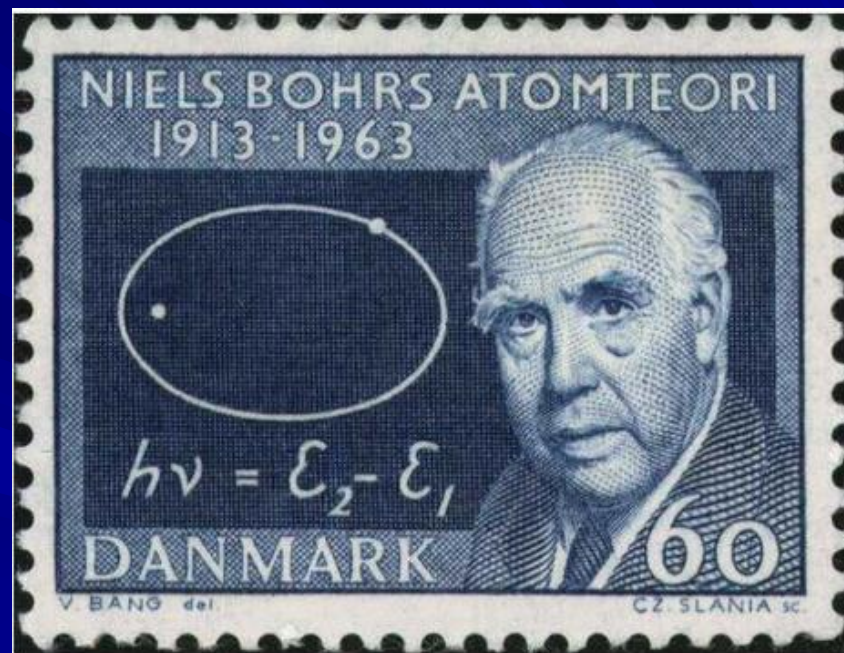


*Сэр Эрнст Резерфорд*



## Создание лазера : хронология событий

**Эпизод пятый : 1913 год - теоретическое обоснование планетарной модели Резерфорда с использованием квантовой теории Планка**

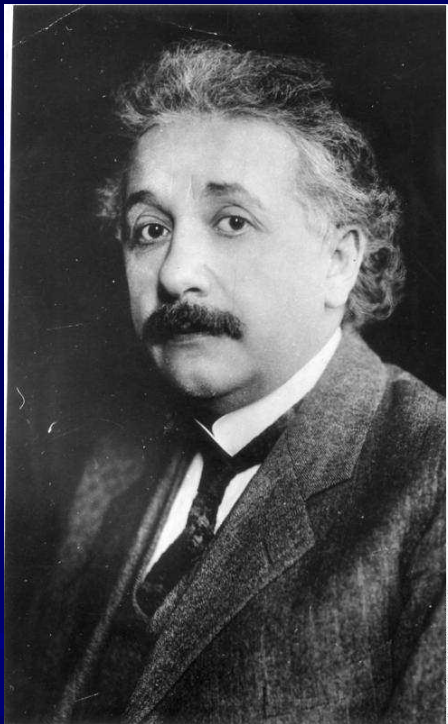


***Нильс Бор***

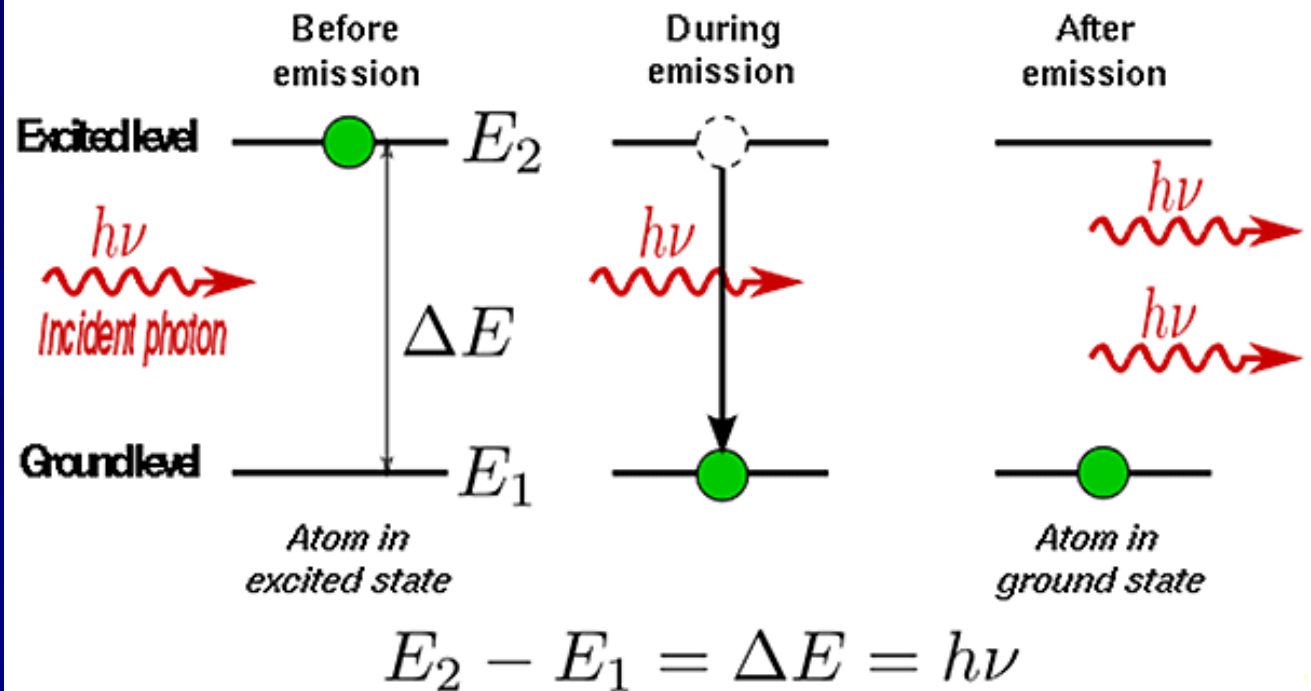
**Нобелевская премия по физике 1922 г «за заслуги в изучении строения атома»**

# Создание лазера : хронология событий

Эпизод шестой - 1917 год - теоретически предсказана возможность индуцированного излучения



Википедия, БФ1181100011918  
Фот. с. 102, 11028 сг.



А. Эйнштейн

Индукцированное излучение

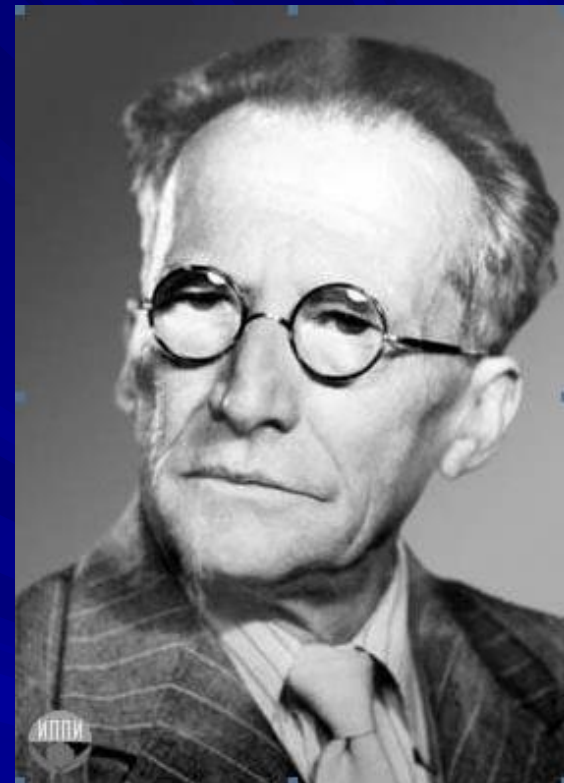
# Нобелевские премии по физике 1932 - 1933



*Вернер  
Гейзенберг*



*Поль  
Дирак*



*Эрвин  
Шредингер*

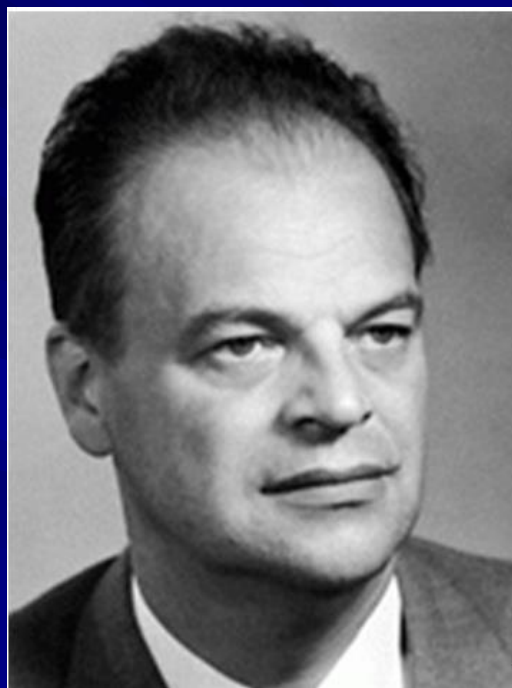
*Создание лазера : хронология событий*

*Эпизод седьмой - 1954 год - экспериментальное подтверждение возможность индуцированного излучения*

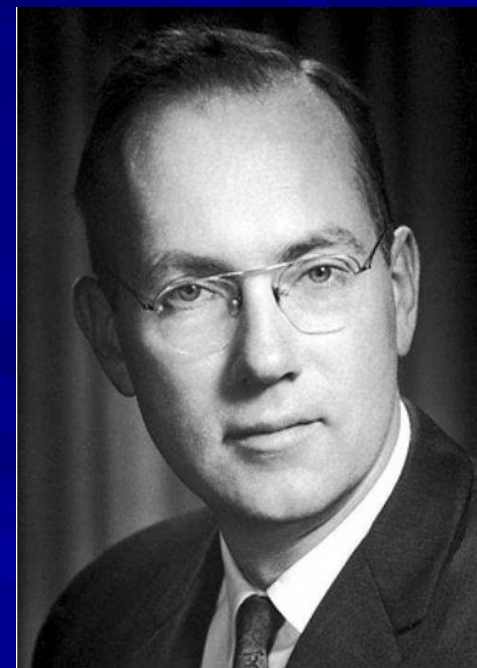
**Нобелевская премия по физике 1964 года**



*Прохоров  
Александр  
Михайлович*

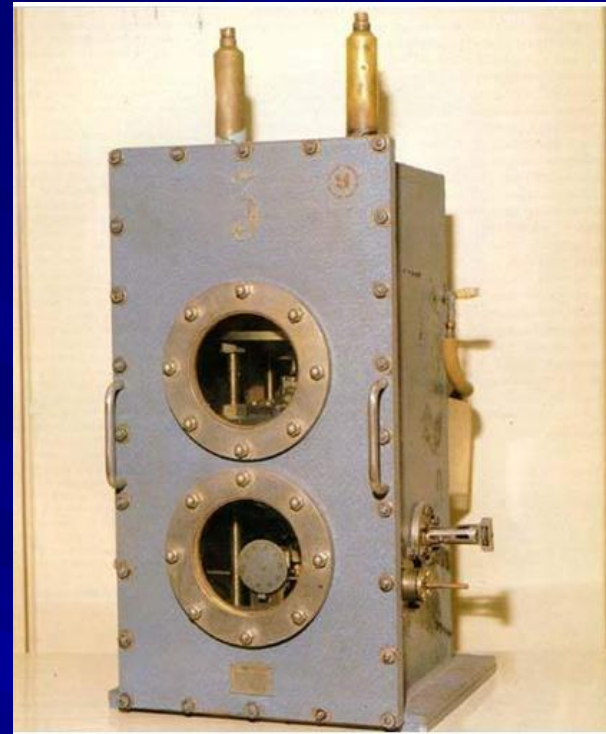
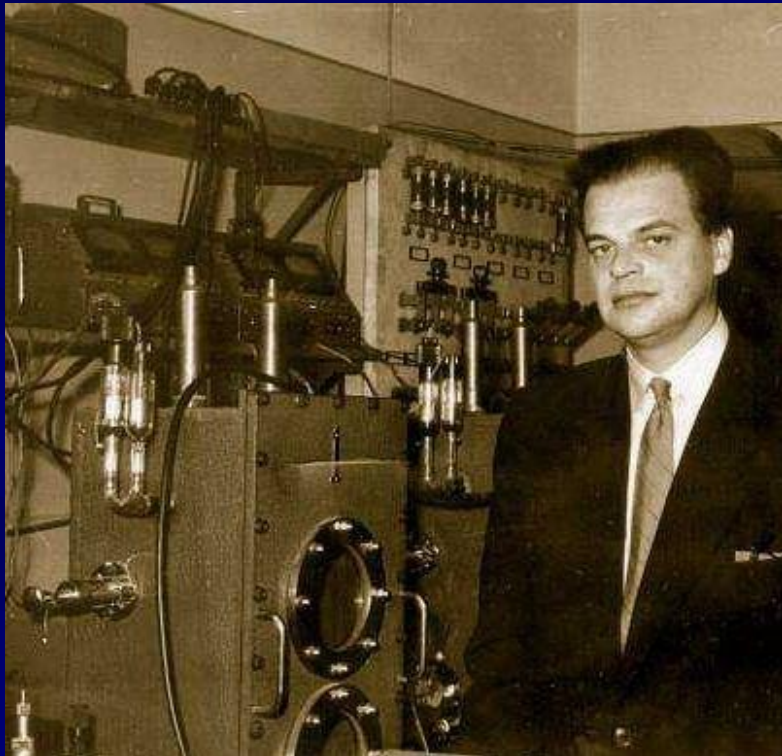


*Басов  
Николай  
Геннадьевич*



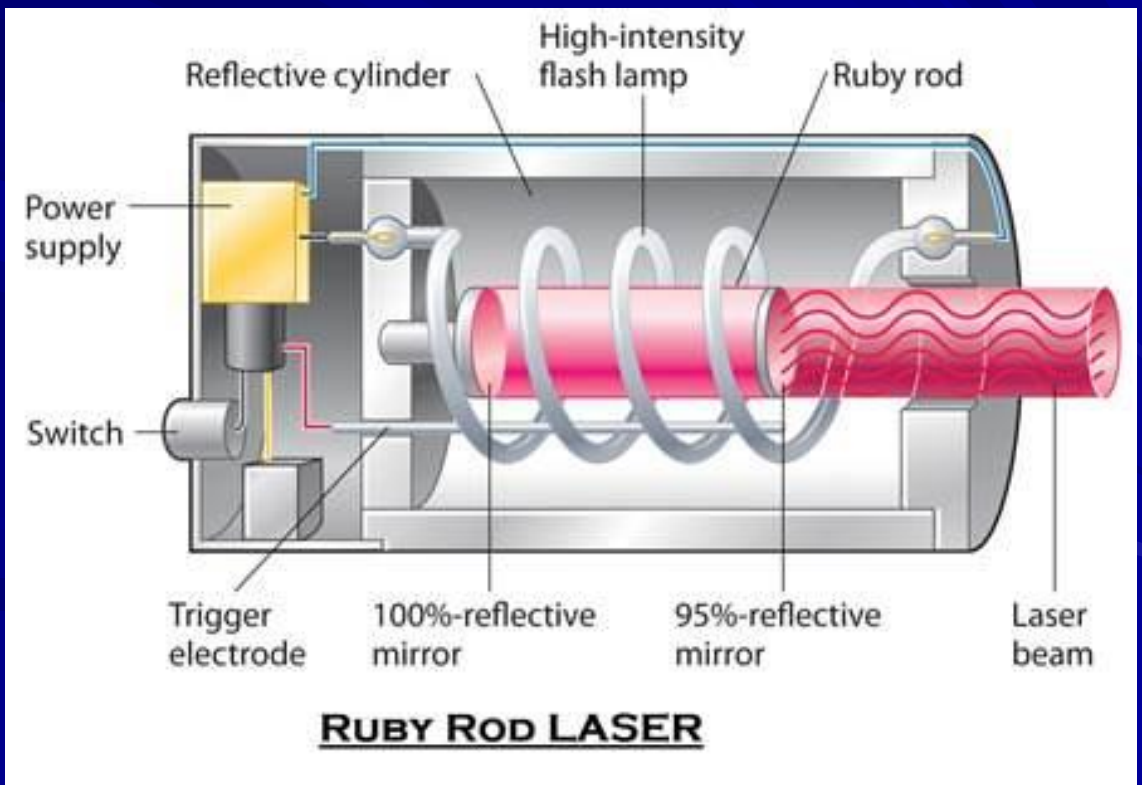
*Townes  
Charles  
Hard*

*Внешний вид мазера Прохорова-Басова*  
*(вторая половина 50-х годов 20-го века)*



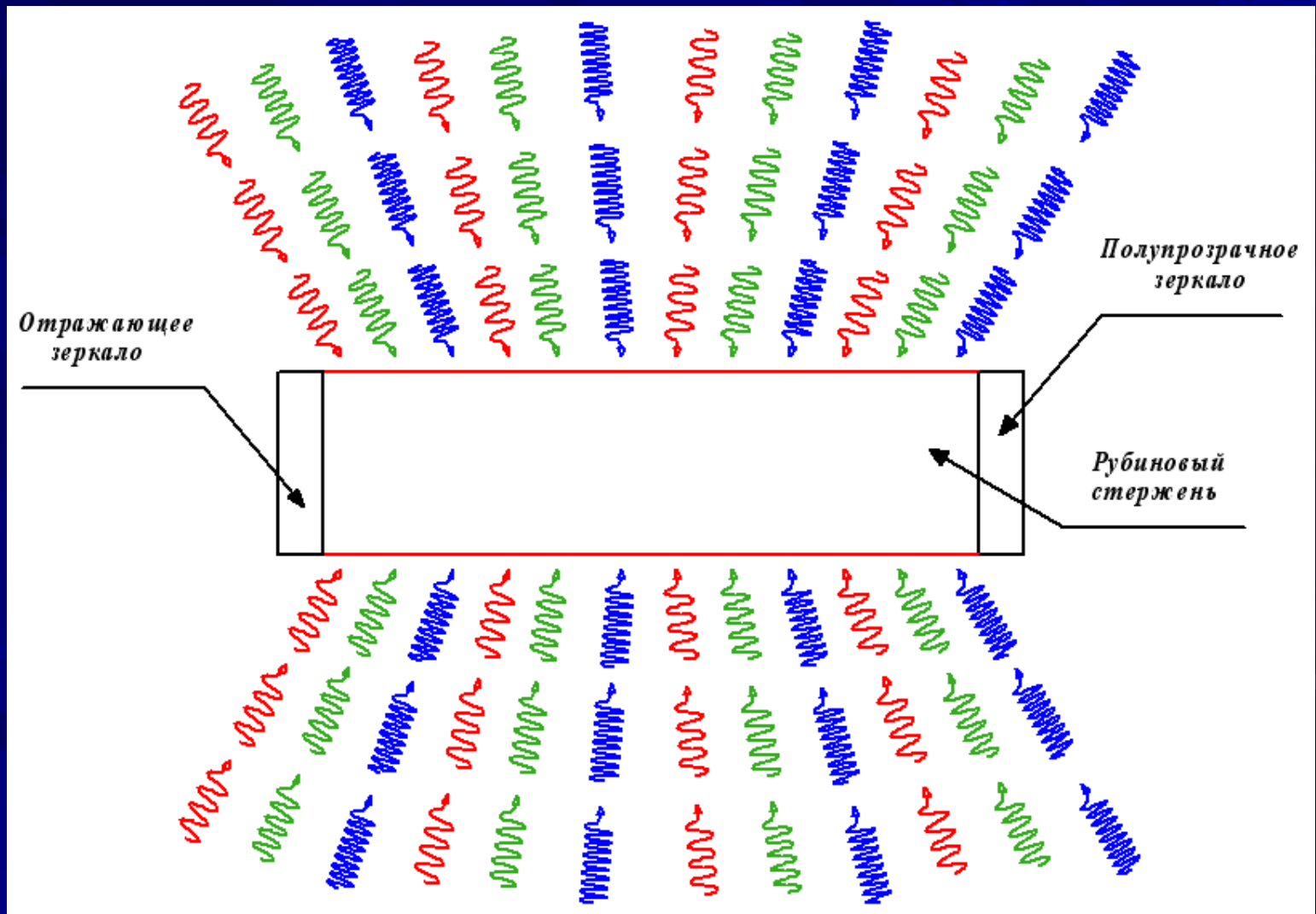
*MASER - это*  
*microwave amplification by stimulated emission of radiation*  
*усиление микроволн с помощью индуцированного*  
*(стимулированного) излучения*

*Теодор Гарольд Мейман*  
*и его твердотельный рубиновый лазер*  
*(1960 г)*

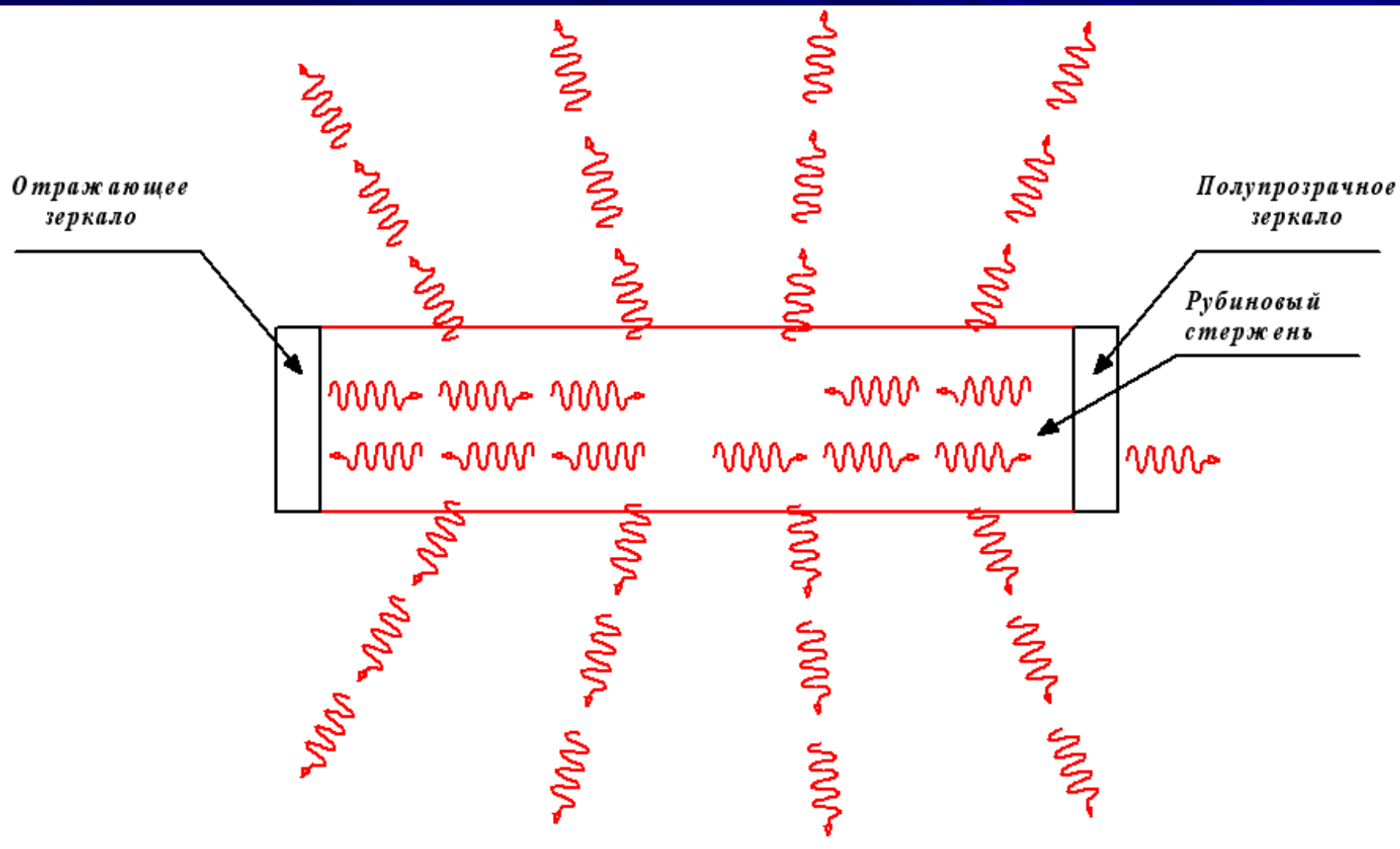




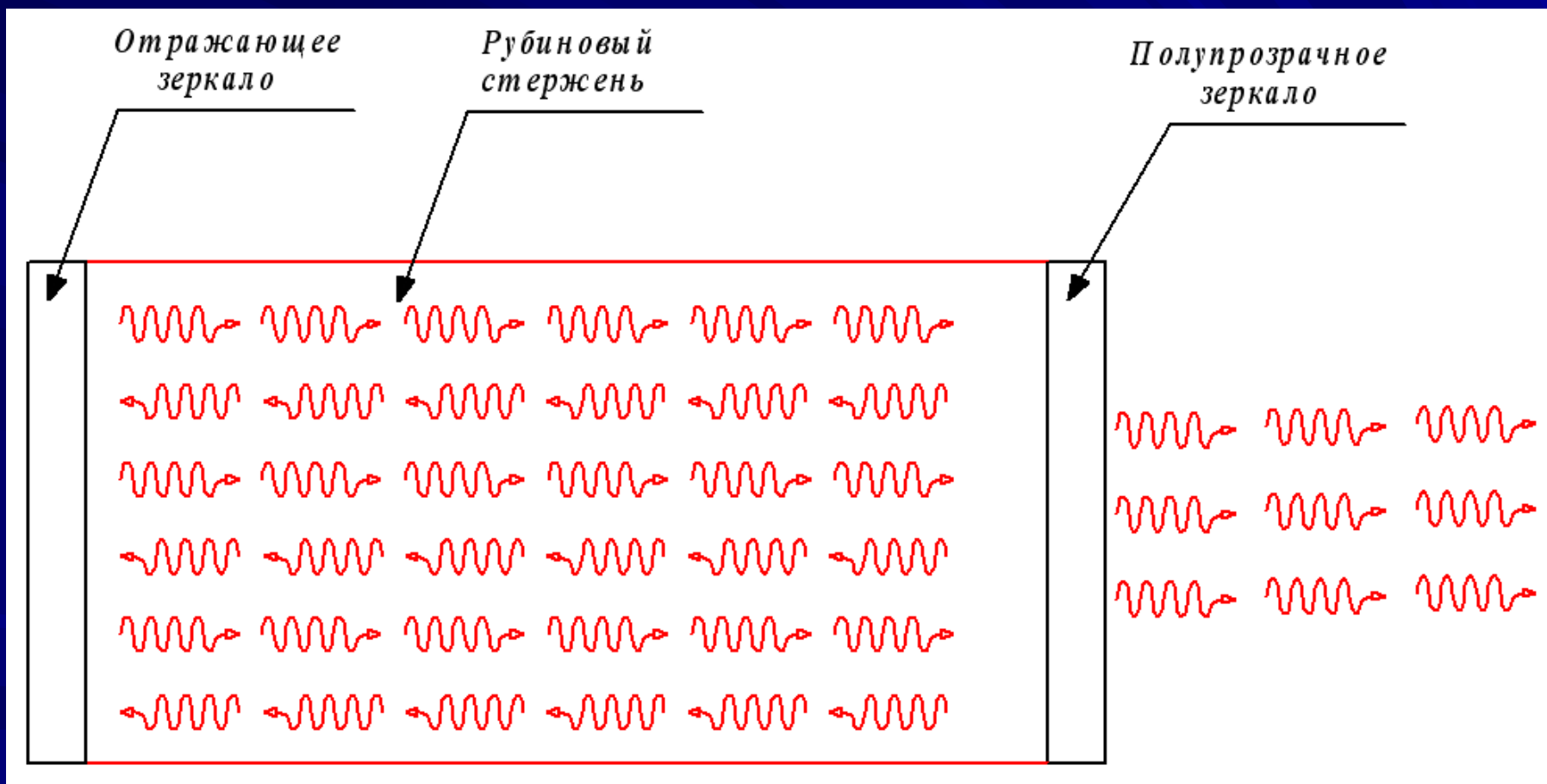
# Облучение полихромными фотонами рубинового стержня



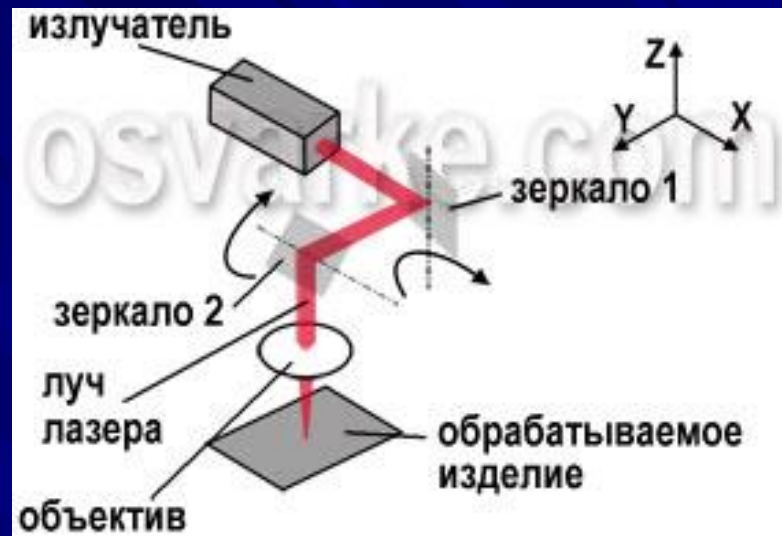
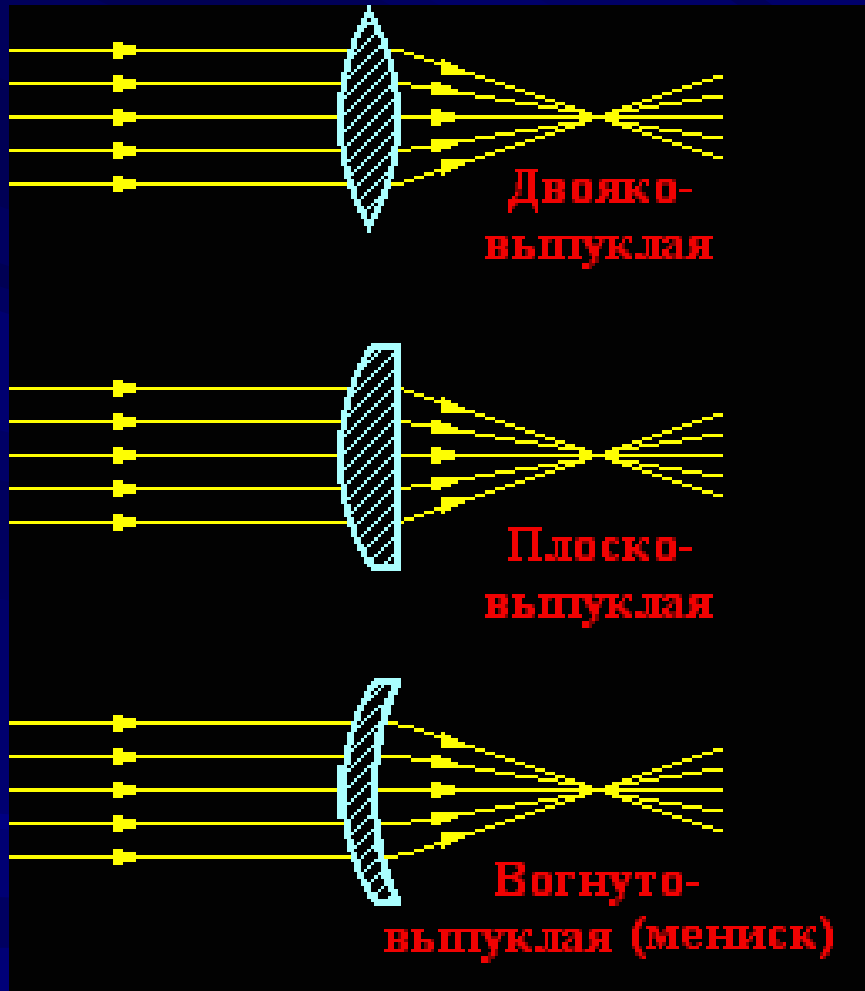
# Переизлучение фотонов рубиновым стержнем на начальном этапе накачки



# Излучение лазера в режиме насыщения



# Особенности лазерного излучения



## Этапы создания полупроводниковых лазеров

*Начало 60-х - создание первых экспериментальных образцов полупроводниковых лазеров на GaAs (США, криогенные температуры)*

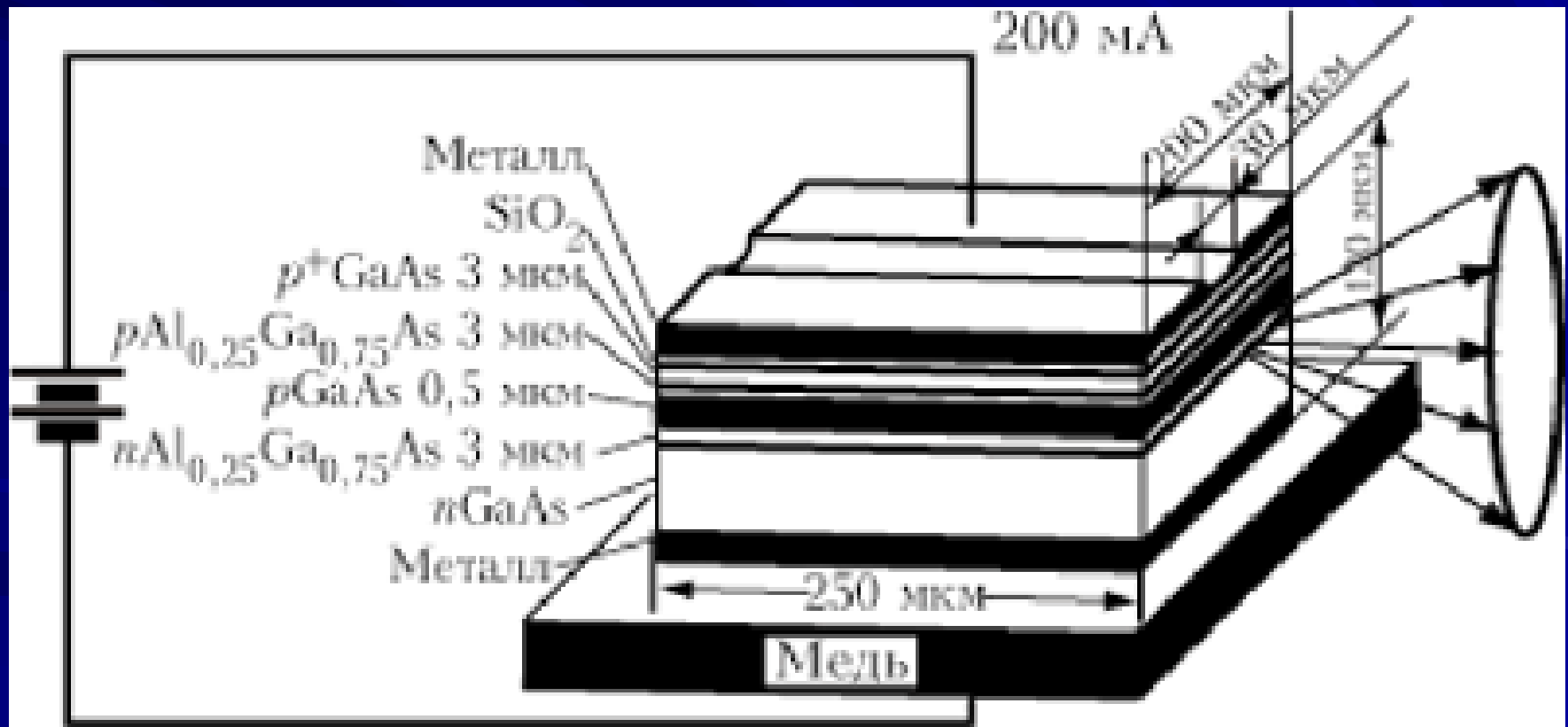
*1963 год - Жорес Алферов в своей кандидатской диссертации предложил создать полупроводниковый лазер на гетероструктуре*

*1967 год - Группа Алфёрова создаёт “классическую” двойную гетероструктуру  $GaP_{0,15}As_{0,85}-GaAs$*

Схема первого гетеролазера Ж.И. Алфёрова, способного  
излучать при комнатной температуре

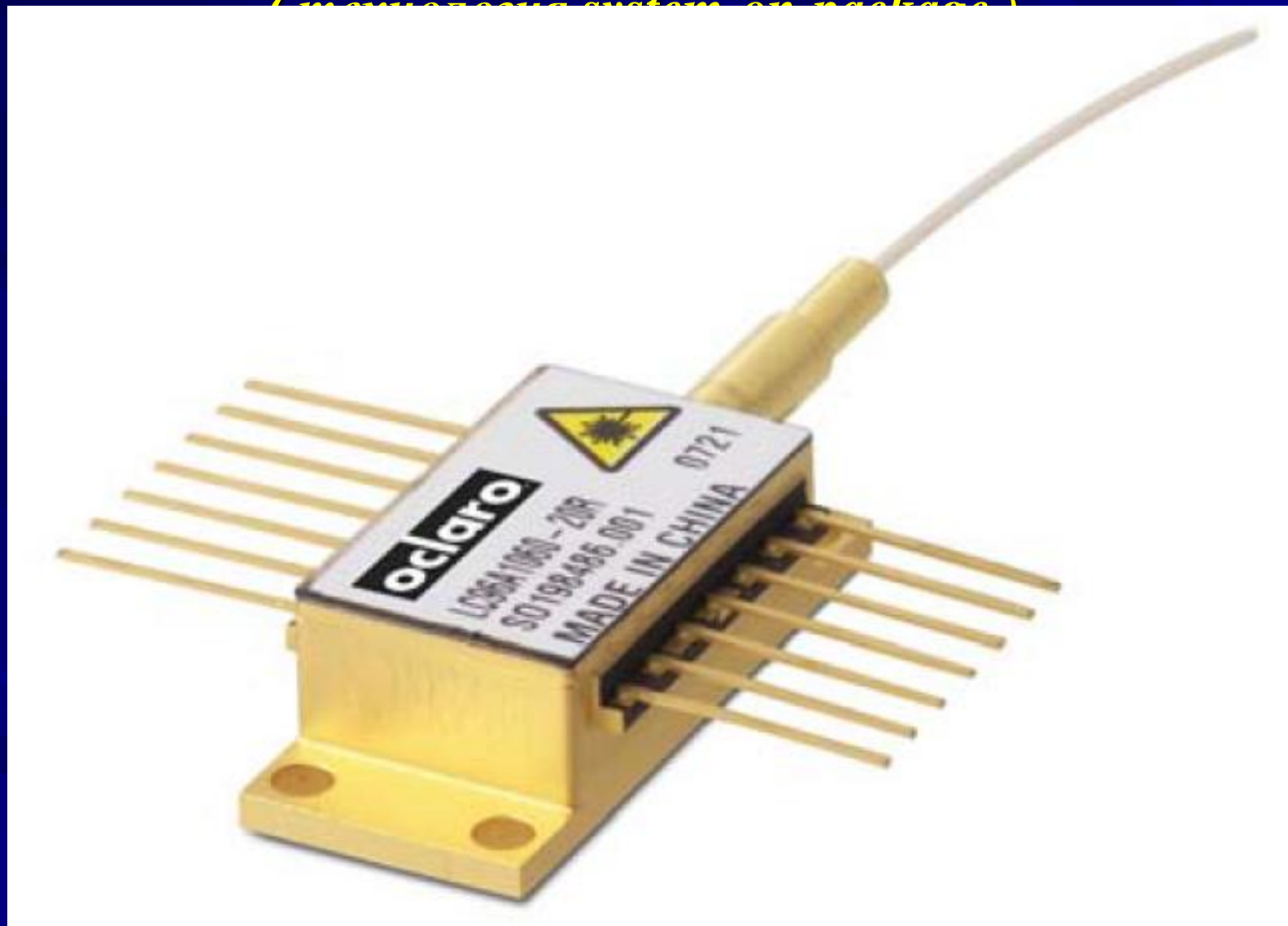
*1968 год - импульсный режим*

*1970 год - непрерывный режим*



Гибридная интегральная схема  
полупроводникового лазера

(monolithic system on package)



*Преломление электро-магнитной волны*  
*на границе раздела двух сред*

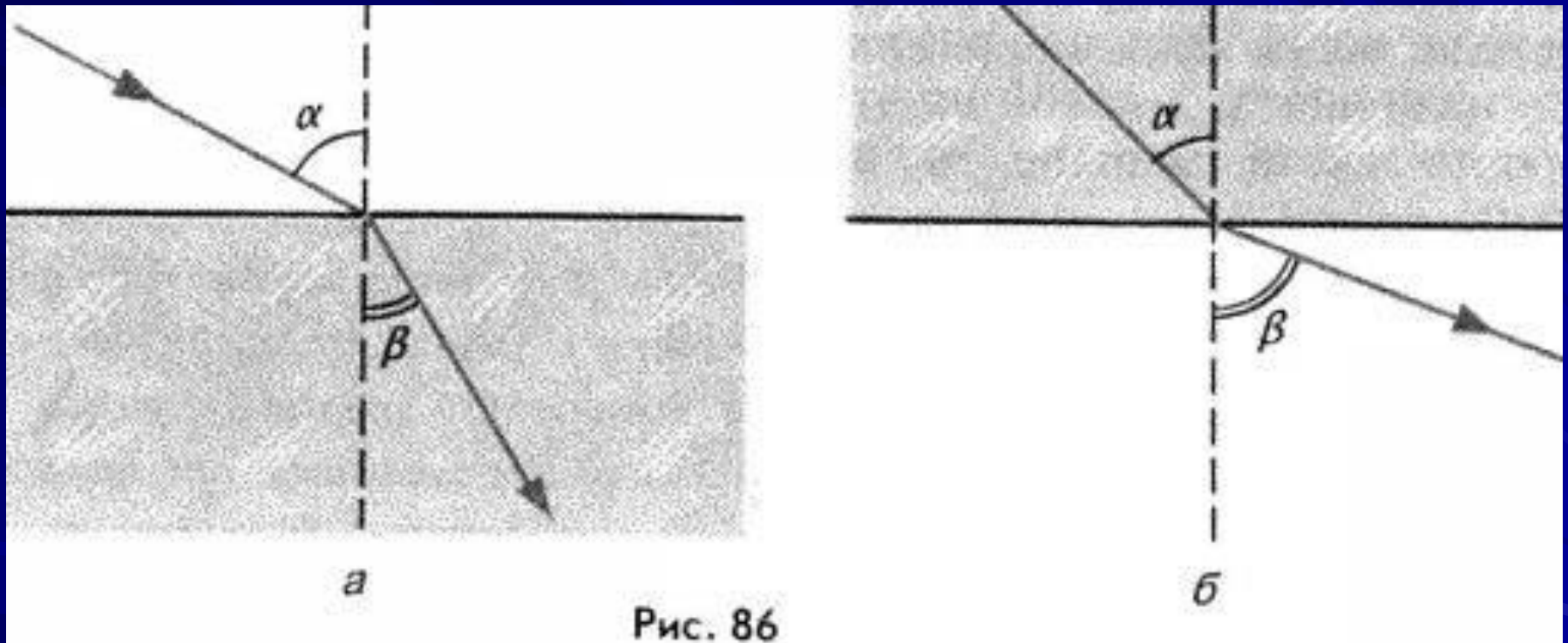
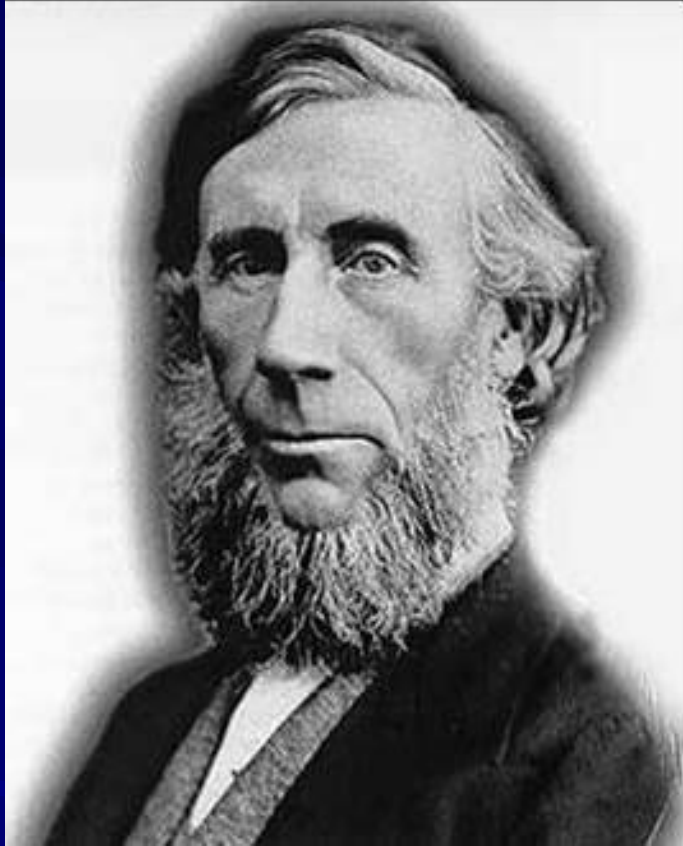


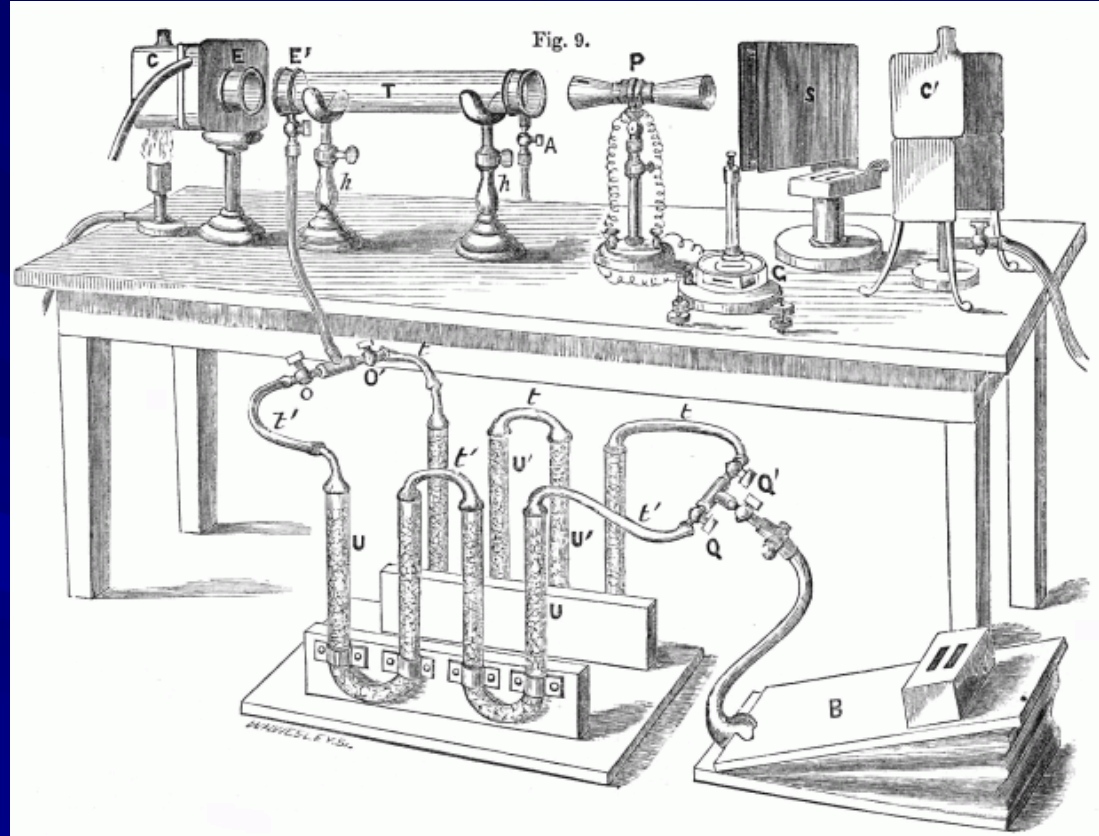
Рис. 86



# Опыты по канализации оптического излучения (1870 г)

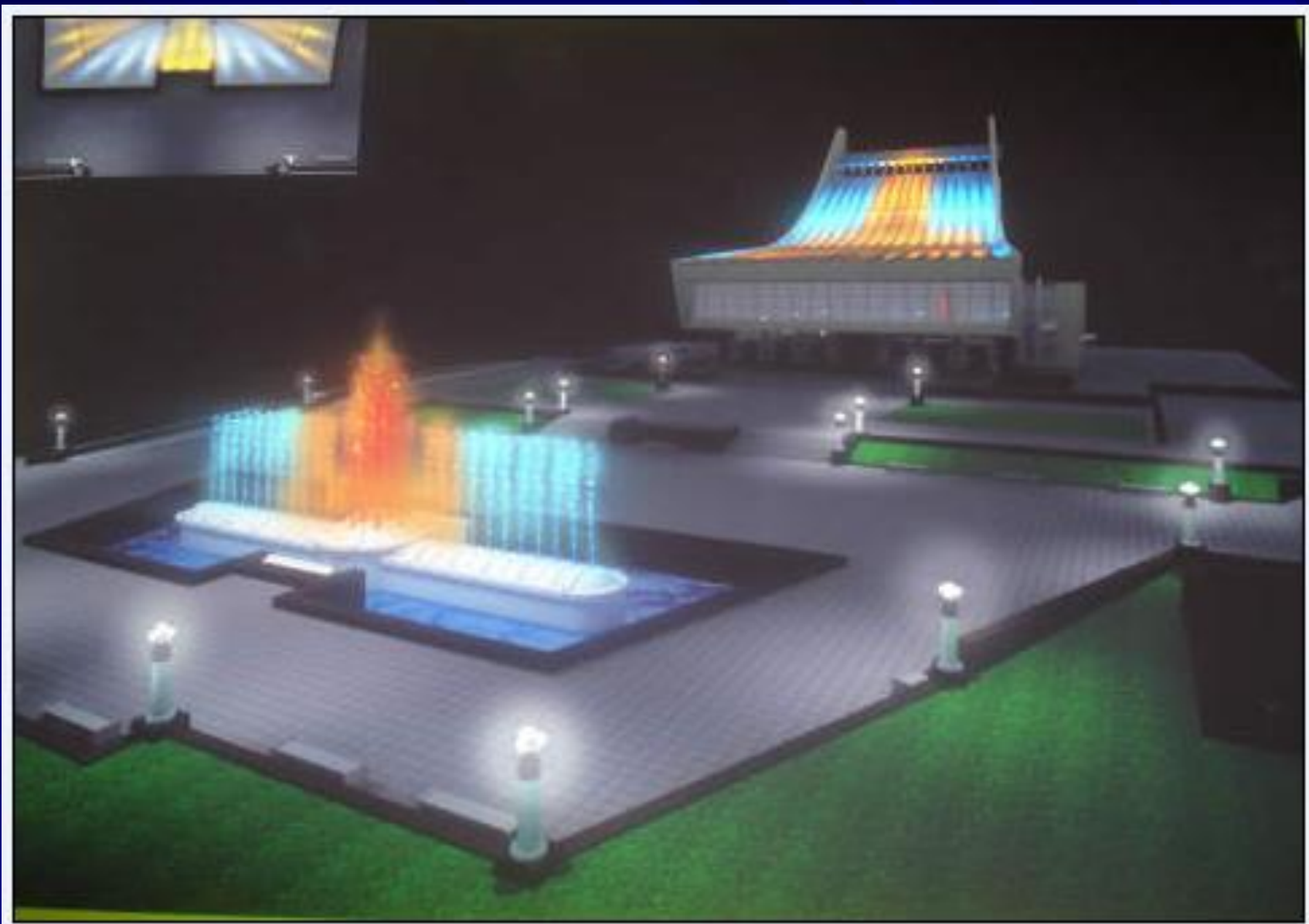


*John Tyndall*

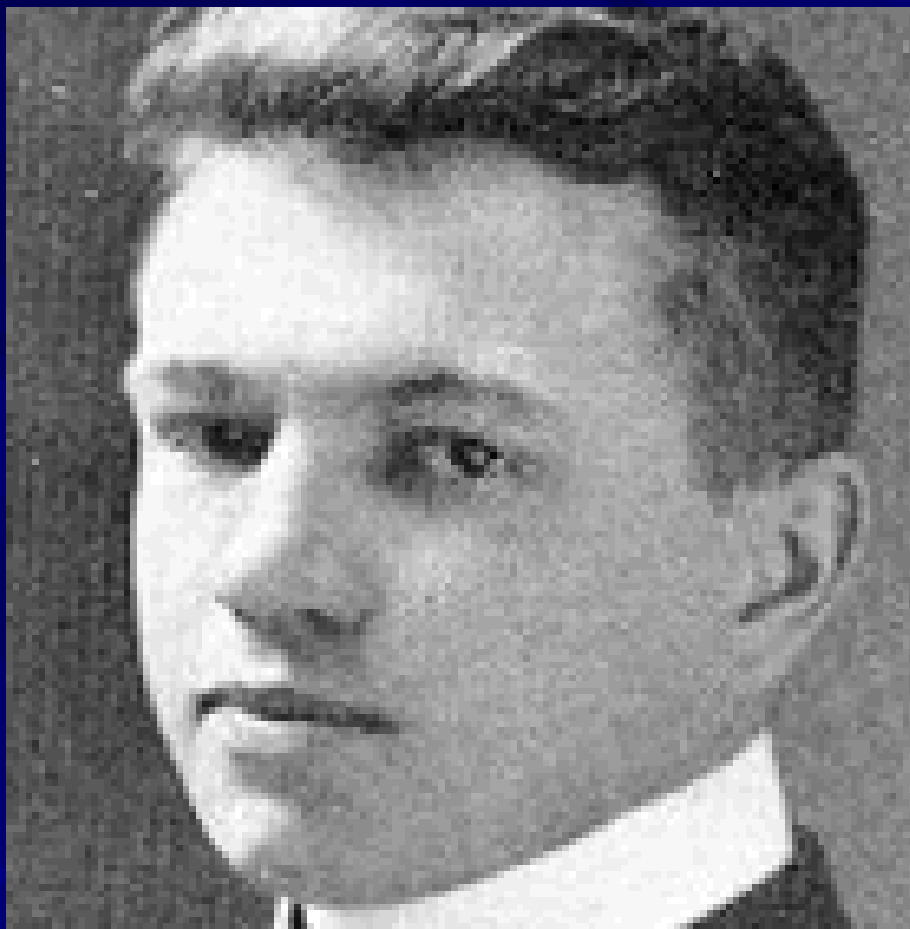


*Устройство экспериментальной  
установки*

## Цветомузыкальный фонтан (г. Омск)



## Экспериментаторы 20-х годов



*Hansell*

*Clarence Weston*



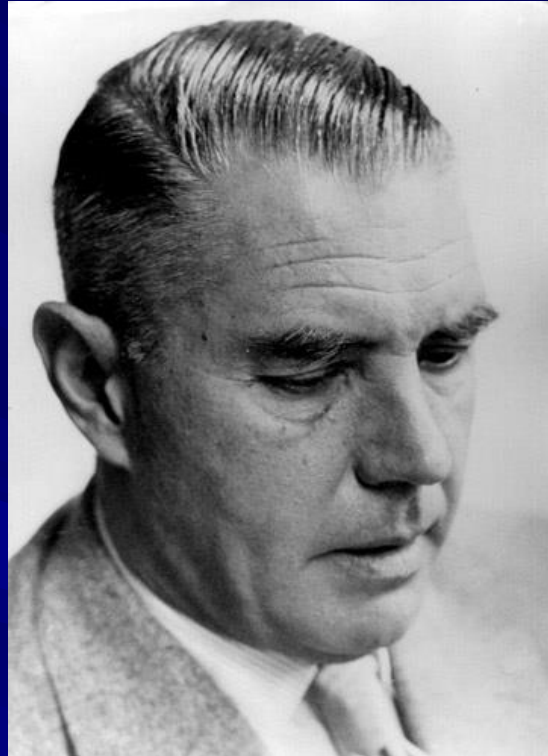
*Baird*

*John Logie*

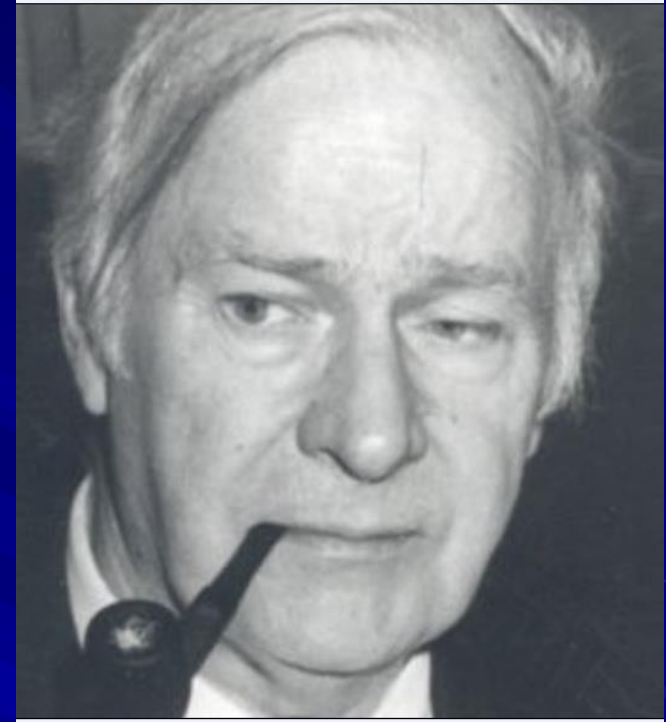
*Создатели первых образцов оптоволокна*



*Brian O'Brien*



*Abraham Van Heel*



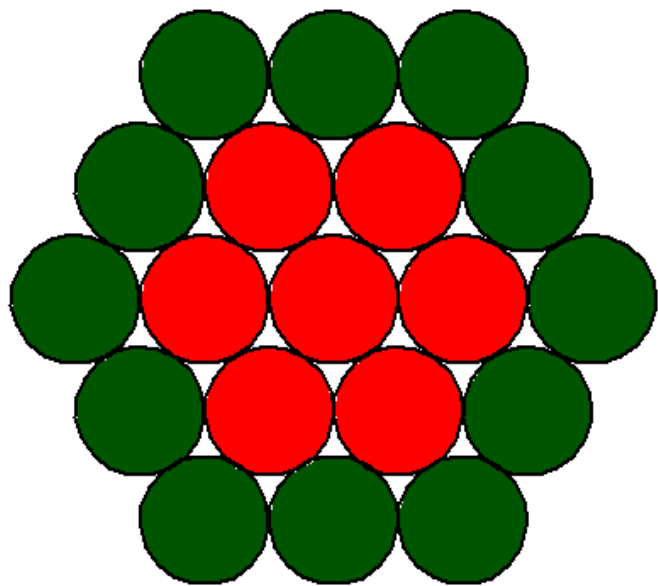
*Hopkins  
Harold Horace*

# Основатель волоконной оптики



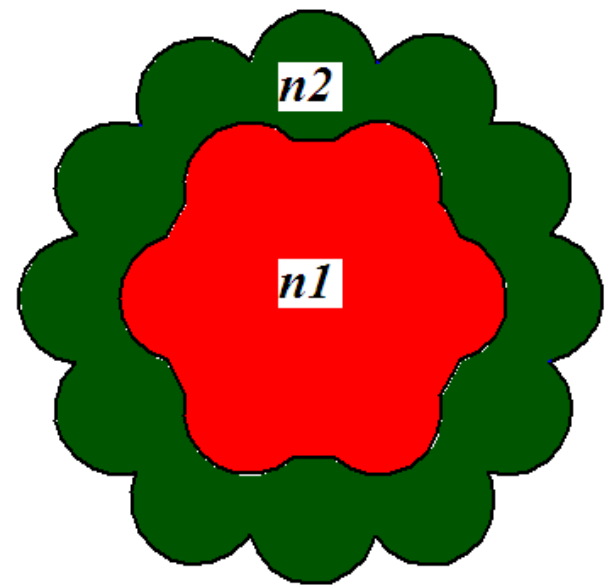
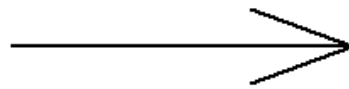
*Narinder Singh Kapany*

# Оптическое волокно Копани



*Механическая  
скрутка*

$$n1 > n2$$



*После спекания*

## Разы и децибеллы

$$L_{\text{дБ}} = 10 \times \lg (L_{\text{раз}}),$$

где  $L_{\text{дБ}}$  - потери в децибеллах,

$L_{\text{раз}}$  - потери в разгах

---

**1000 дБ - это  $10^{100}$  раз !!!**

**Чарльз Као**

**[www.chinashao.com/shanghai/index.shtml?36](http://www.chinashao.com/shanghai/index.shtml?36)**



***Т. Дэвис, М. Джоунс и С. Райт***



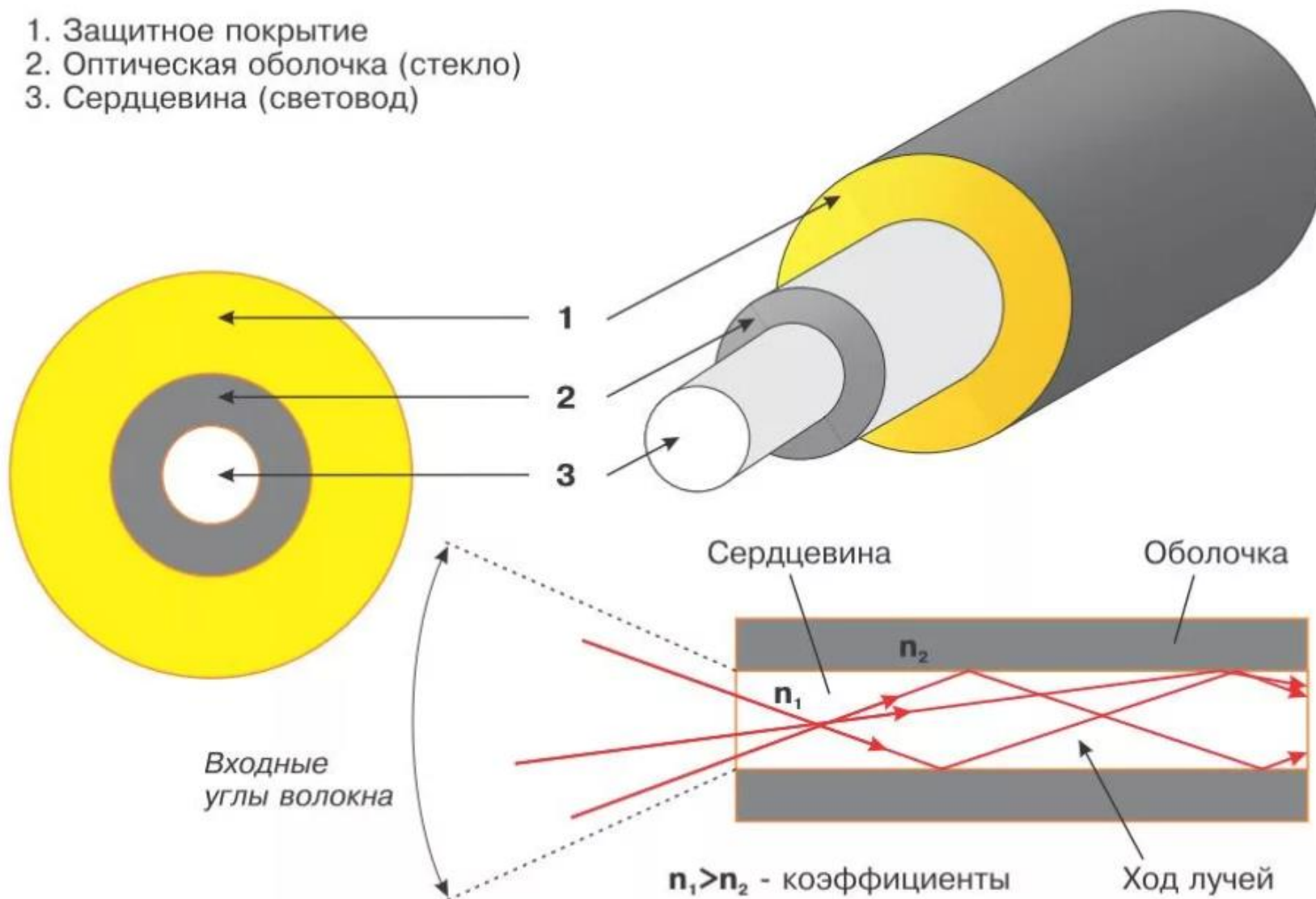
Первые образцы оптических волокон с низкими - *до 17 дБ / Км* - потерями были созданы к осени 1970 г. группой сотрудников фирмы *Corning Glass Works* (с 1989 г. эта фирма называется *Corning Incorporated*), в состав которой входили *Роберт Д. Маурер*, *Дональд Кек* ( *Кеск* ), *Peter C. Шульц*, и *Фрэнк Займер* (*Zimar*).

Для создания этих волокон использовалось *силикатное стекло, легированное титаном.*

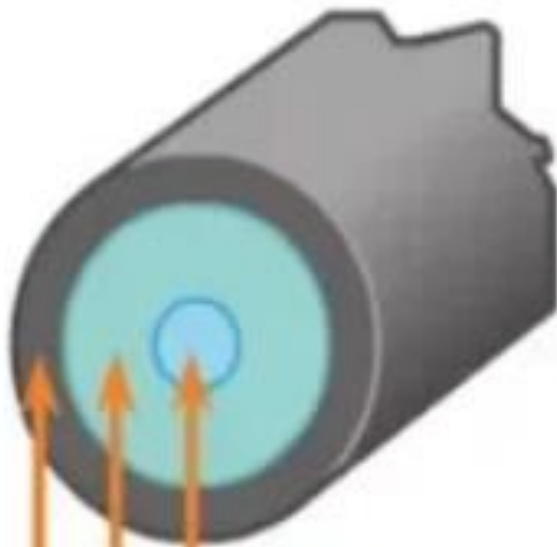
Через несколько лет они же создали волокно с потерями *до 4 дБ/Км*, используя в качестве основной присадки *оксид германия.*

# Конструкция одномодового оптического волокна

1. Защитное покрытие
2. Оптическая оболочка (стекло)
3. Сердцевина (световод)



# Поперечное сечение одномодового оптического волокна

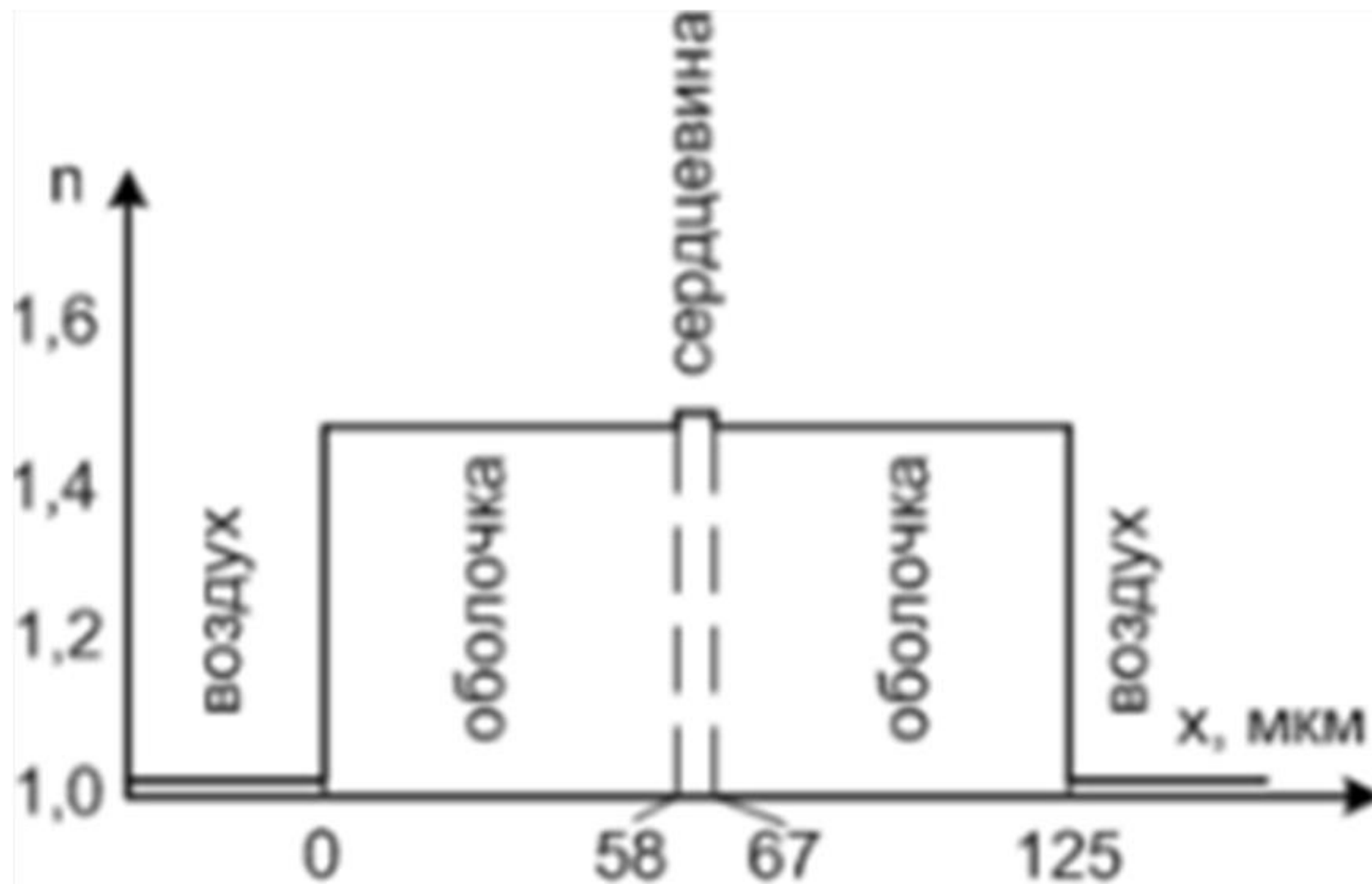


Стеклянный сердечник = 9 микрон

Стеклянная оболочка, 125 микрон в диаметре

Полимерное покрытие

# Профиль коэффициентов преломления

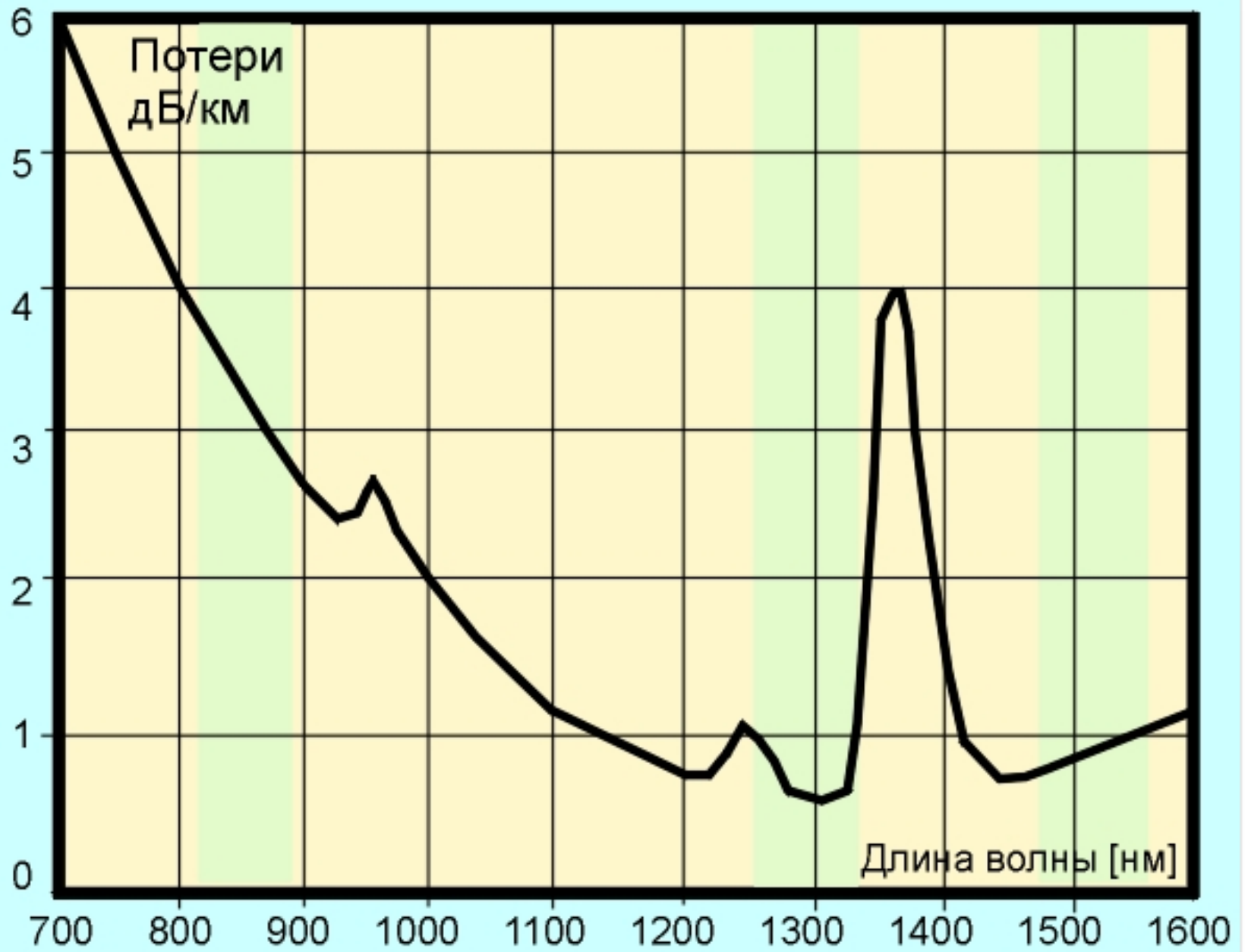


# Corning® SMF-28™ Optical Fiber

## Product Information

### *Attenuation*

Wavelength (nm)	Attenuation* (dB/km)	
	Premium	Standard
1310	≤0.34	≤0.35
1550	≤0.20	≤0.22



*Динамика роста  
скорости передачи информации по ВОЛС*

*1995 г* - стандарт IEEE 802.3u *Fast Ethernet*  
со скоростью 100 Мбит/с

*1997 г* - стандарт IEEE 802.3z *Gigabit Ethernet*  
со скоростью 1000 Мбит/с

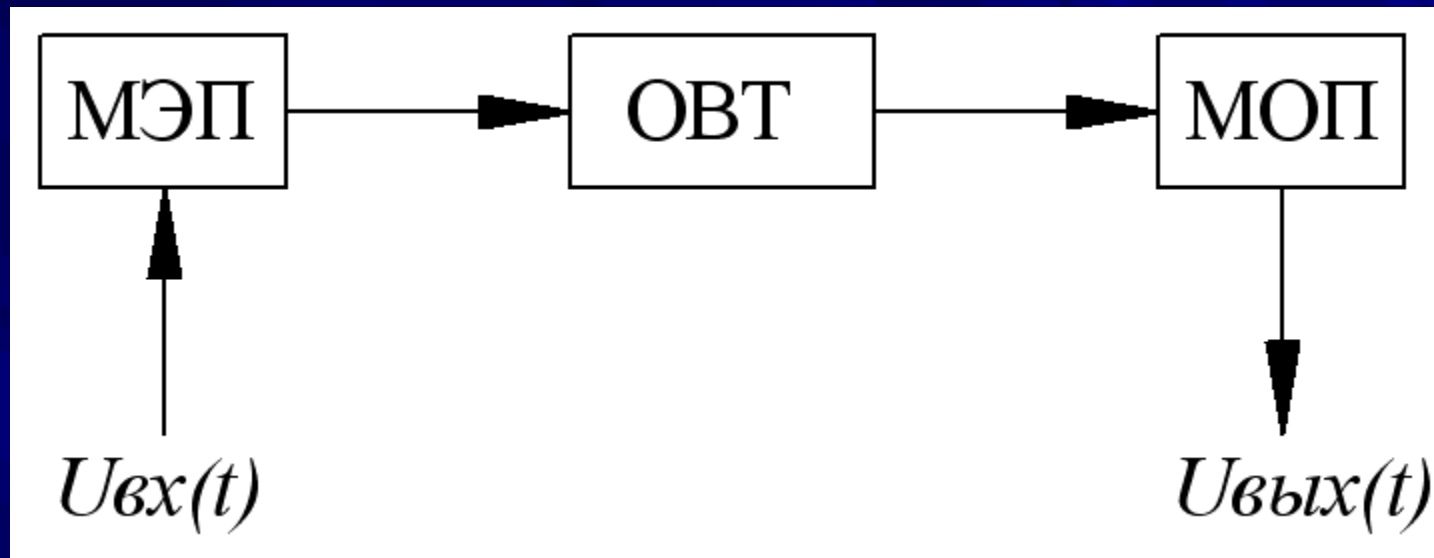
*Настоящее время:*

- созданы коммерческие суперканалы со скоростью передачи до 10 Тб/с,
- эксперименты ведутся на скоростях до 100 Тб/с,

*Будущее ( ~ 2030 г ):*

- 1 000 000 Тб/с

## Укрупнённая схема аналогового РФТ СВЧ



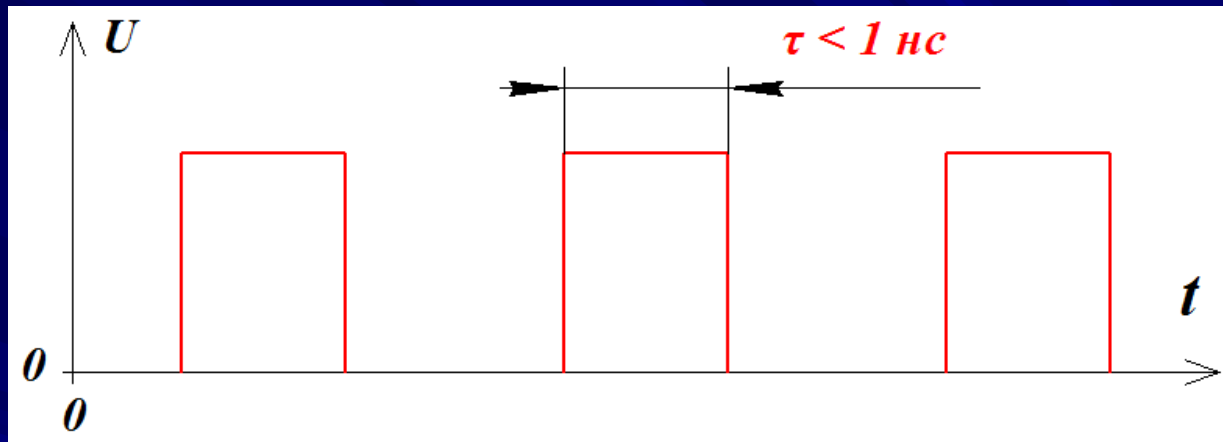
*МЭП - модуль электро-оптического преобразования*

*ОВТ - оптоволоконный тракт*

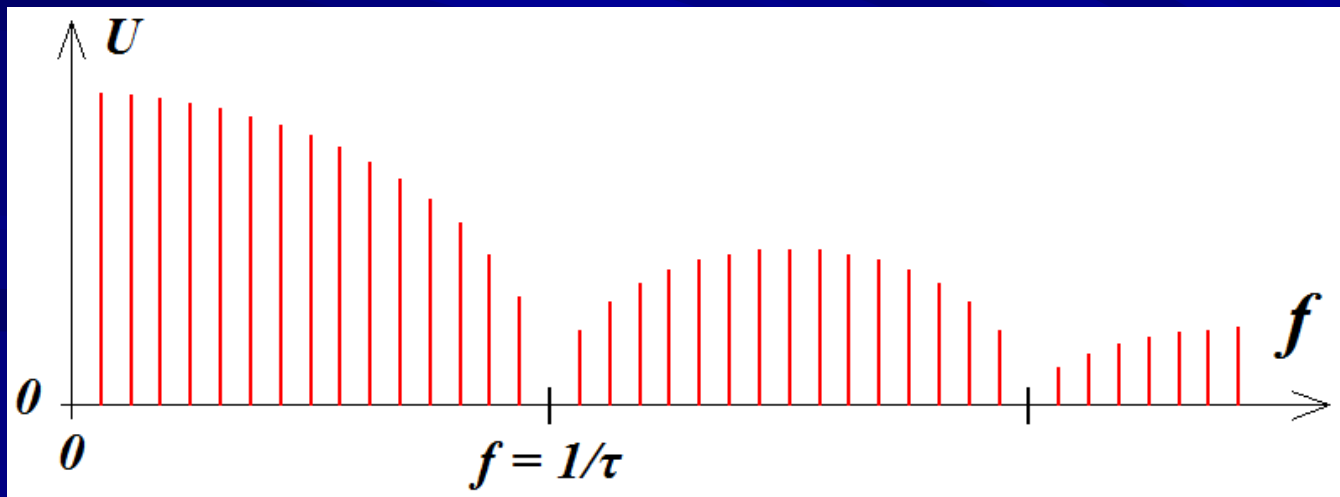
*МОП - модуль опто-электронного преобразования*



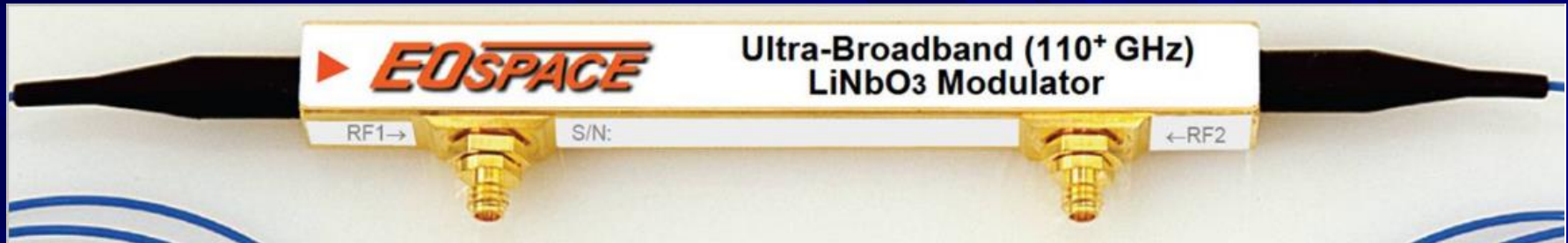
# Модулирующий сигнал во временной области



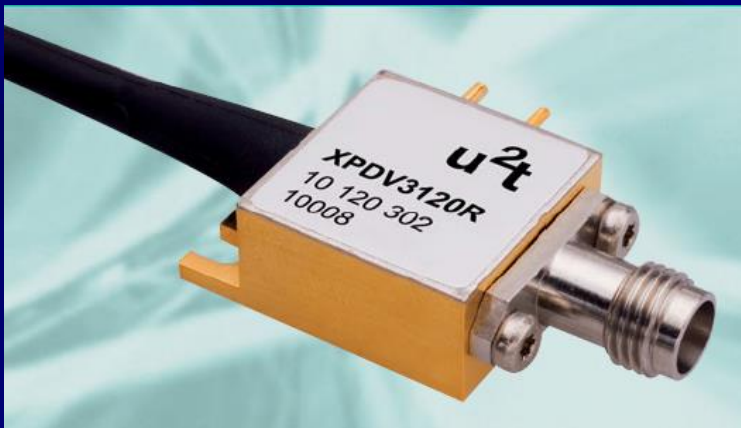
# Модулирующий сигнал в частотной области



# Радиофотонная компонентная база



## ГИС сверхширокополосного ЭОМ

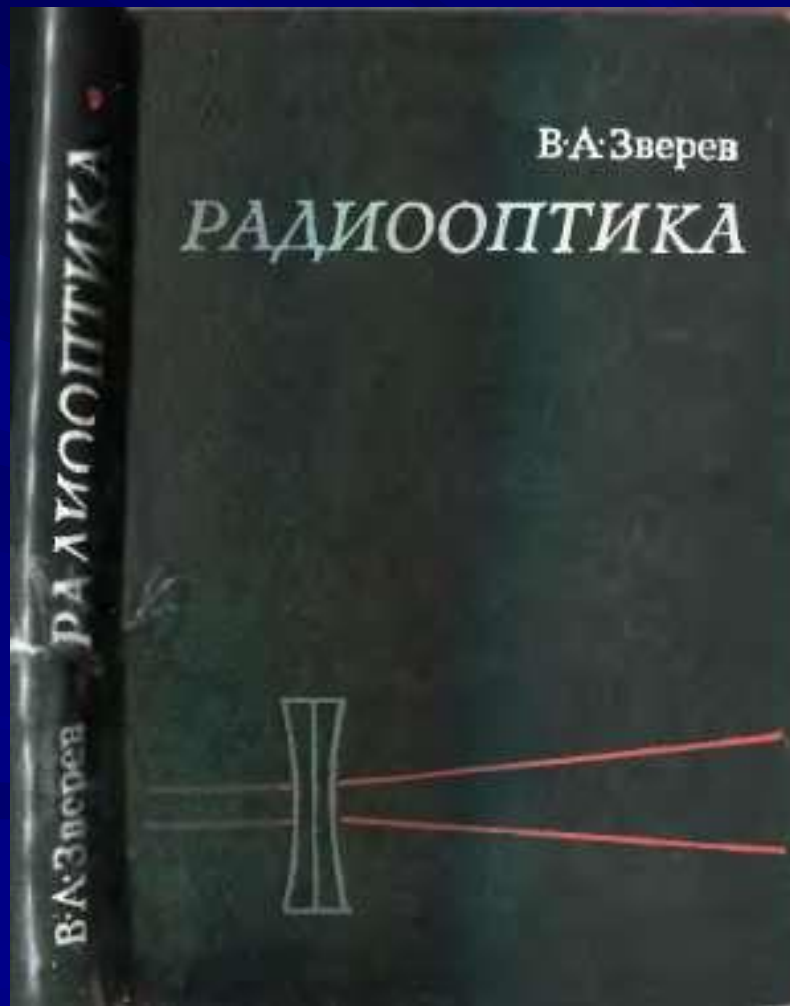


## ГИС сверхширокополосного ФД

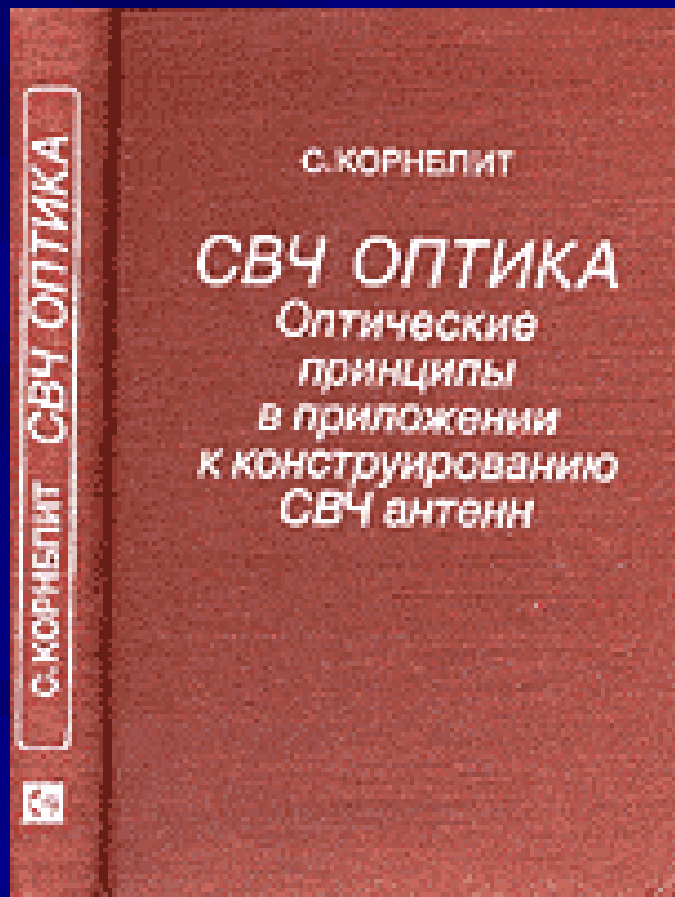


## ГИС ЛДПМ

*Зверев В.А. Радиооптика. Преобразование сигналов в радио и оптике.- М.: Сов. Радио, 1975 г.*



**Корнблит С. СВЧ оптика. Оптические  
принципы в приложении к конструированию  
СВЧ антенн: Пер. с англ./Под. ред. О. П.  
Фролова.- М.: Связь, 1980.-360 с., ил.**



*РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2009, том 54, № 8, с. 901–914*

---

---

**ОБЗОР**

---

---

*УДК 621.373*

**НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ФОТОНИКИ – СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНАЯ  
ОПТОЭЛЕКТРОНИКА**

**© 2009 г. М. Е. Белкин, А. С. Сигов**

Поступила в редакцию 11.07.2008 г.

**Санкт-Петербургский Национальный  
Исследовательский университет  
информационных технологий, механики и  
оптики Кафедра оптики  
квантоворазмерных систем**

**ЛАБОРАТОРИЯ РАДИОФОТОНИКИ**

**[www.faculty.ifmo.ru/oks/radiofotonika](http://www.faculty.ifmo.ru/oks/radiofotonika)**



## ПРОТОКОЛ

заседания президиума Совета при Президенте  
Российской Федерации по модернизации экономики  
и инновационному развитию России

---

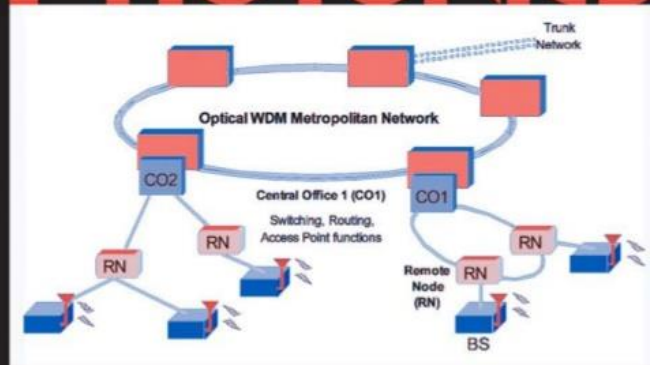
г. Екатеринбург

от 9 июля 2014 г. № 4

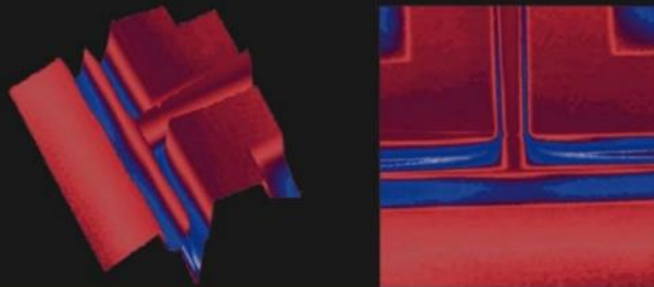
ПРЕДСЕДАТЕЛЬСТВОВАЛ  
ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Д.А.МЕДВЕДЕВ

2. Минпромторгу России (Д.В.Мантурову), Минобрнауки России (Д.В.Ливанову), Минэкономразвития России (А.В.Улюкаеву), Минкомсвязи России (Н.А.Никифорову) совместно с ФАНО России, Роскосмосом, Госкорпорацией "Росатом", РФФИ, РФФИ, ФПИ и институтами развития представить в установленном порядке в Правительство Российской Федерации предложения по внесению изменений в "дорожную карту" по развитию оптоэлектронных технологий (фотоники) в части ее дополнения мероприятиями по развитию перспективных направлений, в том числе радиофотоники, разработке квантовых оптических материалов и новых

# MICROWAVE PHOTONICS



Edited by  
**Chi H. Lee**



 **CRC Press**  
Taylor & Francis Group



# Microwave Photonic Links

*Components and Circuits*

**Christian Rumelhard**  
**Catherine Algani**  
**Anne-Laure Billabert**

 **ISTE**

 **WILEY**





2011 IEEE International Topical Meeting on

# **Microwave Photonics**

Jointly held with 2011 Asia Pacific Microwave Photonics

**OCT. 18-21 2011 SINGAPORE**



2013 IEEE International Topical Meeting on

## Microwave Photonics (MWP)

October 28 - 31, 2013  
Alexandria, Virginia, USA

[Home](#)

[Participation](#)

[Program](#)

[General Information / Accommodations](#)

[Organizers](#)

[Exhibits](#)

**Microwave Photonics (MWP)** is an inter-disciplinary field of study that concerns the interactions between microwave and optical waves for the generation, processing, control and distribution of microwave, millimeter-wave and THz-frequency signals. Microwave photonics serves as an enabling technology in a wide variety of applications such as signal generation and distribution, high-speed wireless communication networks, radar systems, sensors, and modern instrumentation. The 2013 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2013) will provide a forum for the presentation of new advances in this multi-disciplinary research area, ranging from novel devices to system field trials.

*Sponsored by:*



**NORTHROP GRUMMAN**

[www.atomic-energy.ru/news/2018/09/13/88777](http://www.atomic-energy.ru/news/2018/09/13/88777)

Новости

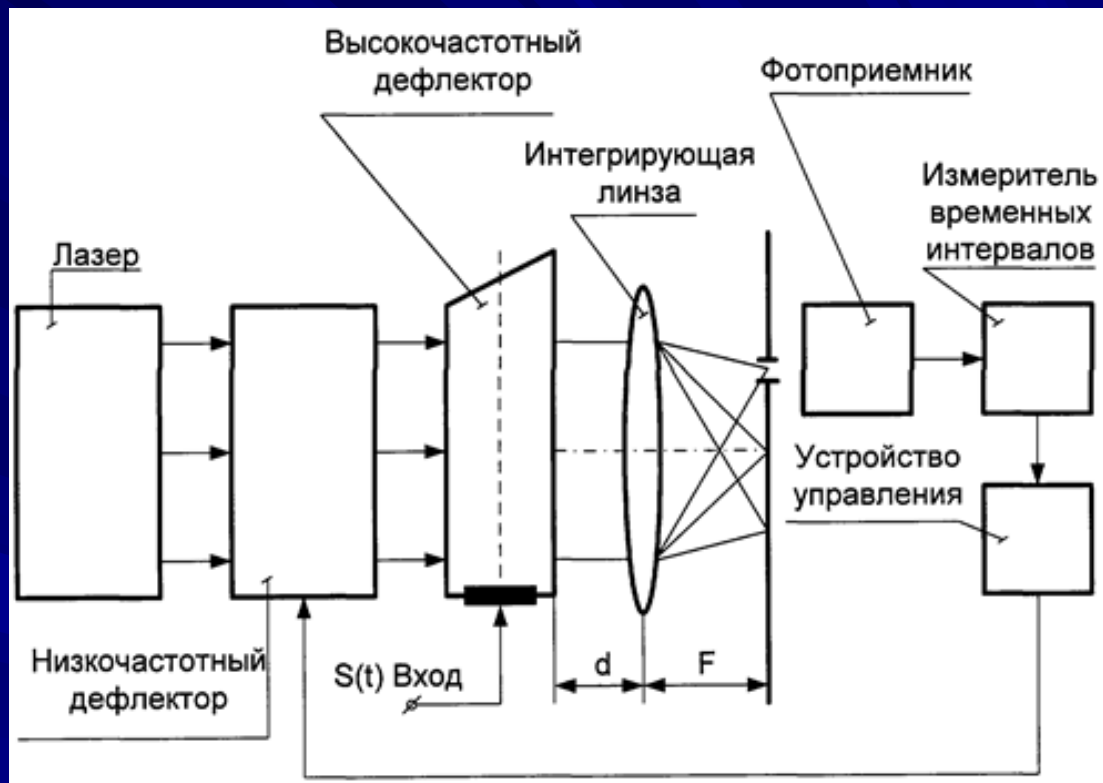
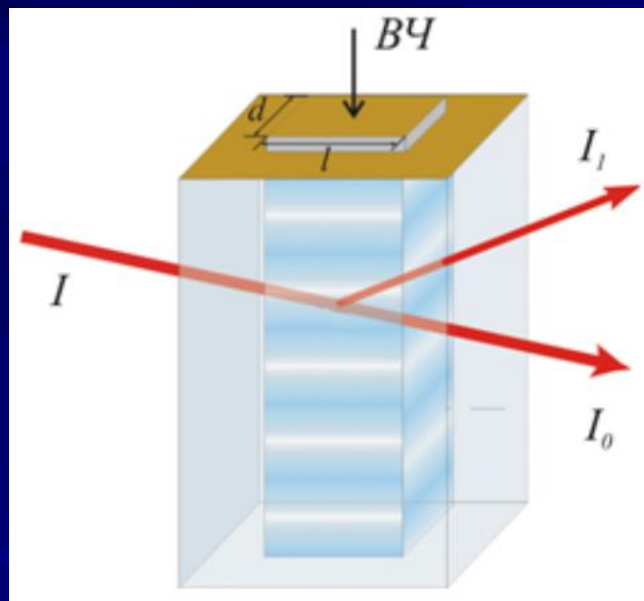
13 сентября 2018 139



## На базе НИЯУ МИФИ создан Консорциум по развитию радиотонных технологий на территории Российской Федерации



# Акусто-оптический Фурье-преобразователь



***Спасибо  
за внимание!***

***Конструктивная критика  
принимается по адресу  
[ur-vol@yandex.ru](mailto:ur-vol@yandex.ru)***