



ЛАЗЕРЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

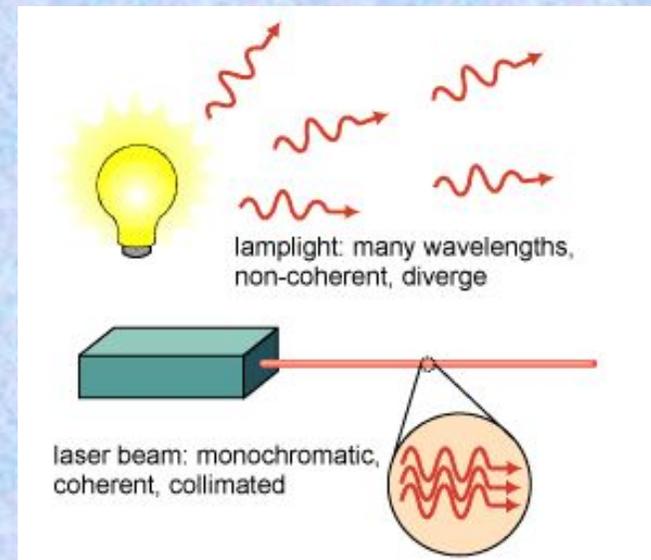
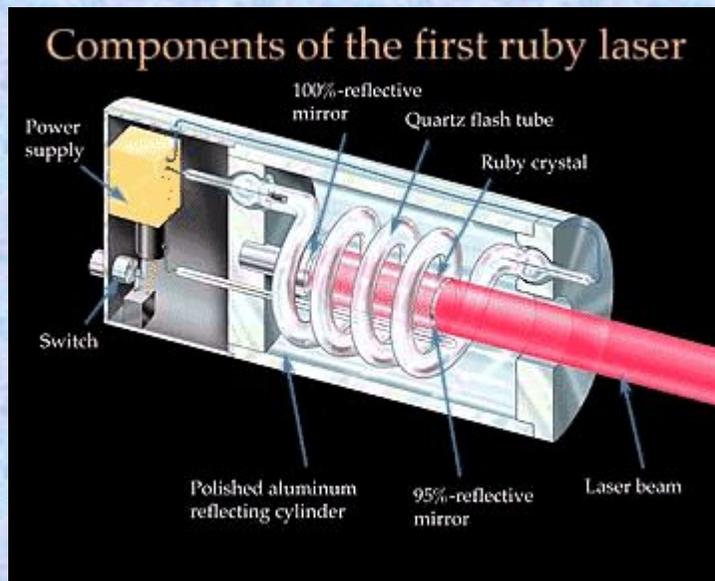
Механизмы и способы генерации и усиления ультракоротких (пс и фс) лазерных импульсов; методы измерения их основных параметров; практические применения.

Гарнов Сергей Владимирович

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН ИОФРАН

Лекция №1. 12 февраля 2015 г.

Введение. Исторический экскурс - основоположники лазерной эры. Основные понятия физики лазеров. Принцип генерации лазерного излучения. Ультракороткие лазерные импульсы.



Цель лекций:

Дать представление аудитории о принципах работы лазеров ультракоротких импульсов (УКИ) пикосекундного ($\sim 10^{-11}$ - 10^{-12} с) и фемтосекундного ($\sim 10^{-13}$ - 10^{-14} с)

диапазонов,

методах измерения их основных параметров - длительности, интенсивности, спектрального состава, контраста,

а также о современных областях применения таких лазеров в физике, технике, биологии и медицине.



Предмет лекций:

В рамках курса будут рассмотрены механизмы и способы генерации и усиления ультракоротких лазерных импульсов пикосекундного и фемтосекундного диапазона, а также методы измерения и инструментарий используемые для характеристики их основных параметров.

Будут рассмотрены схемы наиболее широко используемых лазеров УКИ и примеры их применения в физике, технике, биологии и медицине.

Лекционный курс будет включать демонстрацию действующих лазерных систем УКИ в лабораториях ИОФРАН.

Вопросы по ходу лекции приветствуются.

Посещение лекций: выбор слушателя 😊.

Проверка полученных знаний: выбор преподавателя 😊.



Учебные пособия:

Основные:

1. Херман И., Вильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов // М.: МИР, 1986, 368 с.
2. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов // М.: Наука, 1988, 312 с.
3. **Крюков П.Г. Лазеры ультракоротких импульсов и их применения // М.: Интеллект, 2012, 248 с.**

Дополнительные:

1. Звелто О. Принципы лазеров // М.: МИР, 1990, 559 с.
2. **Беспалов В. Г., Козлов С. А., Крылов В. Н., Путилин С. Э. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии // Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010, 234 с.**
<http://window.edu.ru/resource/762/72762/files/itmo512.pdf>,
http://books.ifmo.ru/book/624/femtosekundnaya_optika_i_femtotehnologii.htm
3. Ким А.В, Рябикин М.Ю., Сергеев А.М. От фемтосекундных к аттосекундным импульсам. - Успехи физических наук, 1999, Т.169, №1, С.85-103.
4. Желтиков А.М. Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики. - М.: Физматлит, 2006, 296 с.

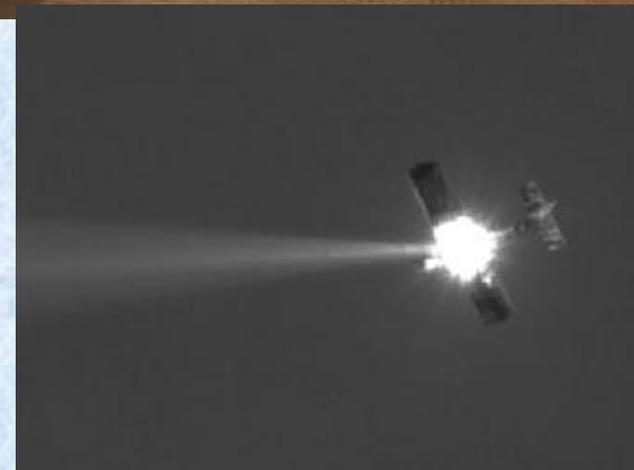
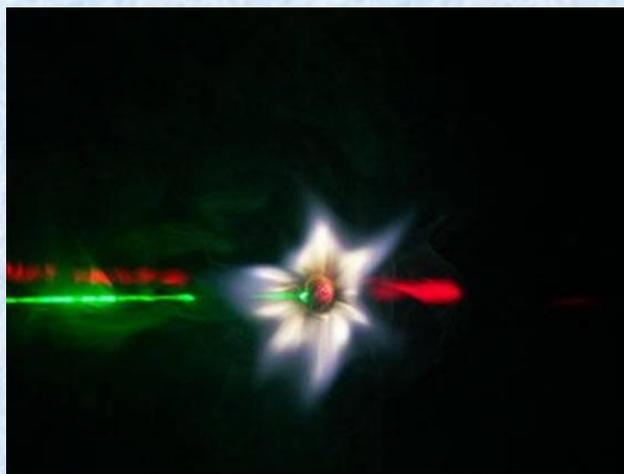
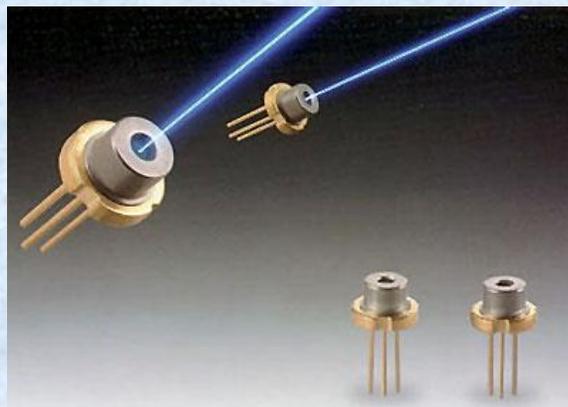
GOOGLE : «*laser*» —

Результатов: примерно 547 000 000 (0,31 сек.) (11.02.2015)

Результатов: примерно 622 000 000 (05.12.2012)

Результатов: примерно 354 000 000 (30.05.2011)

Результатов: примерно 145 000 000 (05.05.2010)



Лазерный термоядерный синтез

*The 3rd Conference on QE
11-15 February 1963*

The Conditions of Plasma Heating
by the Optical Generator Radiation

N. G. BASOV and O. N. KROKHIN
Lebedev Institute. Academy of Sciences of the USSR.

QUANTUM ELECTRONICS
proceedings of
the third international congress
ELECTRONIQUE QUANTIQUE
comptes-rendus de la
conférence internationale
PARIS



В 1962 году Н.Г. Басов и О.Н. Крохин высказывают смелую идею об осуществимости термоядерного синтеза при нагреве мишени излучением лазера, положив начало новому мощному научно-техническому направлению -- лазерному термоядерному синтезу (ЛТС).



National Ignition Facility



В России, в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г.Саров) начато создание установки мегаджоульного уровня УФЛ-2М на длине волны второй гармоники неодима с длительностью импульса 3 нс.

Основатели лазерной эры.



**Charles Hard
Townes ,
MIT, USA, 1/2
1915 г.р.**



**Николай
Геннадиевич
Басов , ФИАН,
СССР, 1/4
1922- 2001гг.**



**Александр
Михайлович
Прохоров , ФИАН,
СССР,1/4
1916-2002 гг.**

Нобелевская премия по физике 1964 г.

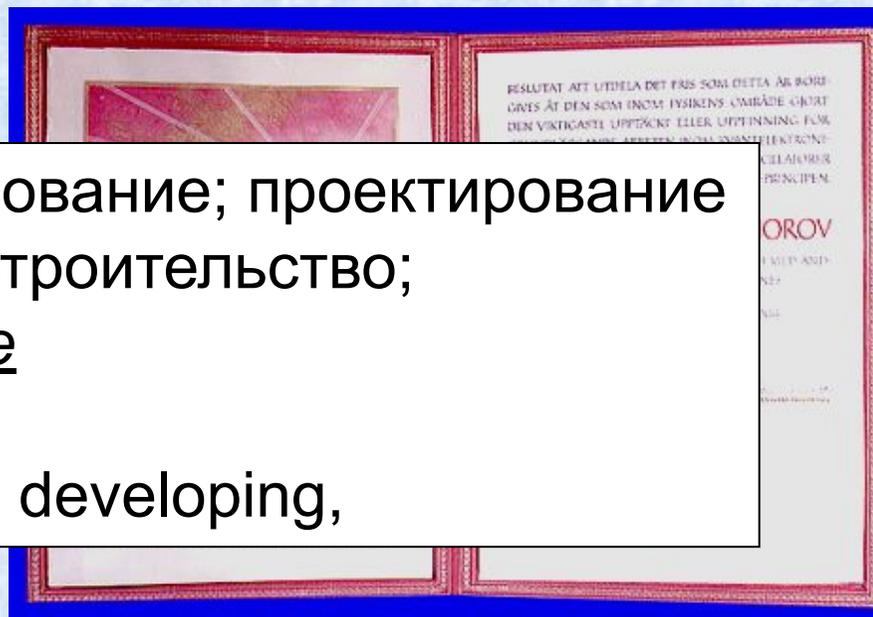
"for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle"



construction of : 1) конструирование; проектирование
2) сооружение; постройка 3) строительство;
4) истолкование, объяснение

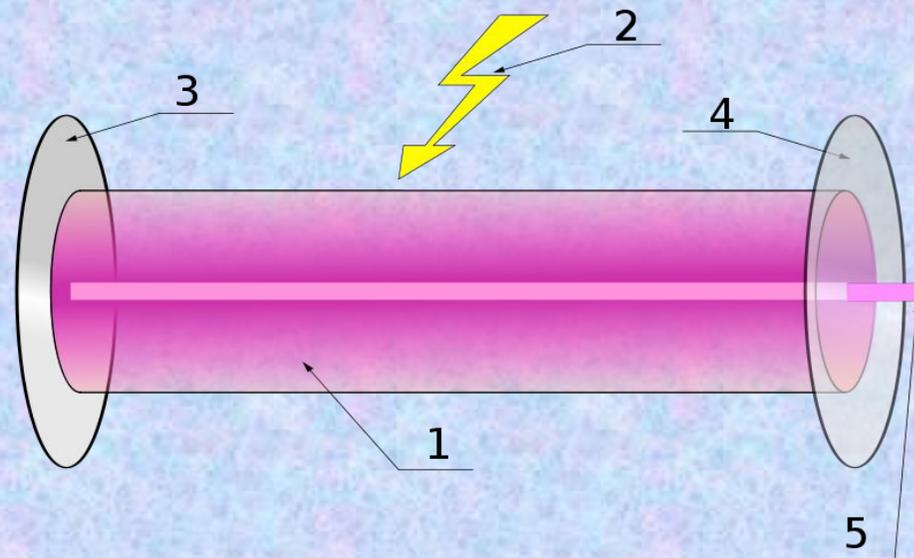
создание: 1) creation, making developing,

Нобелевская медаль А. М. Прохорова



«за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе»





Theodore Harold Maiman, 1927-2007

Т. Мэйман - 16 мая, 1960

Hughes Research Laboratories, California, USA

Первая публикация о рубиновом лазере:

«Stimulated Optical Radiation in Ruby»

T. H. MAIMAN

Nature 187, 493 - 494 (6, August, 1960)

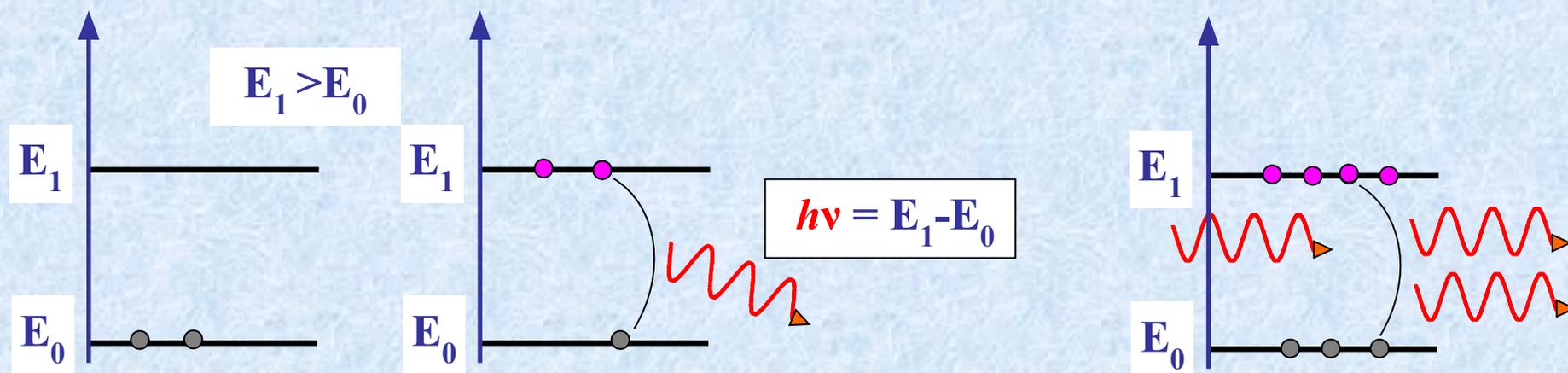
The Laser Odyssey

by
Theodore H. Maiman

Creator of the World's First Laser

Как излучается свет?

Свет излучается в результате перехода «физической системы» - атома, иона, молекулы, и т.п., из *возбужденного*  в *невозбужденное*  энергетическое состояние



Эти радиационные переходы могут быть как *спонтанными*, так и *вынужденными* – «стимулированными» самими световыми квантами.

Фотон, «рожденный» в результате такого *вынужденного перехода* – является копией фотона, стимулировавшего этот переход.

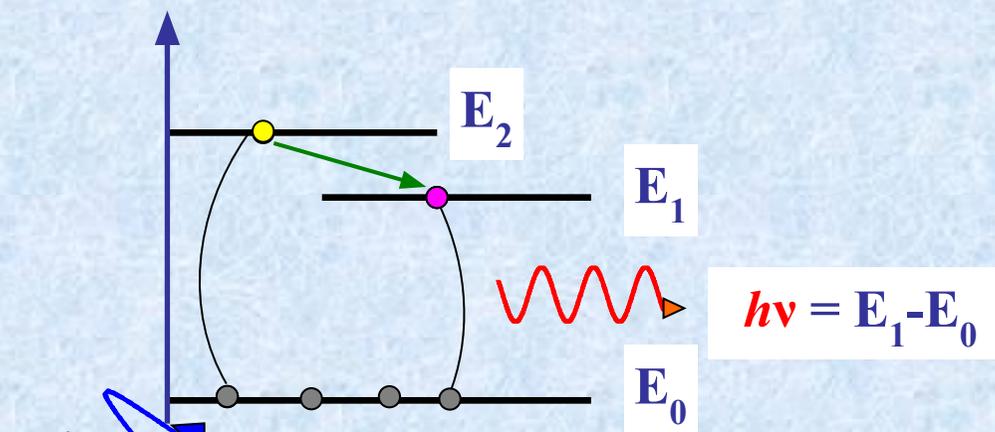
Количество квантов увеличилось вдвое – произошло усиление света в результате *вынужденного* излучения.

Этот процесс лежит в основе принципа действия лазеров.

ЛАЗЕР, от английского сокращения “**L**ASER” – **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation: “Усиление Света за счет Вынужденного Испускания Излучения”

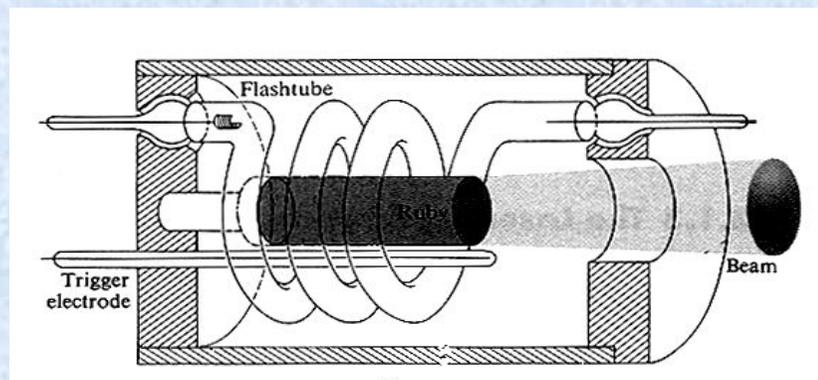
Что нужно для эффективного вынужденного усиления света?

1. Выбрать подходящую физическую систему – «лазерную среду» (газы; растворы органических и неорганических соединений; кристаллы с внедренными «примесями» и т.п.);
2. Перевести систему в возбужденное состояние;
3. Обеспечить эффективное взаимодействие фотонов с возбужденной лазерной средой.



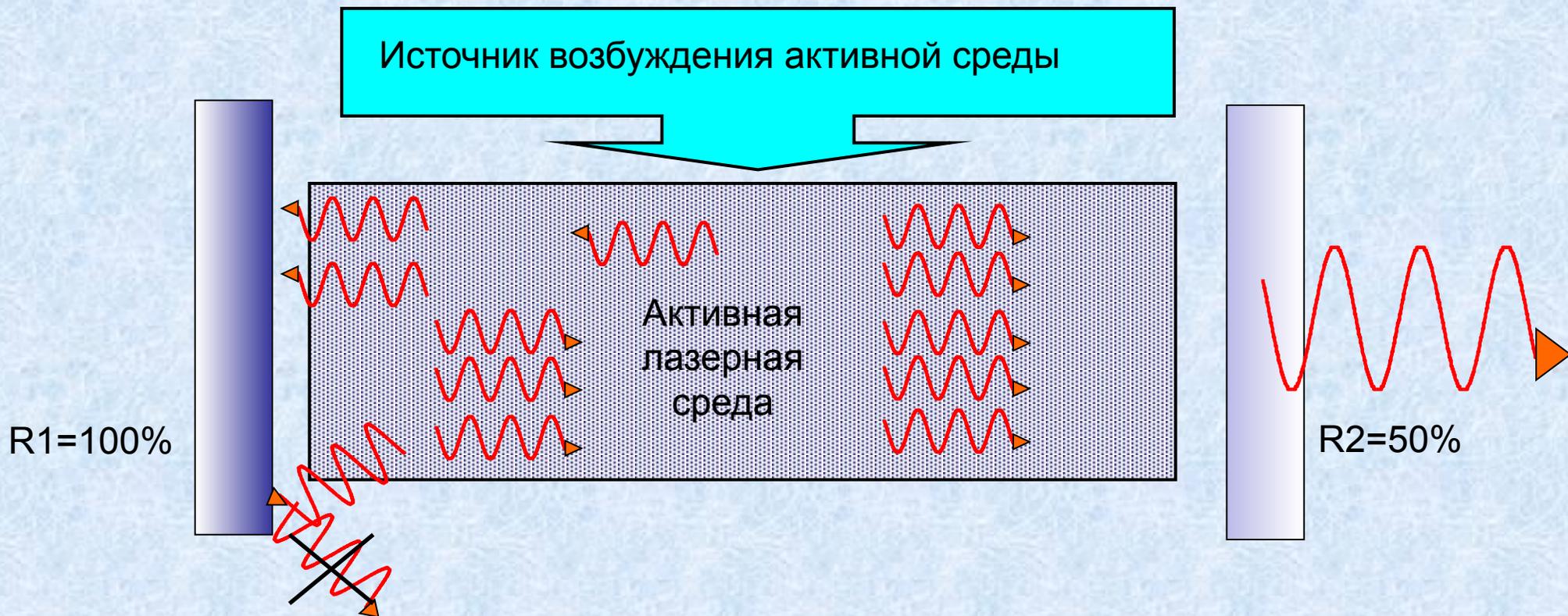
Источник «накачки»: свет;
электрический разряд;
химическая реакция и т.п.

Такая «трехуровневая» схема
была реализована в первом
созданном лазере на кристалле
рубина (1960г.).

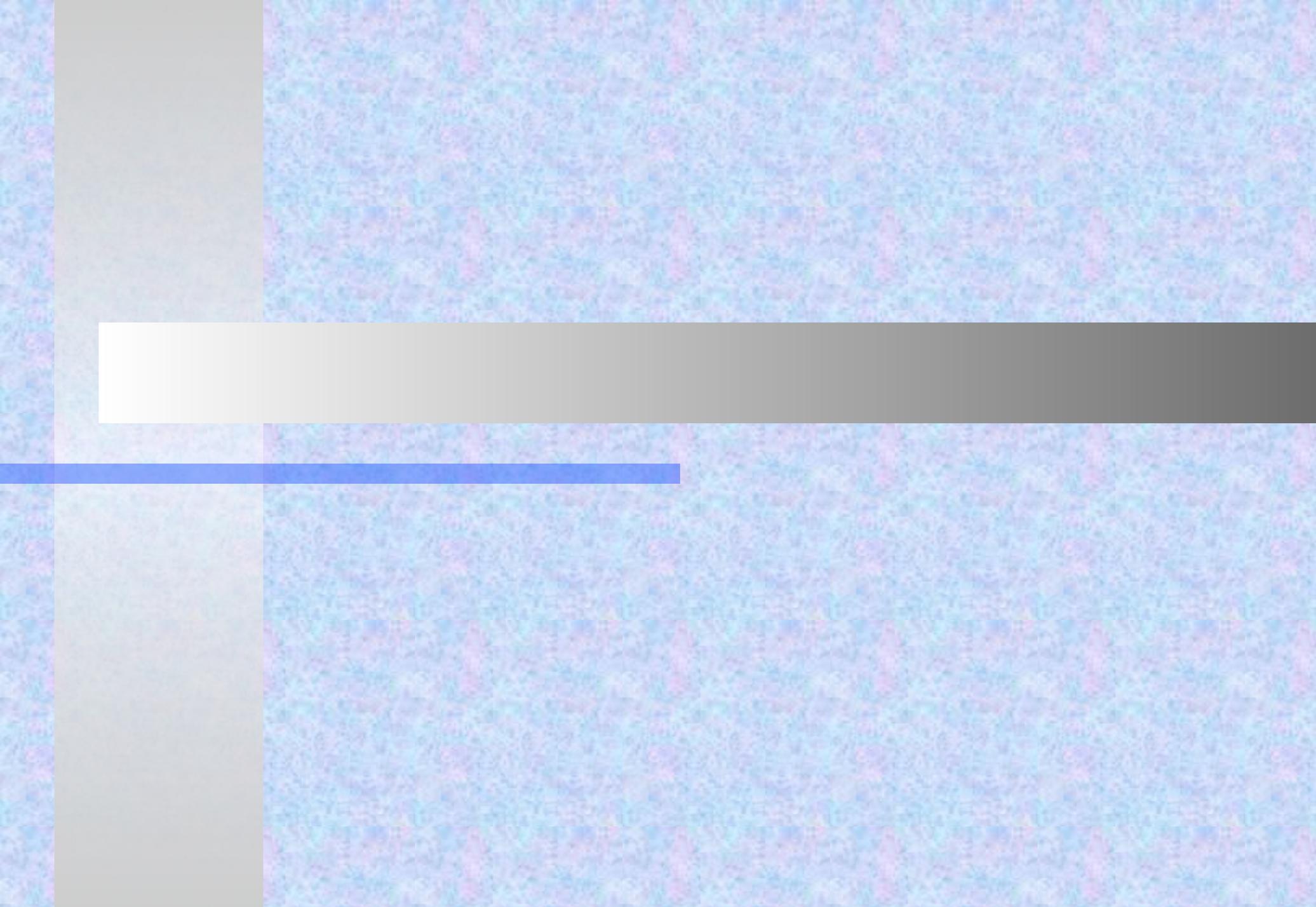


Принципиальная схема лазера. Оптический резонатор.

Оптический резонатор – это устройство, осуществляющее «положительную обратную связь». Оптический (открытый) резонатор состоит из двух съюстированных зеркал, одно из которых полупрозрачное.

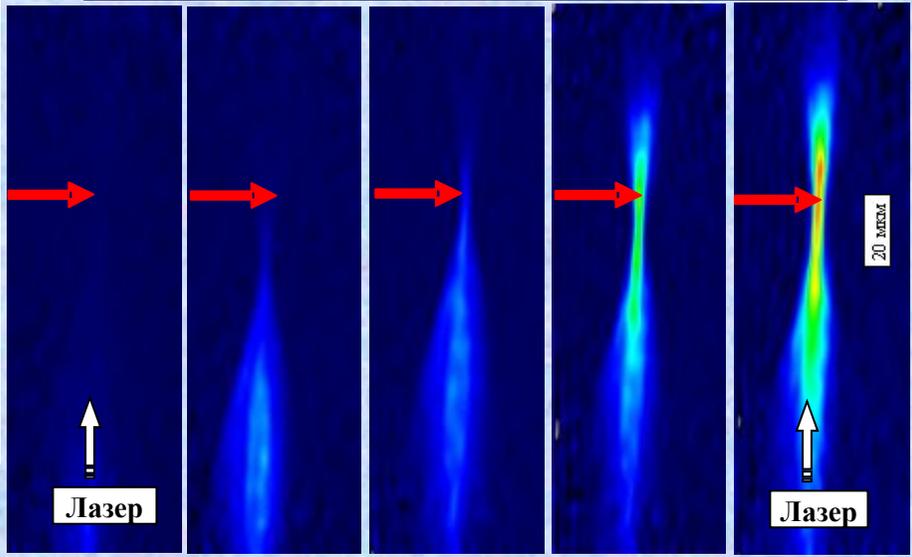
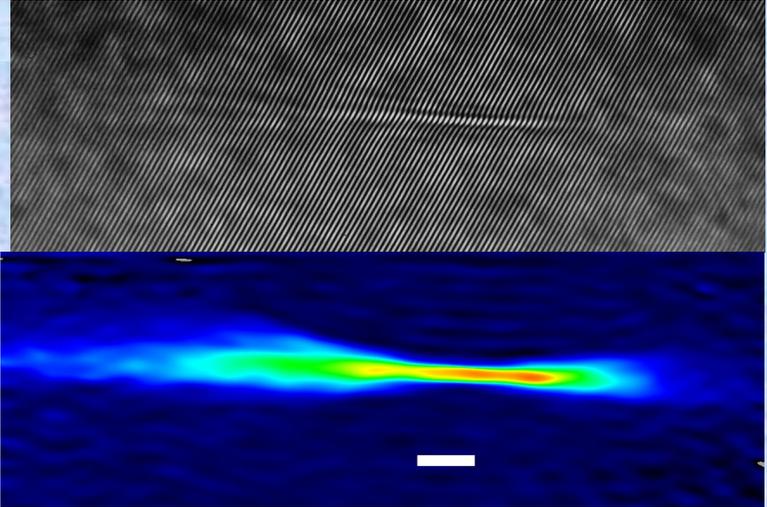


Отразившись от зеркала, фотоны возвращаются в активную среду и «стимулируют» рождение новых фотонов: между зеркалами движется быстро нарастающая «фотонная лавина» и формируется лазерный луч.



Мгновенные изображения быстро протекающих процессов.

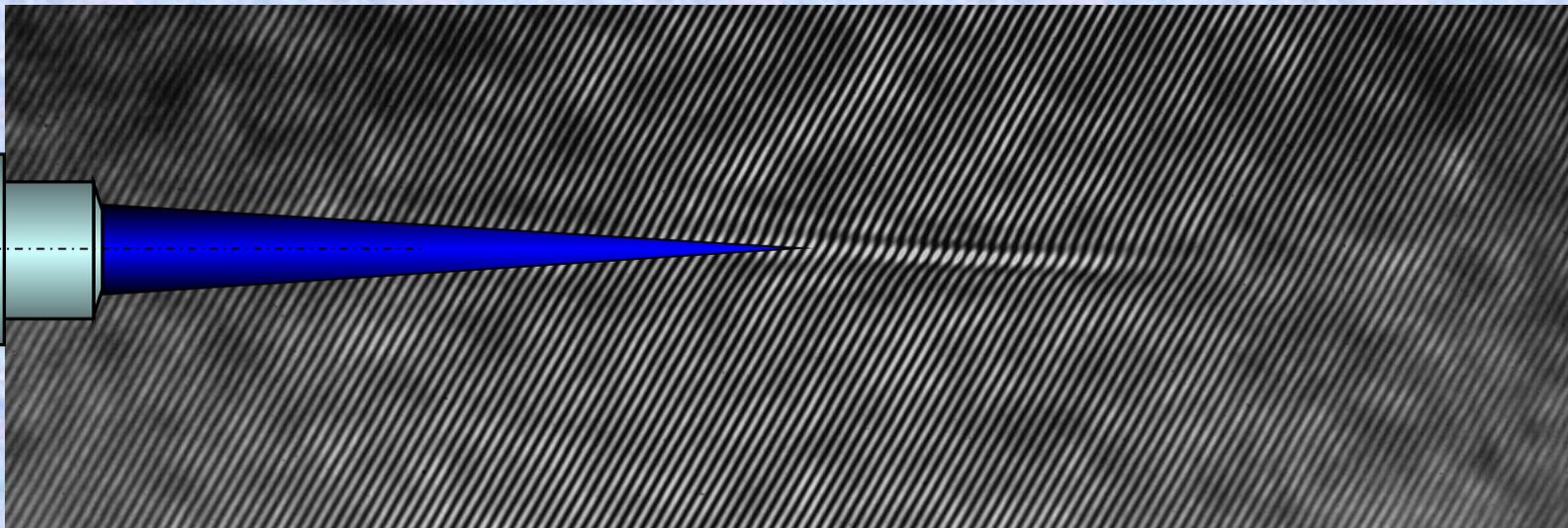
СВЕРХКОРОТКАЯ ВСТЫШКА СВЕТА - ЛАЗЕРНЫЙ ИМПУЛЬС



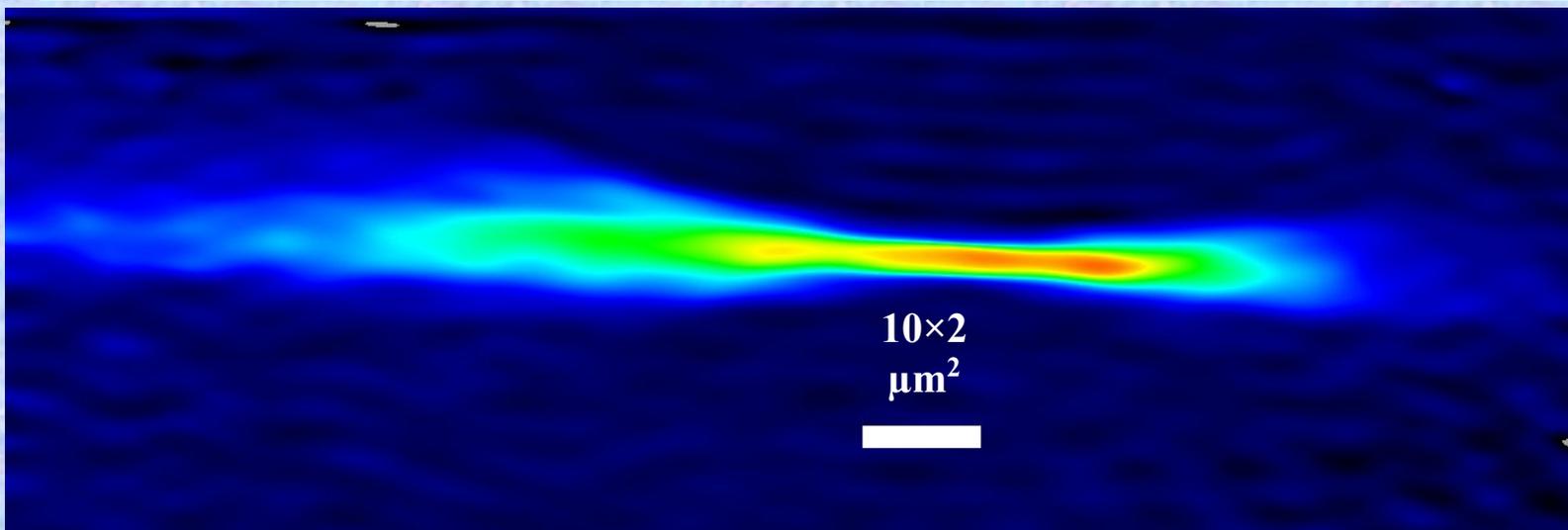
"0" фс 150 фс 250 фс 500 фс 10000 фс

Динамика формирования фемтосекундной лазерной микроплазмы

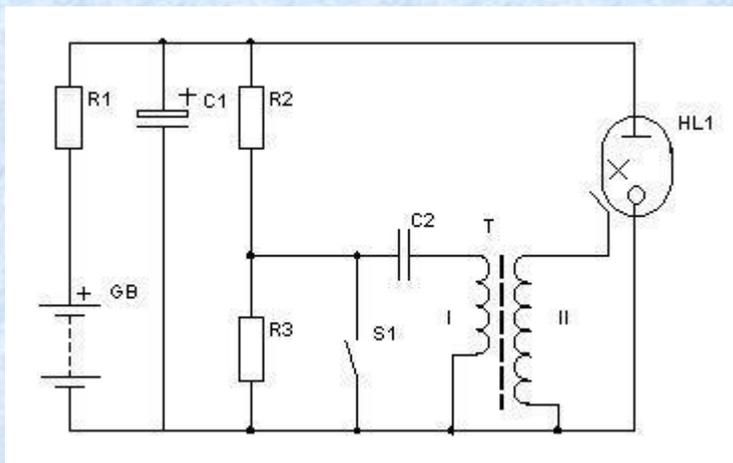
Laser



Микроплазма пробоя воздуха. Временная задержка зондирующего импульса 10 пс



Как получить короткую вспышку света – короткий лазерный импульс?



Длительность вспышки ΔT определяется:

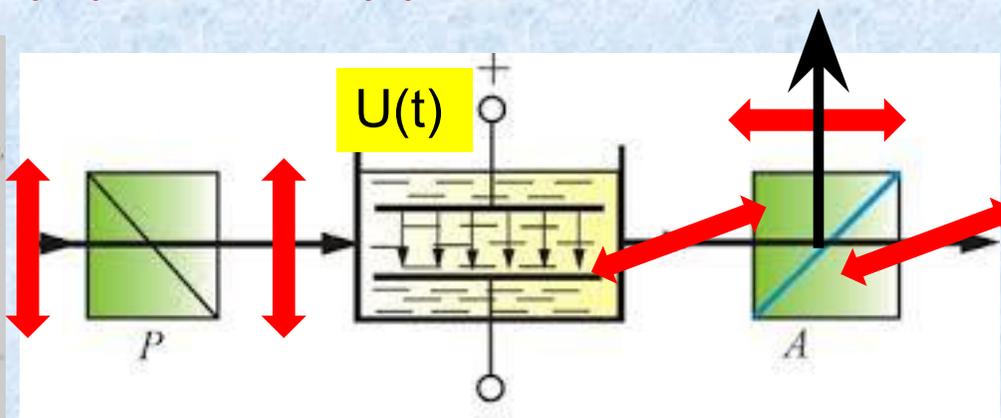
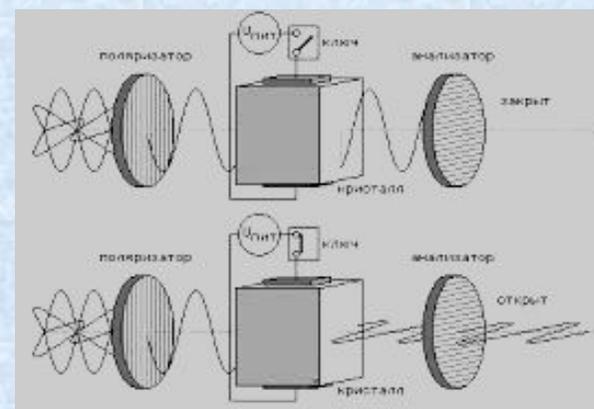
1. Временем развития и затухания плазмы
2. Временем срабатывания ключа – замыкателя
3. Паразитными емкостями и индуктивностями электрической цепи

$$\Delta T \sim 1 \text{ сек} - 10^{-6} \text{ сек}$$

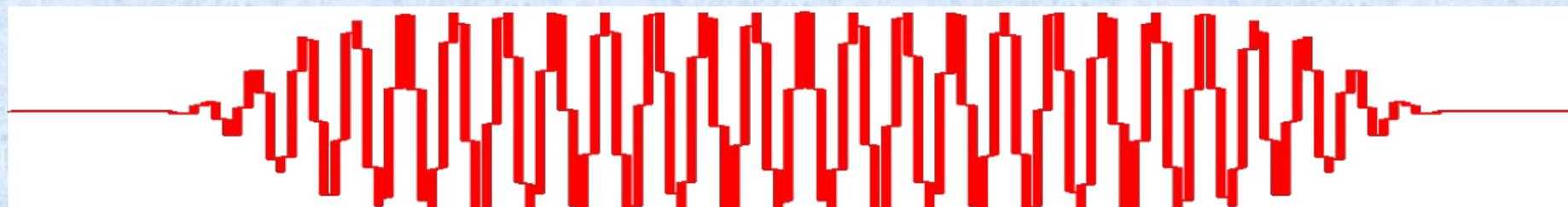
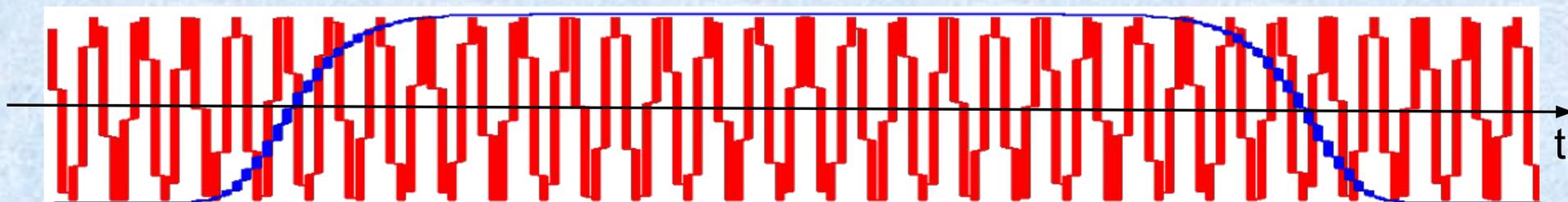


Длительность вспышки ΔT определяется временем горения магния : $\Delta T \sim 10^{-3}$ сек

Электрооптический затвор. Эффект Керра или Погкельса



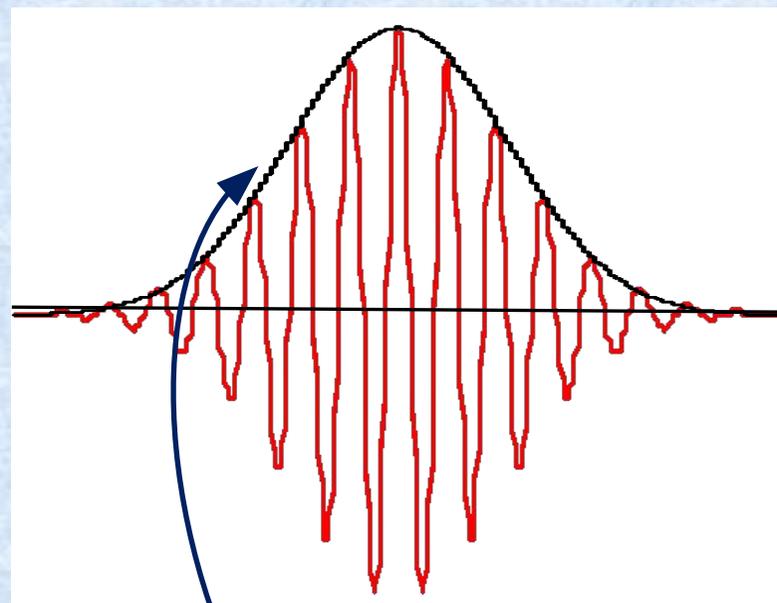
$U(t)$



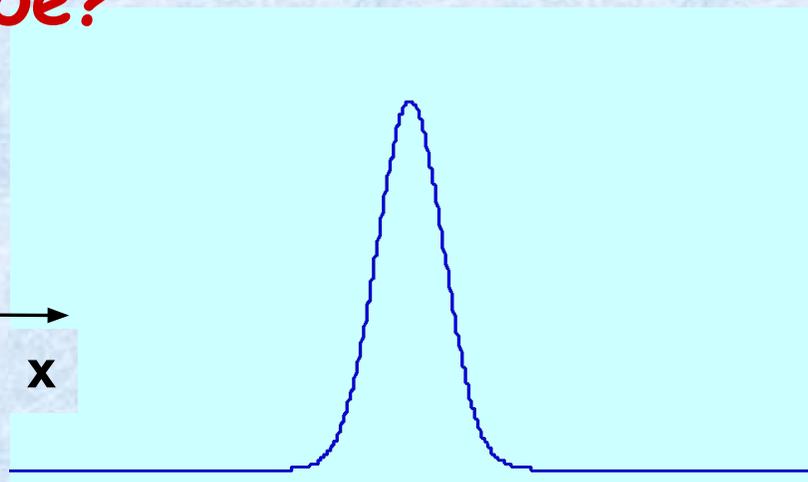
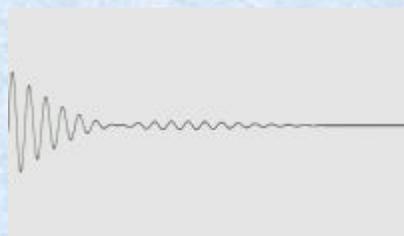
Минимальная длительность вырезанного импульса не меньше времени включения/выключения затвора : $\Delta T \sim 100$ пс

(определяется паразитными емкостями и индуктивностями электрической цепи)

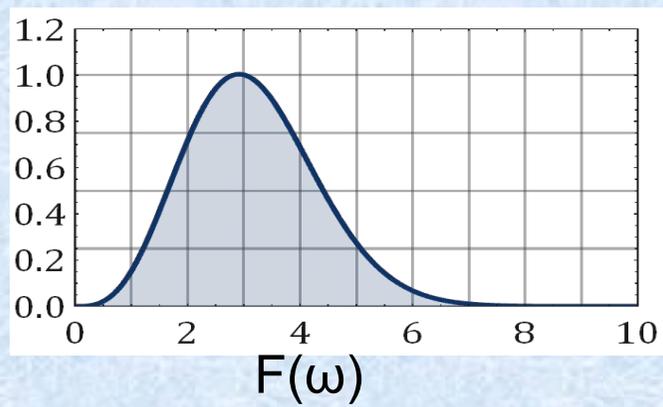
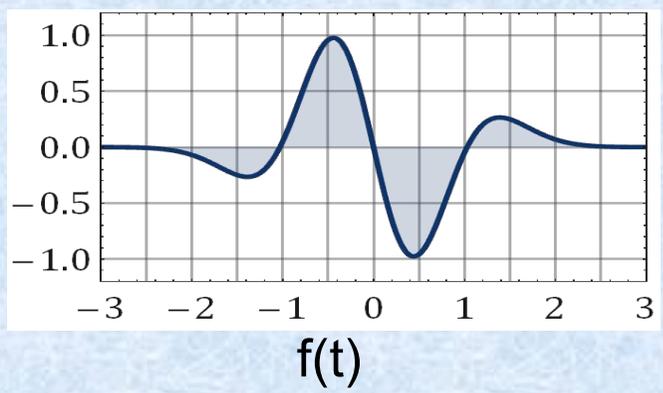
УКИ - ультракороткий лазерный импульс. Что это такое?



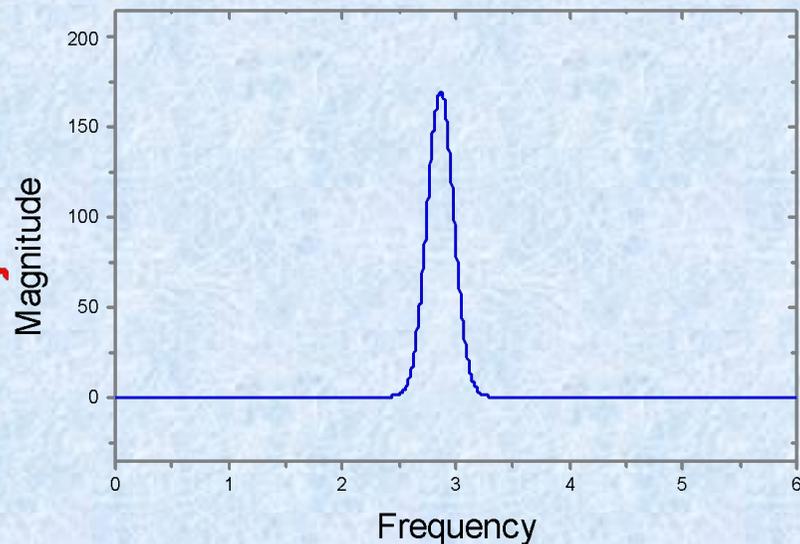
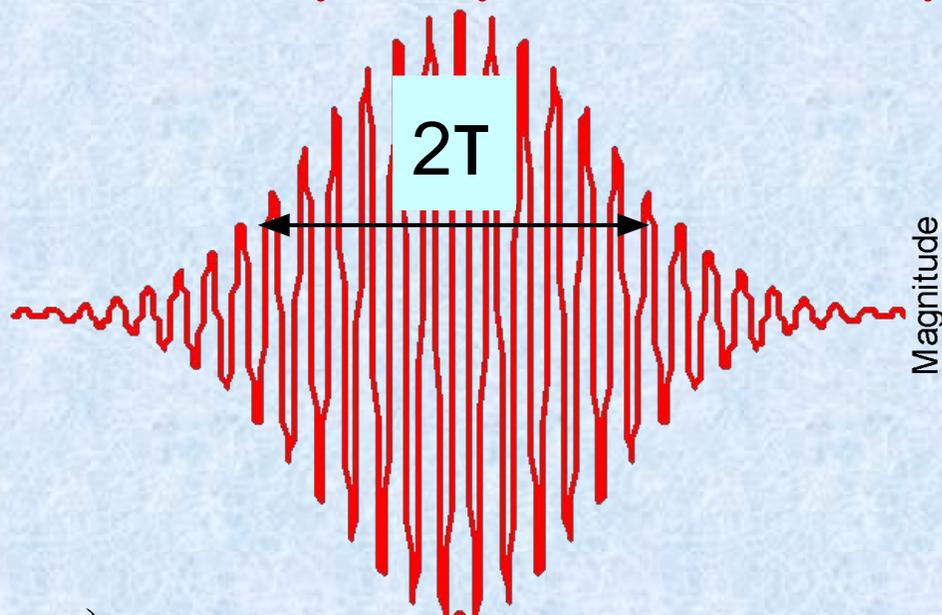
$$E(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \times \cos(\omega_0 t + \phi)$$



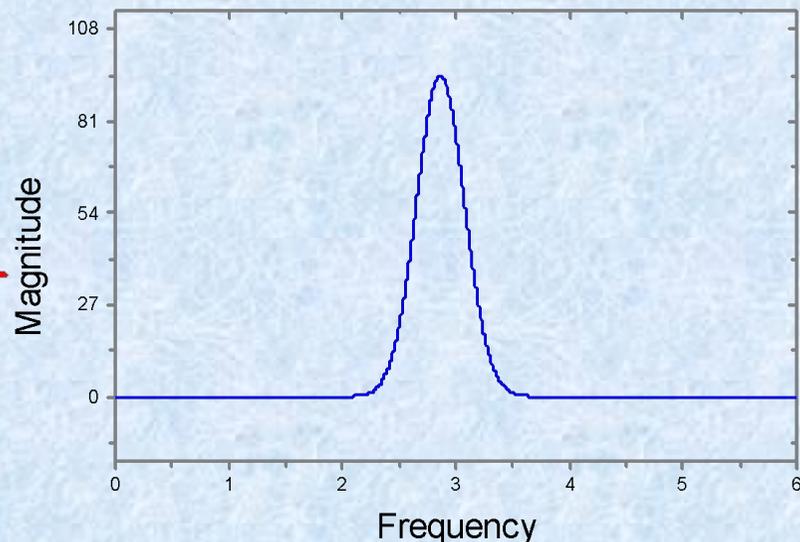
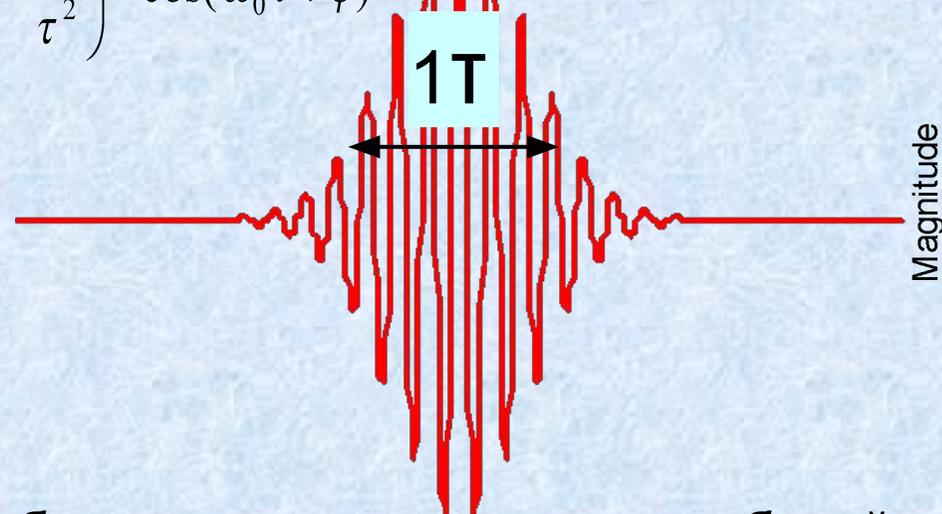
Спектр импульса



Ультракороткий лазерный импульс.



$$E(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \times \cos(\omega_0 t + \phi)$$

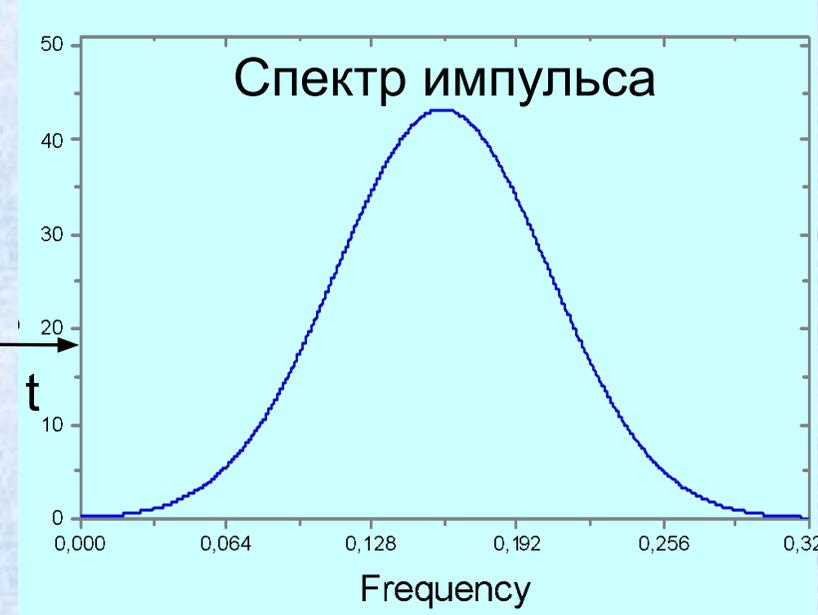
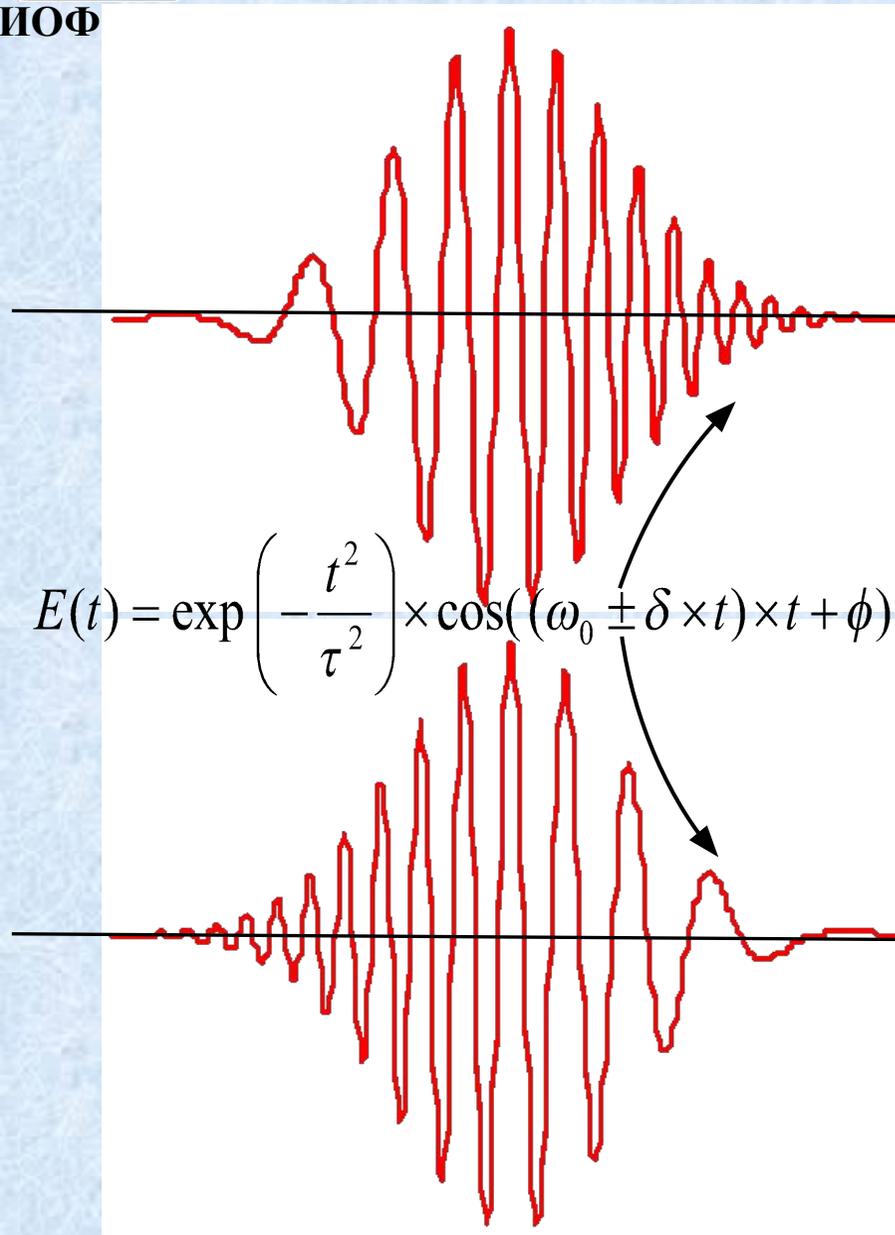


Чем больше число периодов колебаний поля, тем **уже** спектр импульса.
И, наоборот, - чем меньше периодов, тем спектр импульса **шире**.



ИОФ

Другие УКИ.

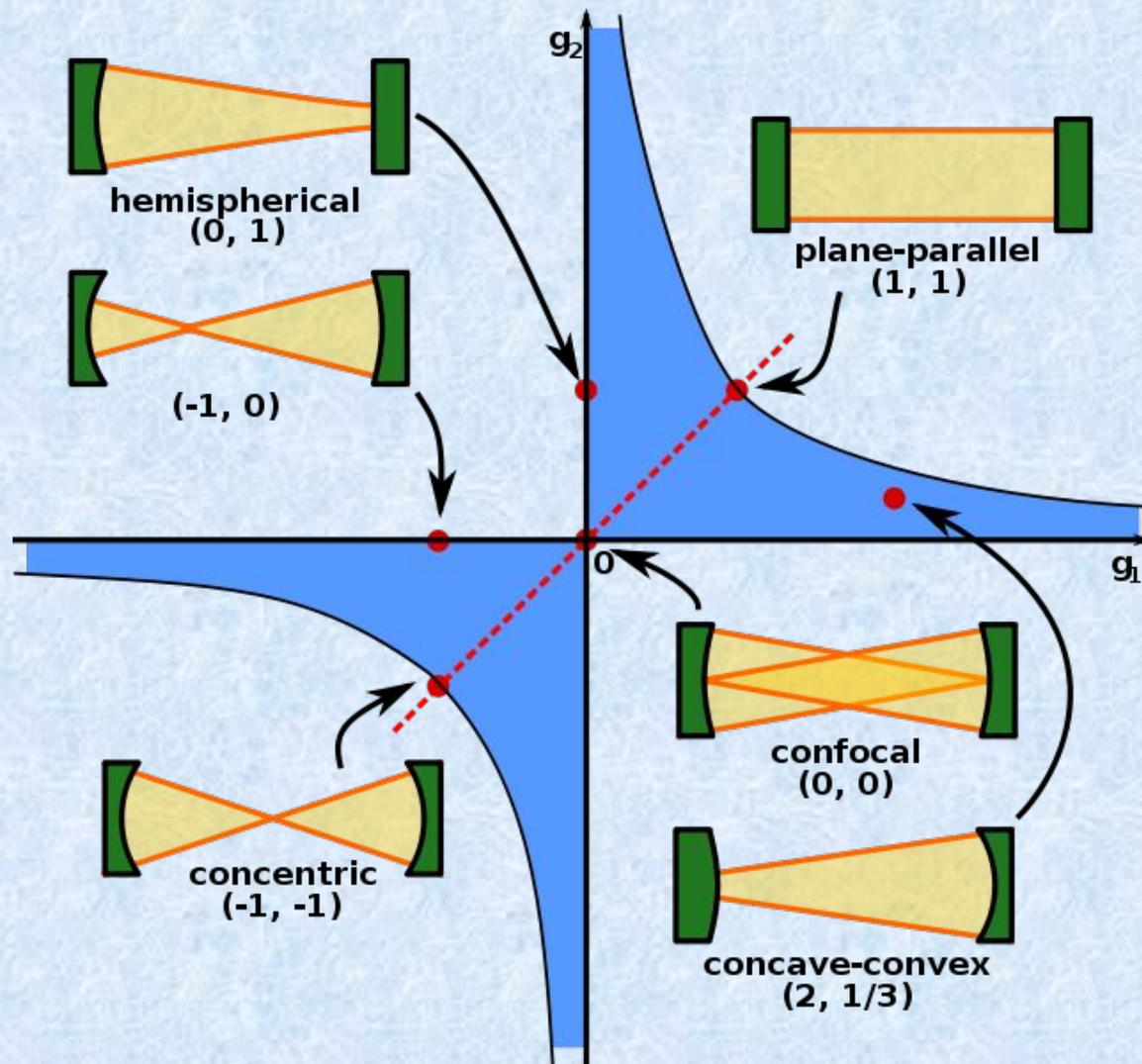
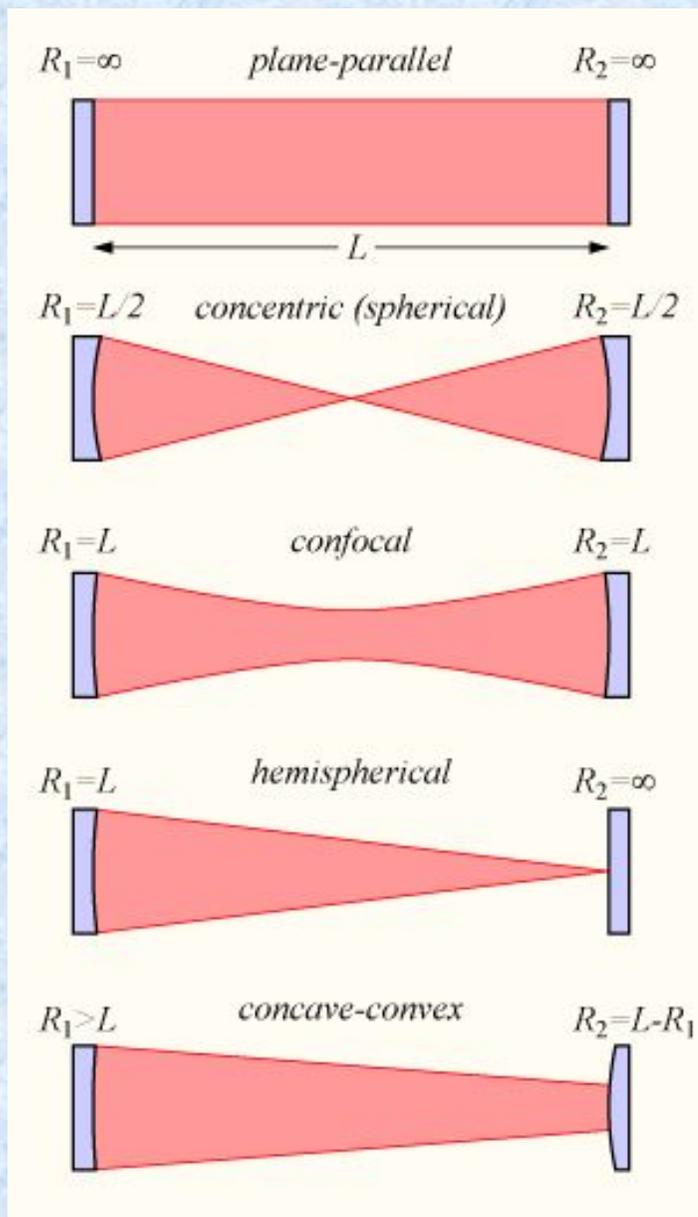


Это т.н. «чирпированные» импульсы

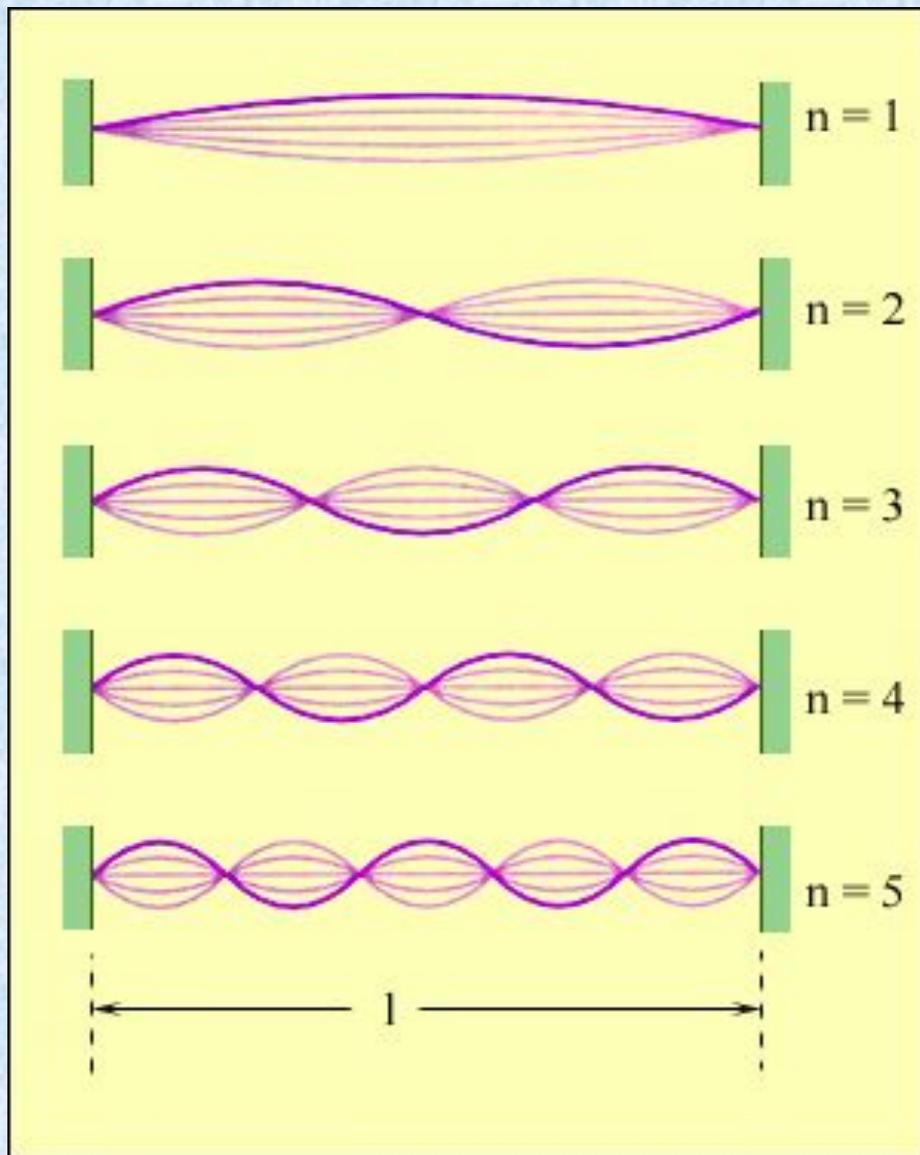


**Как сгенерировать ультракороткий
лазерный импульс?**

Моды резонатора

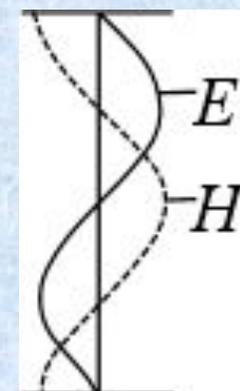
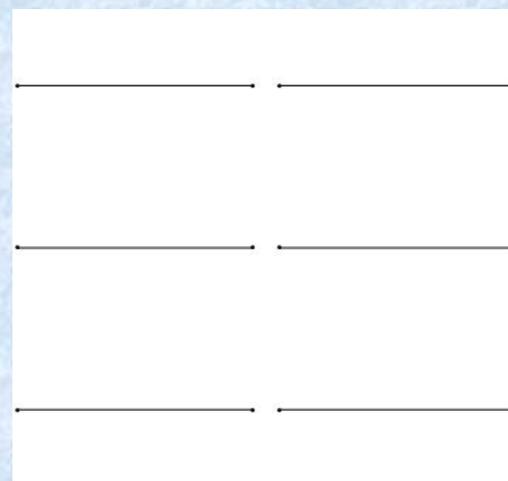
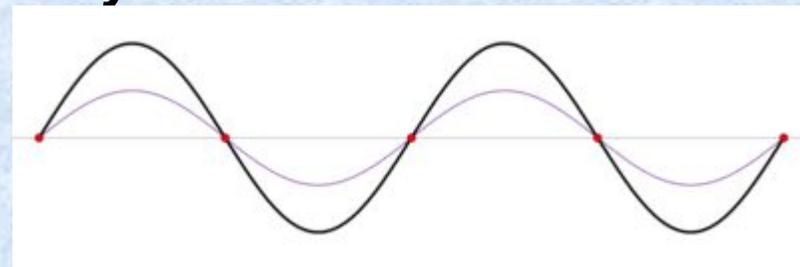


Моды резонатора

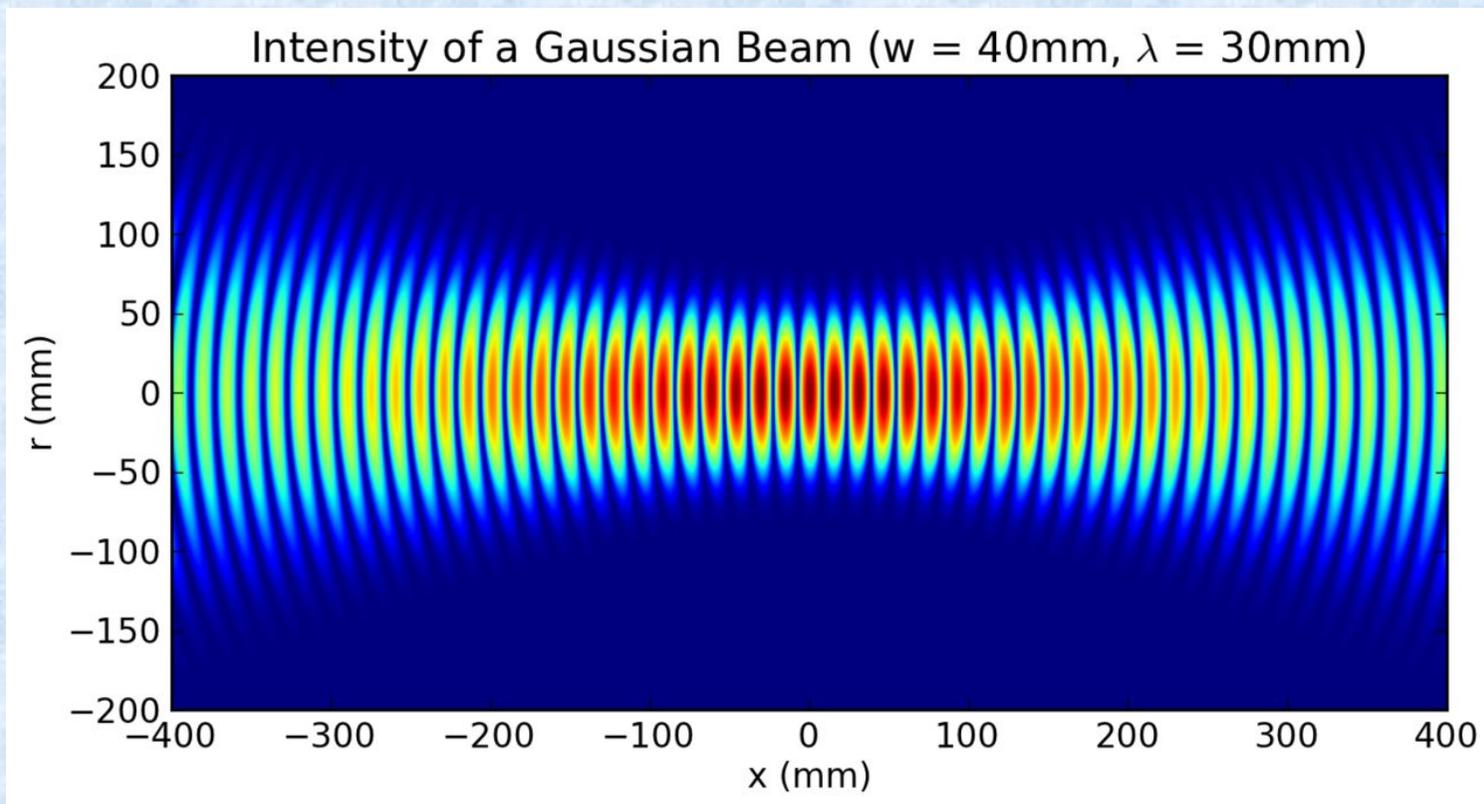


$$\nu_n = \frac{1}{T_n} = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{c}{2l} n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

**На длине резонатора,
укладывается целое число
полуволен «светового» поля.**

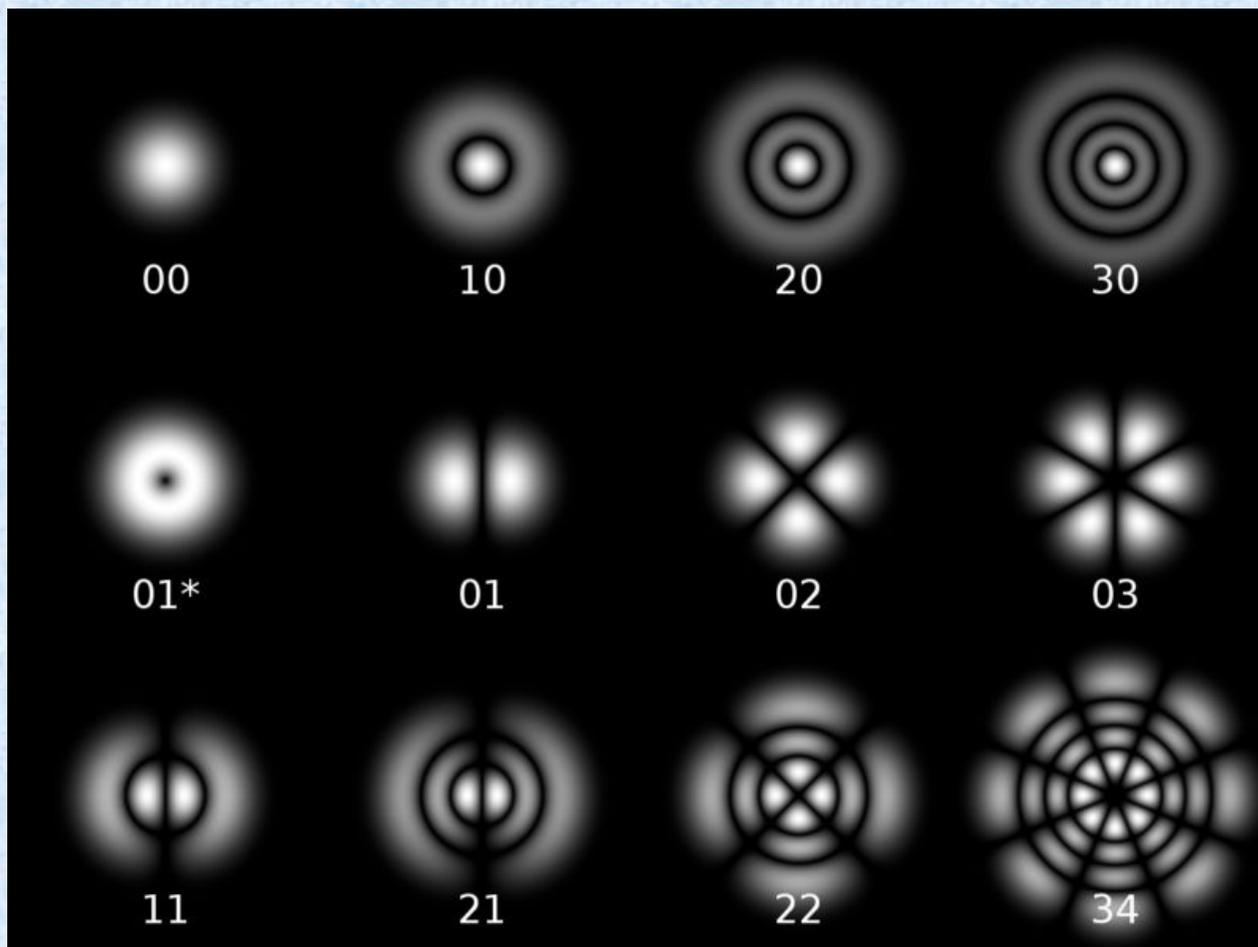


Продольные моды резонатора. Гауссовы пучки.



Поперечные моды резонатора.

$M_{n,m}$ моды.





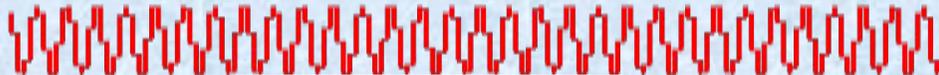
ИОФ РАН

Синхронизация мод резонатора

$$Y_1(t) = \cos(1 \cdot t)$$



$$Y_2(t) = \cos(2 \cdot t)$$

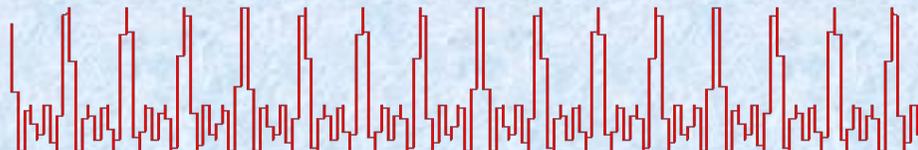


$$Y_1(t) + Y_2(t) = ???$$

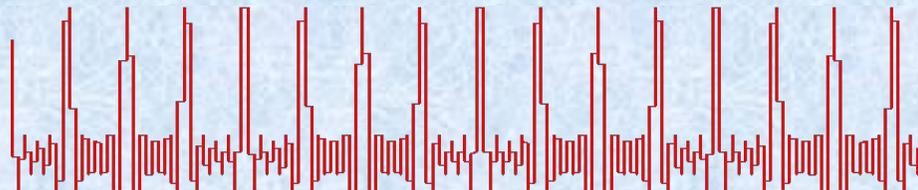
$$\cos(1 \cdot t) + \cos(2 \cdot t)$$



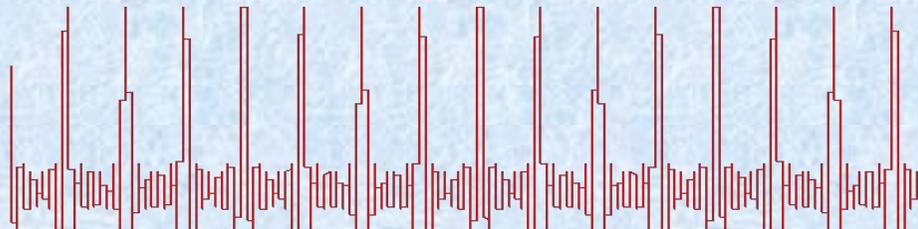
$$\cos(1 \cdot t) + \cos(2 \cdot t) + \cos(3 \cdot t)$$



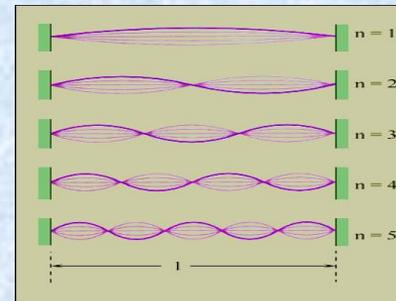
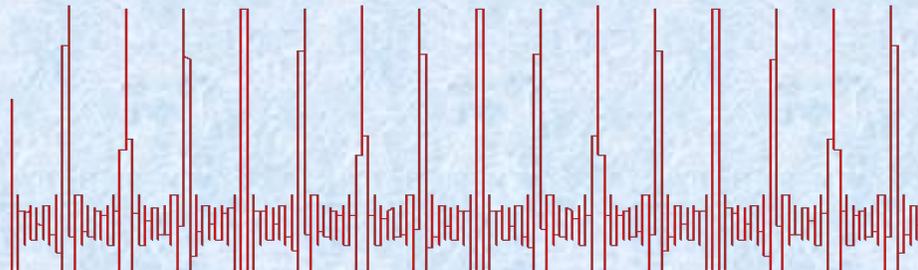
$$\cos(1 \cdot t) + \cos(2 \cdot t) + \cos(3 \cdot t) + \cos(4 \cdot t)$$



$$\cos(1 \cdot t) + \cos(2 \cdot t) + \cos(3 \cdot t) + \cos(4 \cdot t) + \cos(5 \cdot t)$$



$$\cos(1 \cdot t) + \cos(2 \cdot t) + \cos(3 \cdot t) + \cos(4 \cdot t) + \cos(5 \cdot t) + \cos(6 \cdot t)$$

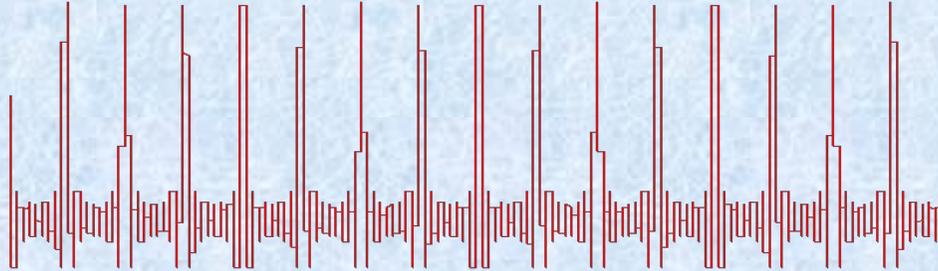


По мере увеличения числа слагаемых мод, фазы которых остаются неизменными, длительность «пиков» **сокращается**, а период «пиков» **остается неизменным и равным «времени обхода резонатора» : $2L/c$.**

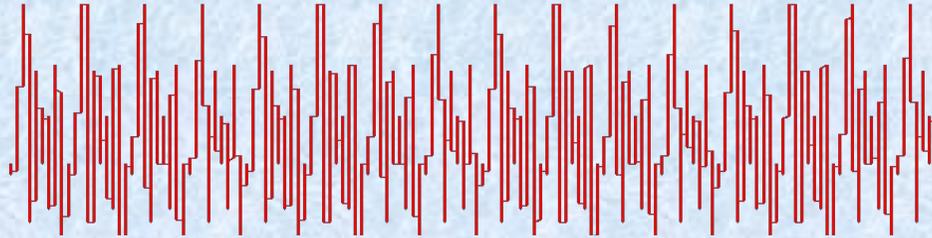
ДОКАЗАТЬ самостоятельно.

Синхронизация мод резонатора

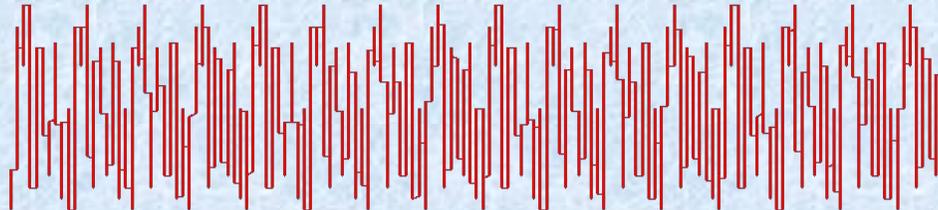
$$\begin{aligned} &\cos(1*t+0)+\cos(2*t) \\ &+\cos(3*t)+\cos(4*t)+ \\ &\cos(5*t)+\cos(6*t) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} &\cos(1*t+4)+\cos(2*t+3)+ \\ &\cos(3*t+2)+\cos(4*t+5)+ \\ &\cos(5*t+4)+\cos(6*t+0) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} &\cos(1*t+4)+\cos(2*t+3)+ \\ &\cos(3*t+2)+\cos(4*t+5)+ \\ &\cos(5*t+7)+\cos(6*t+0) \end{aligned}$$



Если фазы слагаемых мод **НЕ** остаются неизменными, столь регулярной картины не наблюдается!
СЛЕДОВАТЕЛЬНО, нам надо иметь достаточно много СФАЗИРОВАННЫХ мод.



ЛАЗЕРЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

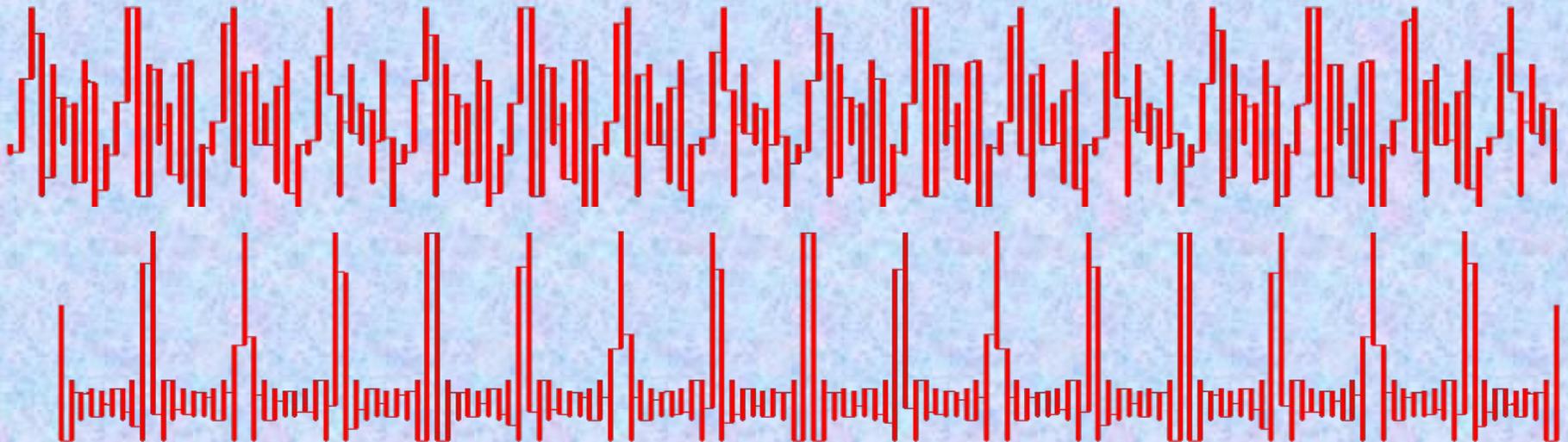
Механизмы и способы генерации и усиления ультракоротких (пс и фс) лазерных импульсов; методы измерения их основных параметров; практические применения.

Гарнов Сергей Владимирович

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН ИОФРАН

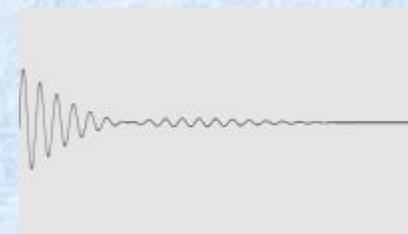
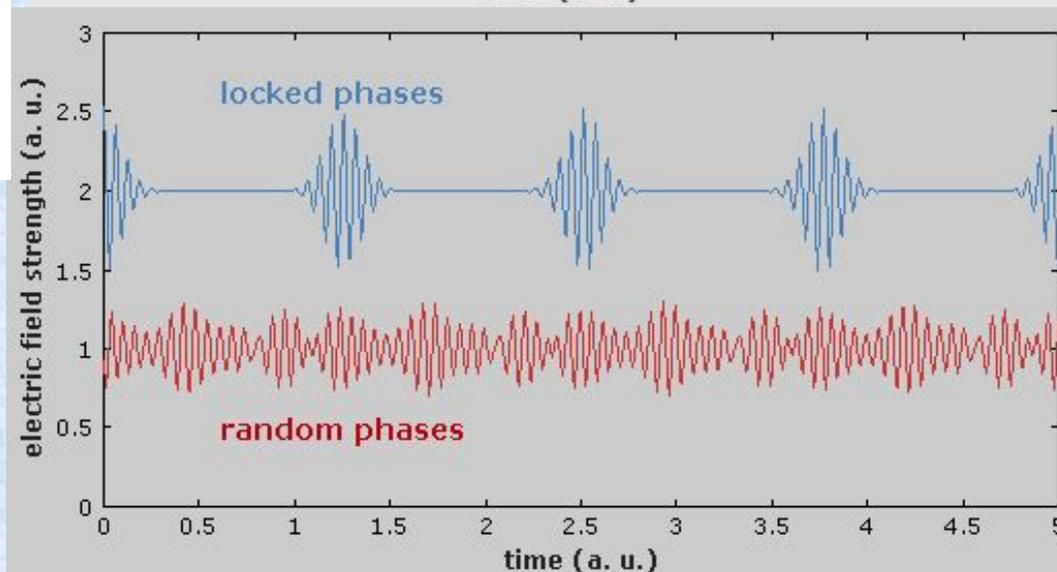
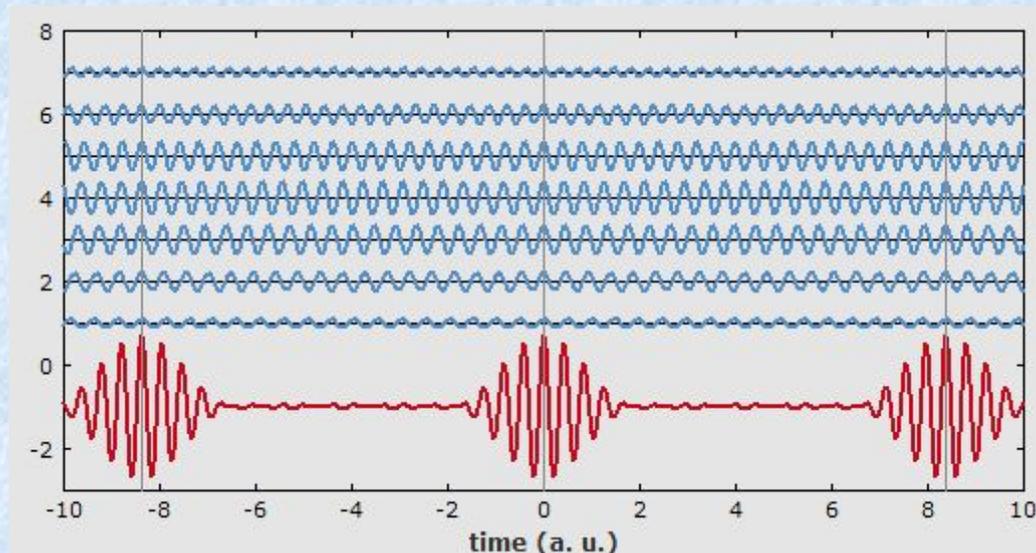
Лекция №2. 12 февраля 2015 г.

Принципы генерации УКИ. Активная и пассивная синхронизация мод. Акустооптические и электрооптические модуляторы Насыщающиеся оптические среды. Активные среды различных типов лазеров и источники накачки.



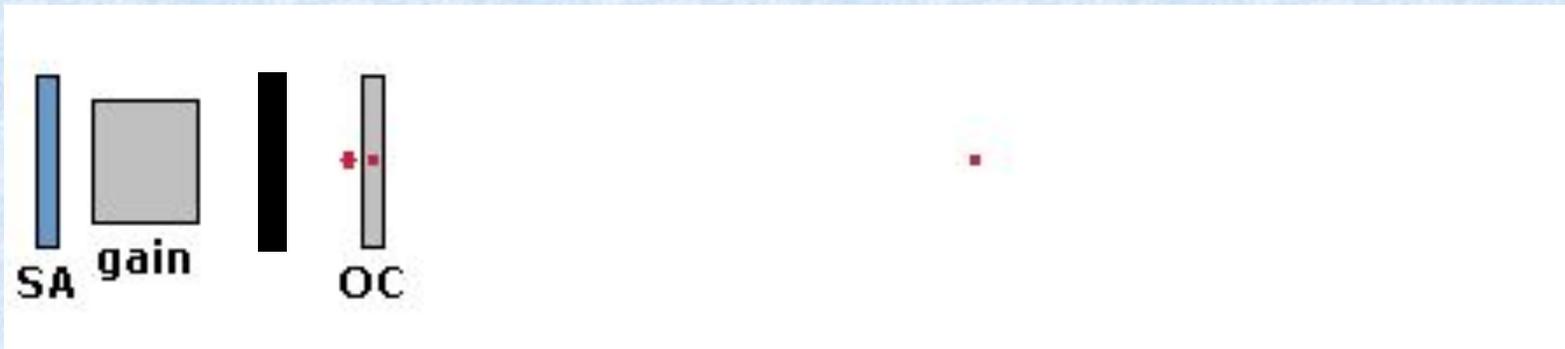
Синхронизация мод резонатора. Как синхронизовать моды?

Самостоятельно
про моделировать
сложение
синусоид с
одинаковыми
фазами и
разными
АМПЛИТУДАМИ



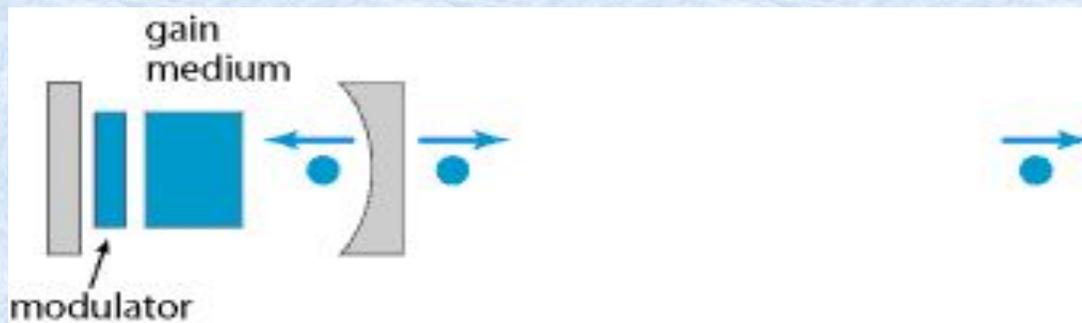
Период
следования
«пичков» т.е.
УКИ
неизменен и
равен
времени
обхода
резонатора
 $\cong 2L/c$.

Синхронизация мод резонатора. Синхронизованные моды.

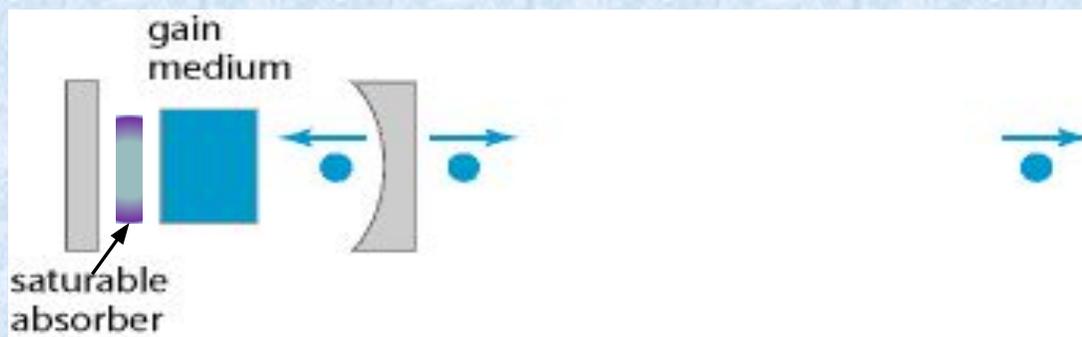


Принцип **синхронизации мод** состоит во внесении «потерь добротности» в резонатор с **периодичностью** равной времени обхода $\approx 2L/c$. Большую часть времени потери (например, поглощение излучения) д.б. велики для того, чтобы подавить несфазированное лазерное поле внутри резонатора и «пропускать без потерь циркулирующий по резонатору одиночный лазерный импульс.

Синхронизация мод резонатора. Активная и пассивная синхронизация.



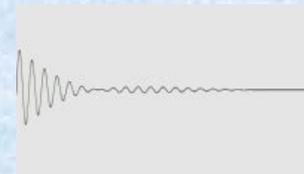
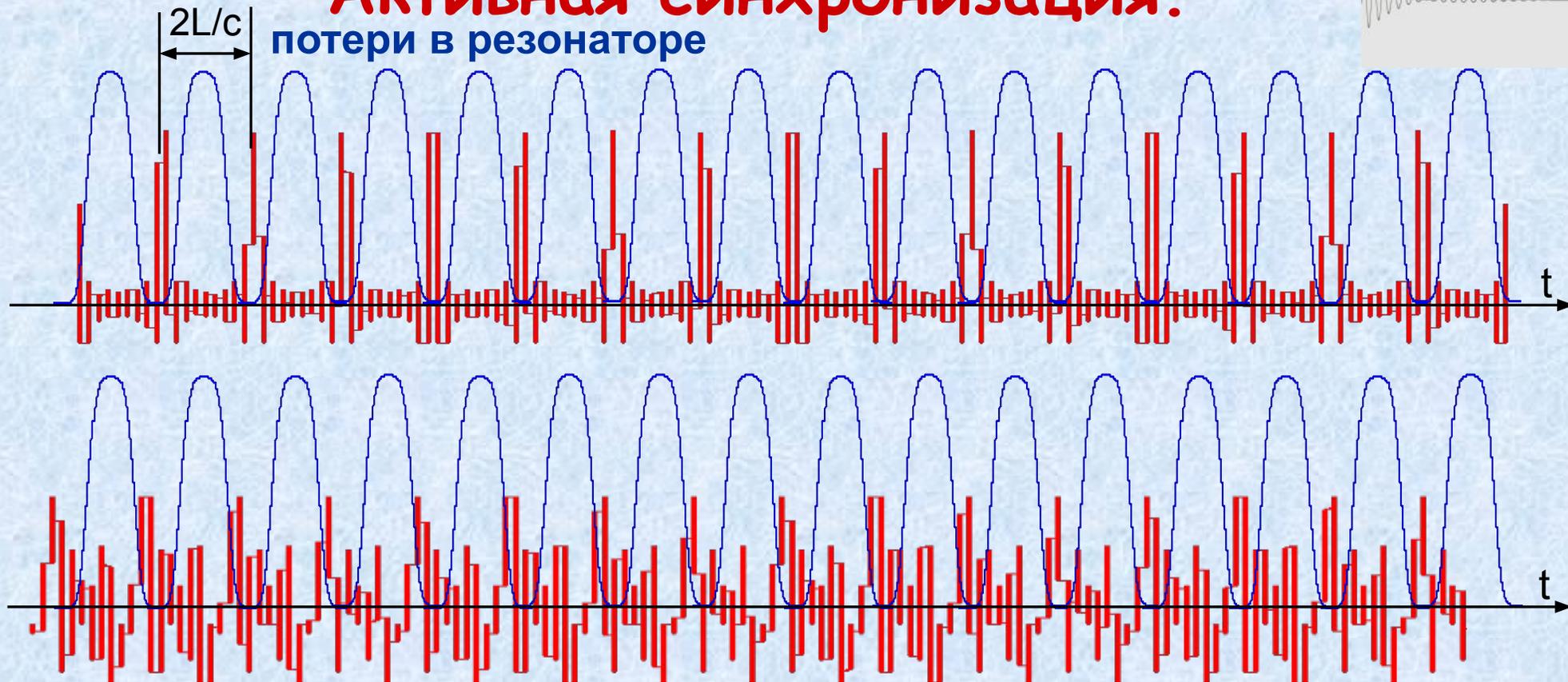
активная синхронизация



пассивная синхронизация

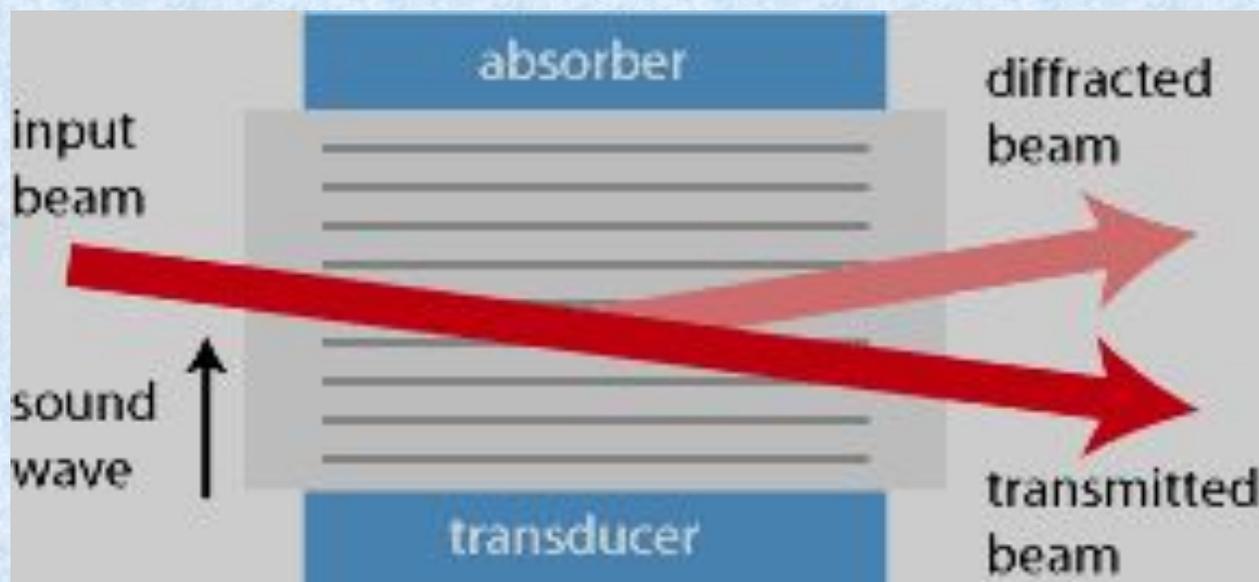
Синхронизация мод резонатора.

Активная синхронизация.



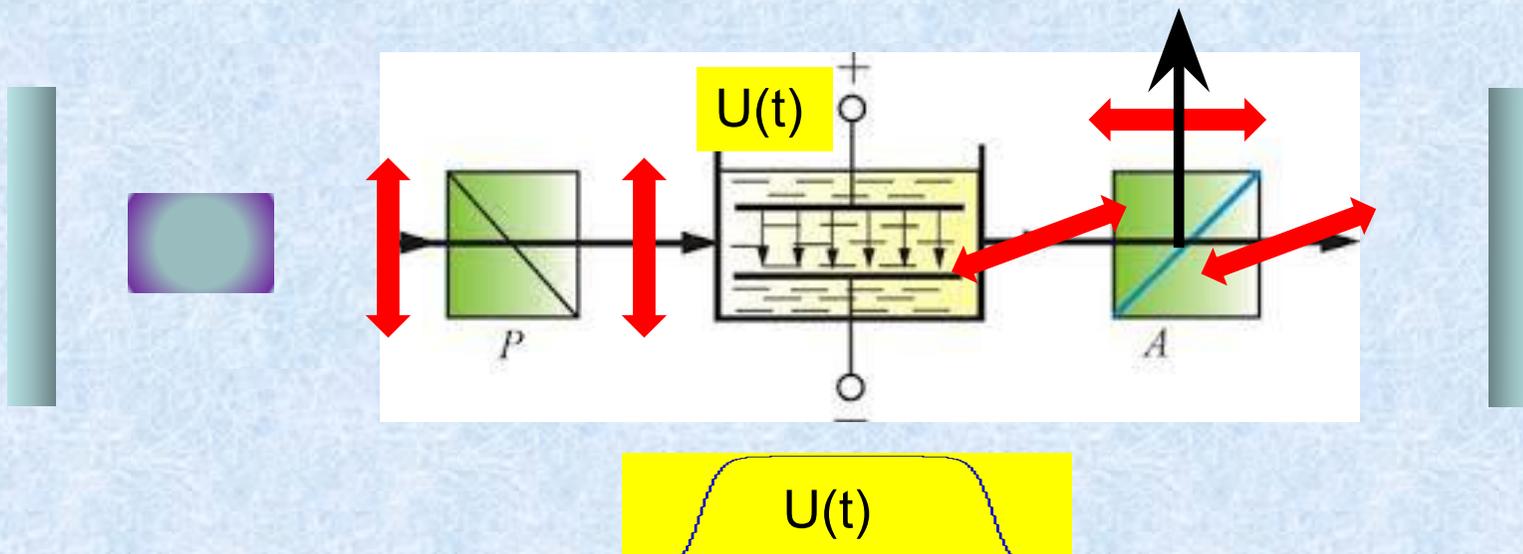
Принцип **активной синхронизации мод** состоит в преднамеренном т.е. активном внесении «потерь добротности» в резонатор с **периодичностью** равной времени обхода $\approx 2L/c$. Большую часть времени **потери** (например, поглощение излучения) д.б. велики для того, чтобы подавить несфазированное лазерное поле внутри резонатора.

Активная синхронизация мод. Акустооптический модулятор.



Принцип работы: отклонение светового (лазерного) луча за счет его дифракции (отклонения) на решетке показателя преломления (Бреговская дифракция) создаваемой в кристалле кварца, ниобата лития, стекле и т.д. звуковыми (механическими!) колебаниями пьезоэлектрического генератора, к которому прикладывается переменное напряжение в десятки вольт с частотой ν равной $\approx c/2L$. $L=1\text{м}$, $c=3 \times 10^{10}$ см/сек, $\nu \approx 150$ МГц.

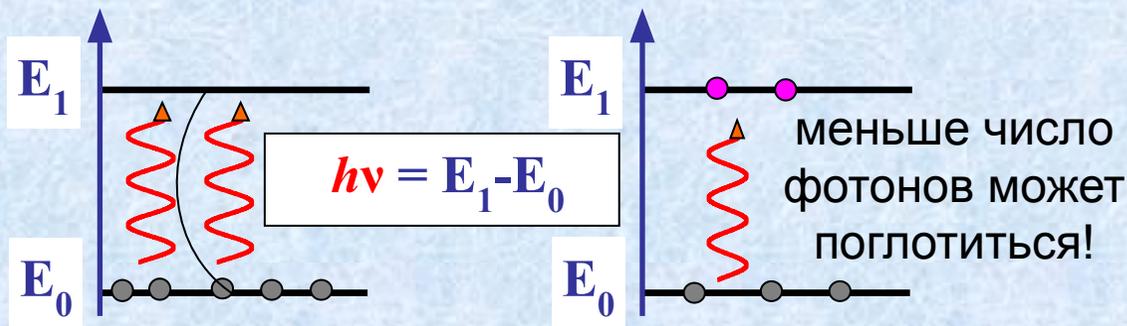
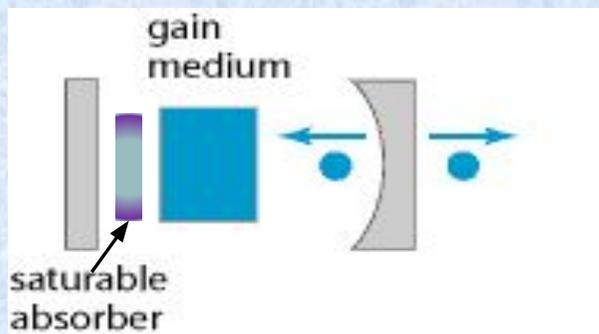
Активная синхронизация мод. Электрооптический модулятор.



Принцип работы: вывод несфазированного светового потока из резонатора за счет периодического изменения поляризации в результате электрооптического эффекта в кристалле (ниобата лития, КДП, ДКДП и т.д), к которому прикладывается переменное напряжение в сотни вольт с частотой

$$V \text{ равной } \approx c/2L. \quad L=1\text{м}, \quad c=3 \times 10^{10} \text{ см/сек}, \quad V \approx 150 \text{ МГц.}$$

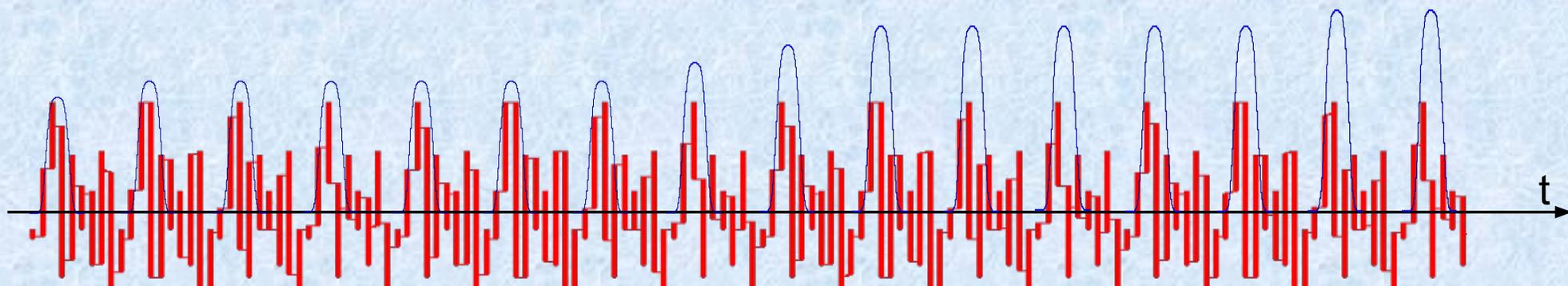
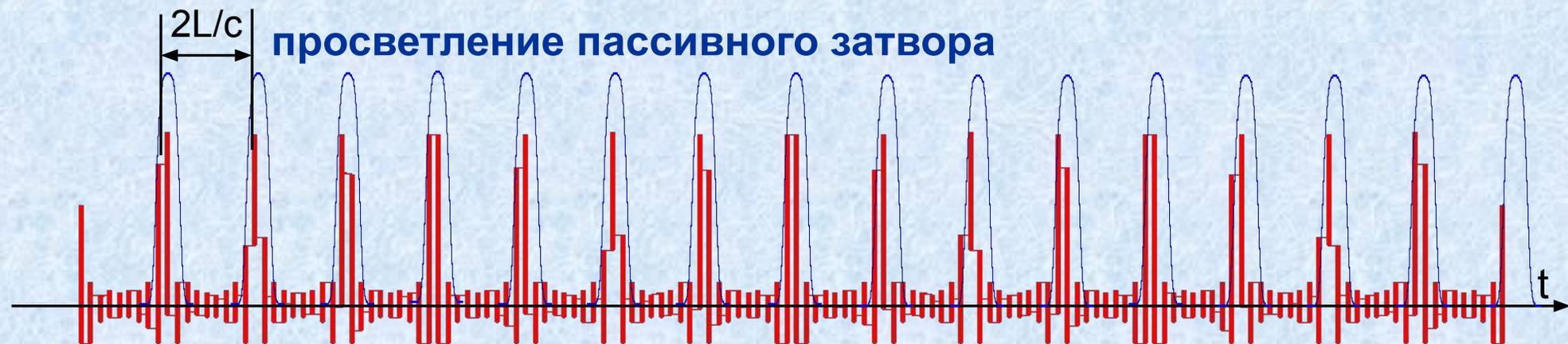
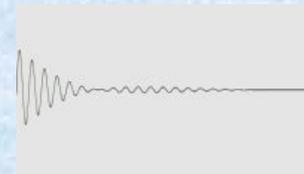
Синхронизация мод резонатора. Пассивная синхронизация на основе насыщающегося поглотителя.



Принцип работы основан на нелинейно-оптическом эффекте «просветления» среды в интенсивном световом (лазерном) поле за счет опустошения нижнего уровня и заполнения верхнего уровня. В шумовой структуре несфазированных мод в резонаторе могут появляться выбросы поля («пички») с большой интенсивностью достаточной для возникновения такого процесса .

НЕОБХОДИМО не только быстрое насыщение поглотителя, но его быстрая релаксация в невозбужденное состояние для предотвращения пропускания сопутствующих низкоинтенсивных шумовых импульсов. Времена релаксации лежат в диапазоне 1 нс -10 пс. Поглотители изготавливаются на основе органических красителей и позволяют генерировать импульсы до нескольких пс.

Синхронизация мод резонатора. Пассивная синхронизация.



Синхронизация мод резонатора. Пассивная синхронизация на основе механизма «Керровской линзы»



Принцип работы основан на нелинейно-оптическом эффекте Керра : увеличения показателя преломления среды под действием интенсивного лазерного импульса приводящего к самофокусировке лазерного пучка и уменьшению его расходимости. В шумовой структуре несфазированных мод в резонаторе могут появляться выбросы поля («пички») с большой интенсивностью достаточной для возникновения такого процесса. Времена возникновения и релаксации **Керровской линзы** лежат в диапазоне 1 пс - 10 фс. Это позволяет генерировать импульсы от десятков до нескольких фемтосекунд! При этом, Керровской средой, как правило, служит сама активная среда лазера, в частности кристалл наиболее широко распространенных фемтосекундных Ti-Sa лазеров.

**Что еще необходимо для того чтобы
сгенерировать ультракороткий
лазерный импульс?**

**АКТИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СРЕДА С
НЕОБХОДИМЫМИ СВОЙСТВАМИ
И
ИСТОЧНИК НАКАЧКИ ЭТОЙ СРЕДЫ**