

# Лазер — замечательное достижение XX века

П. КРЮКОВ

## Высокие мощности

Для увеличения энергии в импульсе и, соответственно, мощности требуется усиление. Лазер-усилитель — это, попросту говоря, лазер без резонатора. Усиление получается при пропускании лазерного излучения через активную среду либо путем последовательных проходов через несколько слоев активной среды (многокаскадное усиление), либо путем нескольких проходов через один и тот же слой (многопроходное усиление). Импульс, предназначенный для усиления, вырезается из непрерывной последовательности УКИ с помощью *электрооптического затвора*.

Однако усиление лазерного излучения в виде УКИ связано с принципиальной трудностью. Из-за малой длительности импульса мощность при сравнительно малой энергии импульса достигает такого уровня, при котором происходит повреждение материала активной среды собственным усиленным излучением. Так, при длительности импульса меньше 100 фс энергии импульса около  $10^{-3}$  Дж соответствует мощность свыше  $10^{10}$  Вт. При такой мощности эффект самофокусировки играет вредную роль. Излучение фокусируется внутри материала и вызывает его повреждение.

Для преодоления этого препятствия был изобретен замечательный способ, сущность которого заключается в следующем. Длительность импульса перед его усилением увеличивается во много раз (импульс «растягивается»). При этом мощность уменьшается во столько же раз. После этого «растянутый» импульс можно усиливать до уровня энергии, большего во столько же раз. Затем такой «растянутый» и усиленный импульс снова «сжимается» до первоначальной длительности. В результате мощность усиленного импульса соответственно возрастает.

Конкретно это делается следующим образом. Как указывалось раньше, длительность импульса увеличивается из-за дисперсии, а увеличенную таким образом длительность можно свести к первоначальному значению с помощью дисперсии противоположного знака в устройстве из двух призм. Вот такая операция растяжения и сокращения длительности и применяется в усилительных системах. При этом для повышения величины дисперсии используются не призмы, а дифракционные решетки. Они гораздо сильнее отклоняют лучи с разной длиной волны, и, соответственно, с ними

можно получить гораздо большее растяжение и последующее сжатие.

Схема экспериментальной установки, в которой используется эта техника, показана на рисунке 15. С

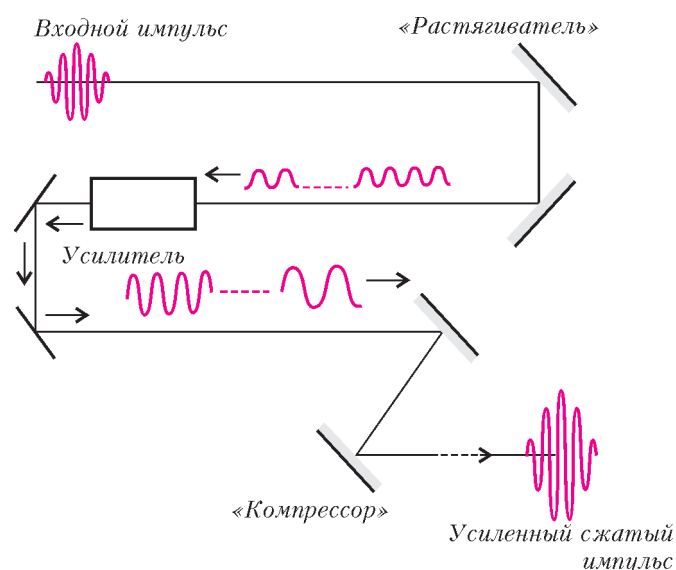


Рис.15. Схема установки для усиления УКИ

помощью пары дифракционных решеток («растягиватель») длительность фемтосекундного импульса увеличивается более чем в  $10^4$  раз. Энергия при этом уменьшается не более чем в 2 раза, но мощность уменьшается почти в  $10^4$  раз. Затем растянутый импульс направляется в усилительную систему, общий коэффициент усиления которой может достигать  $10^6 - 10^7$ . После усиления импульс проходит через вторую пару дифракционных решеток («компрессор»). Они настроены так, что компенсируют дисперсию первой пары, и длительность усиленного импульса снова становится близкой к первоначальной. Именно с помощью таких систем удается получать фемтосекундные импульсы с пиковыми мощностями вплоть до петаваттного уровня.

## Измерение длительности УКИ

Теперь следует рассмотреть вопрос в том, как же измерять длительности столь коротких импульсов. Обычно форму импульса светового излучения регистрируют, используя фотоэлектронные приборы (фотоэлементы, фотосопротивления, фотоумножители), которые преобразуют свет в электрические сигналы,

пропорциональные интенсивности света. Затем электрические сигналы регистрируются с помощью осциллографа. Временное разрешение такой методики (порядка 1 нс) ограничено полосой пропускания электрических цепей.

Для получения лучшего в 1000 раз разрешения, нужного для измерения УКИ, используются они сами. Конкретнее, используется эффект нелинейной оптики – генерация 2-й гармоники лазерного излучения. Это явление заключается в том, что при пропускании лазерного излучения через так называемый *нелинейный кристалл* некоторая часть излучения преобразуется в излучение с длиной волны в 2 раза меньше – 2-я гармоника частоты. При этом интенсивность излучения этой гармоники пропорциональна квадрату интенсивности лазерного излучения, проходящего через кристалл.

Схема устройства для измерения длительности УКИ, основанная на генерации 2-й гармоники, представлена на рисунке 16. Основной частью является хорошо известный в оптике *интерферометр Майкельсона*.

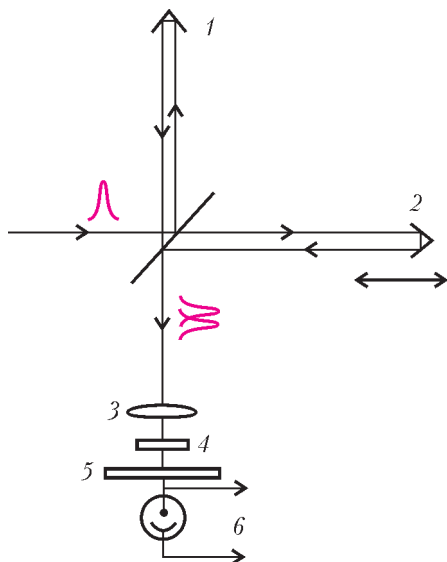


Рис.16. Схема измерения длительности УКИ: 1, 2 – отражатели (один с регулируемым перемещением); 3 – линза; 4 – нелинейный кристалл; 5 – фильтр для выделения 2-й гармоники; 6 – фотоприемник

Пучок света в виде УКИ разделяется полупрозрачным зеркалом на два равных по интенсивности пучка (плечи интерферометра). Каждый из них отражается обратно на полупрозрачное зеркало, причем один из отражателей может перемещаться с соответствующей задержкой света. После отражения от полупрозрачного зеркала пучки обоих плеч сводятся вместе (накладываются друг на друга) и могут интерферировать. Сложенные вместе пучки проходят нелинейный кристалл, где генерируется излучение 2-й гармоники, которое выделяется фильтром и регистрируется.

Посмотрим, как будет изменяться интенсивность регистрируемого сигнала при разных задержках. Пусть эта задержка больше длительности импульса. В этом случае каждый импульс отдельно генерирует излучение 2-й гармоники, и будет регистрироваться сигнал с

интенсивностью  $I_{2\omega} \sim (I_{\omega}^2 + I_{\omega}^2) = 2I_{\omega}^2$ , где  $I_{2\omega}$  – сигнал на второй гармонике, а  $I_{\omega}$  – сигнал на основной частоте. Пусть теперь задержка равна нулю, т.е. импульсы накладываются друг на друга. В этом случае происходит интерференция. При сложении амплитуд в фазе результирующая интенсивность возрастает не в 2, а 4 раза. Следовательно, сигнал второй гармоники  $I_{2\omega} \sim (4I_{\omega})^2 = 16I_{\omega}^2$ . При сложении амплитуд в противофазе интенсивность равна нулю. При задержке, отличной от нуля, но меньшей длительности импульса, будут складываться неравные амплитуды, и сигнал  $I_{2\omega}$  будет принимать промежуточные значения между  $16I_{\omega}^2$  и 0.

Зависимость сигнала 2-й гармоники от задержки одного импульса относительно другого имеет вид, показанный на рисунке 17. При задержках, больших длительности импульса, интерференция отсутствует, и наблюдается постоянный уровень сигнала.

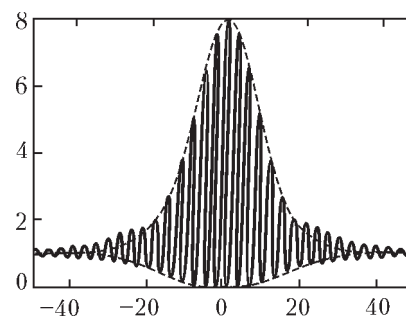


Рис.17. Автокорреляционная функция интенсивности

При полном совпадении сигнал возрастает в 8 раз, причем из-за интерференции наблюдается «изрезанность». Период интерференционной картины определяется длиной волны максимума спектра излучения. Анализ показывает, что ширина профиля зависимости интенсивности от времени задержки – эта зависимость называется *автокорреляционной функцией интенсивности* – однозначно связана с шириной профиля зависимости интенсивности в импульсе от времени (длительность импульса). С хорошей точностью можно считать, что первый профиль в 1,5 раза шире второго.

### Применение лазеров фемтосекундных импульсов

Из всего разнообразия использования в науке и технике лазеров УКИ рассмотрим лишь три примера. Один – основанный на ультракороткой длительности лазерного излучения, другой – на сверхвысокой интенсивности и третий – на уникальной особенности излучения фемтосекундного лазера непрерывного действия.

#### 1) Быстродействующая электроника

Стремление к миниатюризации и повышению быстродействия электронных схем приводит к интегральным схемам. При этом становится трудно исследовать прохождение коротких электрических сигналов по элементам схемы с помощью электронного осциллографа из-за искажений сигналов в проводах, подсоединяемых к схеме. Лазеры УКИ позволили успешно реализовать схему бесконтактного осциллографирования электрических сигналов с разрешением, лучшим чем 1 пс.

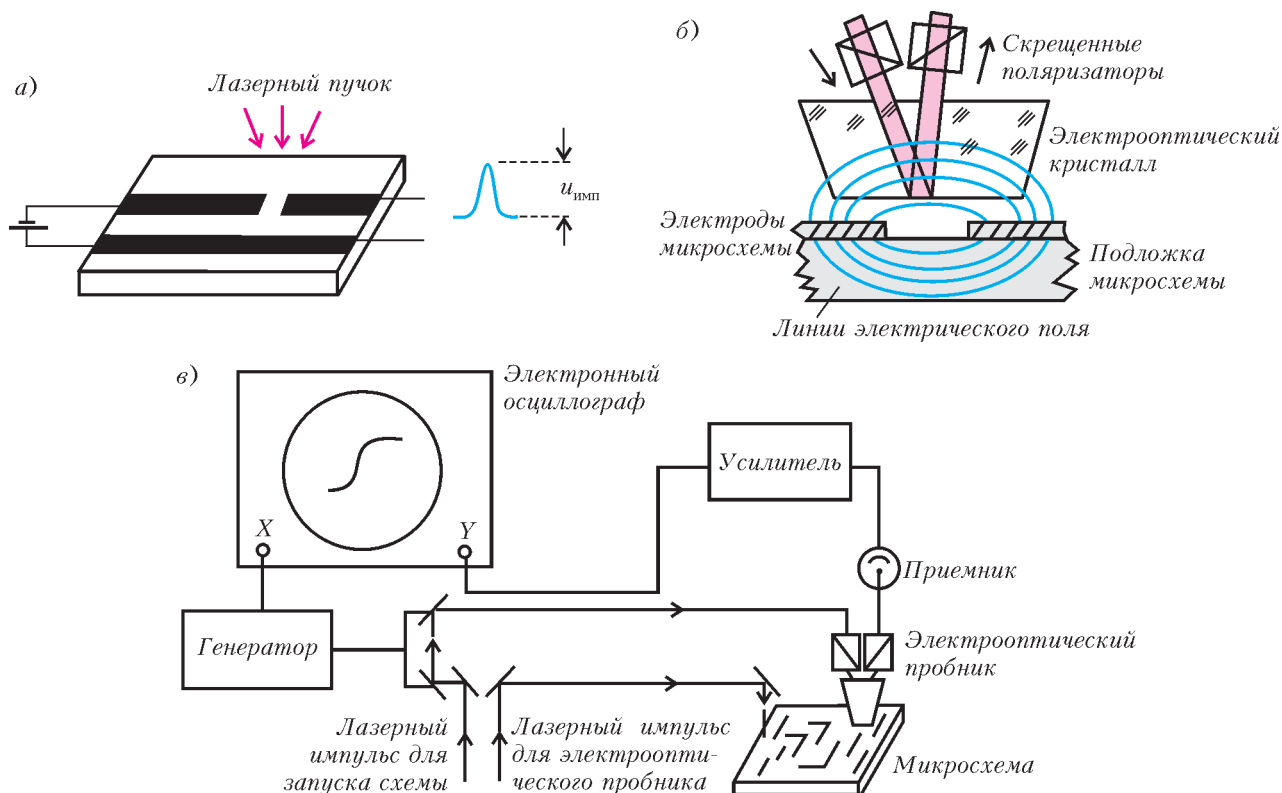


Рис. 18. Оптоэлектроника с использованием лазерных УКИ: а) оптоэлектронный ключ; б) принцип электрооптического стробирования электрического сигнала; в) оптоэлектронный осциллограф

Основная идея заключается в том, что один УКИ запускает электронную схему, а с помощью второго УКИ, задержанного на определенный интервал времени, измеряется электрический сигнал в нужной точке схемы. Существенной деталью является *оптоэлектронный ключ*, с помощью которого запускается исследуемая схема. Основой служит пластинка из полупроводника с высоким удельным сопротивлением, на которой нанесены проводящие металлические полосы – электроды (рис.18,а). Верхняя полоска имеет разрез в виде щели, которая разрывает электрическую цепь. К концам электродов можно подключить источник напряжения. При освещении полупроводника через щель лазерным излучением в виде УКИ с определенной длиной волны в поверхностном слое полупроводника за время действия облучения возникает большое число носителей тока (*электронно-дырочных пар*), и полупроводник становится проводящим. Таким образом осуществляется быстрое, равное длительности УКИ, замыкание электрической цепи. В отсутствие света происходит самопроизвольное и достаточно быстрое уничтожение носителей (рекомбинация электронов и дырок), а значит, и восстановление высокого сопротивления за время, меньшее 1 пс. Получается, что можно быстро включить и выключить напряжение, т.е. сформировать ультракороткий электрический импульс, запускающий интегральную схему.

Регистрация электрических импульсов проводится методом *электрооптического стробирования* с помощью *электрооптического пробника* (рис.18,б). Этот

пробник основан на эффекте двойного лучепреломления в электрооптическом кристалле при приложении к нему электрического поля. Если такой кристалл помещен между скрещенными поляризаторами, то пропускание света через них будет зависеть от напряженности электрического поля. При прохождении по цепи электрического импульса вокруг проводника возникает быстро изменяющееся электрическое поле. Оно проникает в близко расположенный кристалл, и по пропусканию света через скрещенные поляризаторы можно определить величину электрического поля. Если это свет в виде УКИ, то электрическое поле регистрируется лишь в момент прохождения УКИ через кристалл.

Изменяя величину задержки между запуском исследуемой электронной схемы и сигналом наведенного двойного лучепреломления, можно измерить величину электрического сигнала в зависимости от времени задержки. Таким образом получается осциллограмма электрического сигнала, распространяющегося в интегральной схеме.

На основе такого принципа был создан *стробоскопический оптоэлектронный осциллограф*. Его принципиальная схема изображена на рисунке 18,в. Использовался очень маленький электрооптический кристалл, на нижнюю грань которого нанесено диэлектрическое отражающее покрытие. Так как запуск исследуемой схемы и регистрация сигнала осуществляются одним и тем же лазерным УКИ, исключается «дрожание» сигнала относительно запуска. Это позволяет достаточно точно регистрировать электрические сигналы.

## 2) Генерация импульсов рентгеновского излучения аттосекундной длительности

Достигнутая длительность импульса 5 фс близка к периоду световой волны – длине волны 0,8 мкм соответствует период 2,7 фс. Чтобы получить длительность импульса излучения еще меньше, нужно, чтобы период и длина волны были короче. С помощью лазерного излучения в виде импульсов в несколько периодов и с интенсивностями, достигающими  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, удается получать вспышки уже не оптического, а рентгеновского излучения с длинами волн до 3 нм и с длительностью до 200 ас (1 аттосекунда =  $10^{-18}$  секунд). С этой целью лазерное излучение фокусируется в одноатомный газ (гелий или криптон), атомы которого сильно удерживают электроны. На научном языке это означает, что атомы имеют высокий потенциал ионизации (напряжение электрического поля, при котором электрон отрывается от атома).

Физическая картина взаимодействия электромагнитной волны с атомом в течение ее периода с максимальной амплитудой представлена на рисунке 19. Максимальная напряженность электрического поля световой

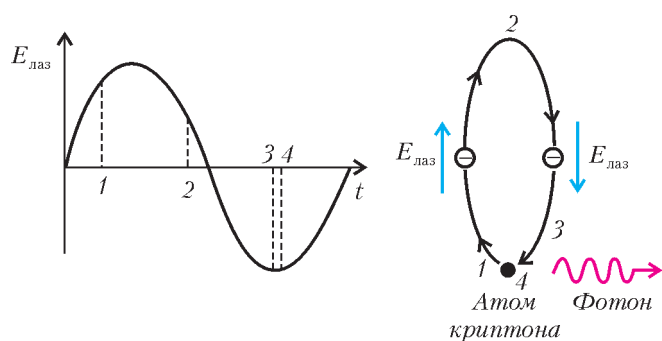


Рис.19. Взаимодействие световой волны сверхмощного излучения фемтосекундного лазера с атомом криптона

волны превышает ту, что удерживает электрон в атоме. В момент 1 электрон отрывается от атома (происходит ионизация полем световой волны) и начинает ускоряться. Но прежде чем он удалится на значительное расстояние от своего атома, превратившегося в ион, поле в волне изменяет знак на противоположный (момент 2). Теперь нарастающее электрическое поле ускоряет электрон обратно к иону, причем на электрон действуют как напряженность поля световой волны, так и кулоновское притяжение положительно заряженного иона. В результате ускоренный электрон ударяет ион и вызывает испускание фотона, подобно тому как это происходит в рентгеновской трубке. Максимальная энергия фотона равна кинетической энергии электрона в момент удара и может достигать, как показывают расчеты, 300 эВ, что соответствует длине волны фотона 3 нм. В область фокуса лазерного излучения попадает большое число атомов, поэтому происходит согласованное испускание многих фотонов. Сам процесс испускания при этом продолжается доли периода световой волны. Таким образом получается аттосекундная длительность вспышки и когерентность испускаемого излучения.

## 3) Прецизионное измерение частоты световой волны (оптические часы)

До сравнительно недавнего времени лазеры, генерирующие ультракороткие импульсы и имеющие широкий спектр, соответствующий длительности импульса, и лазеры, генерирующие высоко монохроматичное излучение с очень узким спектром, рассматривались как взаимно исключаящие системы. Лазеры УКИ предназначались для исследований, связанных с предельно короткими интервалами времени, а лазеры со сверхузким спектром – для прецизионного измерения текущего времени в схемах сверхточных часов. С появлением фемтосекундных лазеров, работающих в непрерывном режиме, произошло удивительное слияние этих, казалось бы, совершенно различных направлений.

От глубокой древности до наших дней человек решает проблему измерения времени. В результате создаются все более точные часы и способы измерения все более коротких интервалов времени. Для измерения текущего времени используется стабильный периодический процесс – тогда измерение времени сводится к подсчету числа периодов за измеряемый интервал. Для того чтобы определить точность хода часов, нужно сравнить их с эталоном. Это означает, что нужно пересчитать число периодов эталона и сравниваемых часов, пока не получится различие в один период. Величина, обратная числу периодов, и будет определять точность. Очевидно, что чем выше частота, тем меньший интервал времени потребуется для такого сравнения. Поэтому стремятся использовать периодический процесс не только со стабильной, но и с высокой частотой.

С давних пор в качестве стабильного периодического процесса принимается вращение Земли. Но его период слишком велик, и поэтому частота вращения Земли сопоставляется с более высокой частотой колебаний маятника – он стабилизируется по частоте вращения Земли. Затем на смену часов с маятником пришли кварцевые часы со значительно более высокой и стабильной частотой.

Успехи в спектроскопии и квантовой теории показали, что колебания в спектрах атомов и молекул могут быть использованы как стандарты частоты. В качестве такого стандарта была выбрана линия спектра (*сверхтонкая структура*) атома цезия  $\text{Cs}^{133}$ , частота которой равна 9192631770 Гц. Она принята в качестве международного эталона секунды. Эта частота попадает в диапазон, в котором измерения частоты производятся методами радиоэлектроники.

Достижения в области лазеров позволили получить чрезвычайно узкие линии – вплоть до значения  $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-18}$  на частоте  $10^{15}$  Гц, что, в принципе, позволило бы построить сверхточные часы. Высокая оптическая частота является несомненным преимуществом. Так, сравнение двух цезиевых часов (частота порядка  $10^{10}$  Гц) с точностью на уровне  $10^{-15}$  требует нескольких дней, сравнение же двух оптических часов (частота порядка  $10^{14} - 10^{15}$ ) с таким же уровнем точности занимает всего лишь несколько секунд. Однако, для того чтобы делать часы на основе лазерных

волн, необходимо измерять их частоты, т.е. сопоставлять их с эталоном секунды. Но в оптике, в отличие от радиофизики и электроники, не существует прямых методов измерения частоты, там измеряют длины волн. Казалось бы, нет проблемы определить частоту, зная длину волны, поскольку  $\nu = c/\lambda$ , но скорость света  $c$  сама должна быть измерена с соответствующей точностью. Проблема точного измерения времени как раз и связана со стремлением более точного измерения  $c$ .

Лазеры фемтосекундных импульсов дали замечательный способ сопоставления частоты лазерной сверхузкой линии с частотой цезиевого стандарта. Обсудим сущность этого способа на примере лазера, работающего в непрерывном режиме, т.е. испускающего периодическую последовательность импульсов (рис. 20,а). Как было показано, эта последовательность получается в результате сложения множества волн с одинаковыми интервалами частот между ними. Иными словами, спектр такого излучения представляет «гребенку» эквидистантно расположенных дискретных частот (рис.20,б). Ширина всего спектра  $\Delta\nu$  определяется длительностью импульса:  $\Delta\nu \sim 1/\tau$ , а ин-

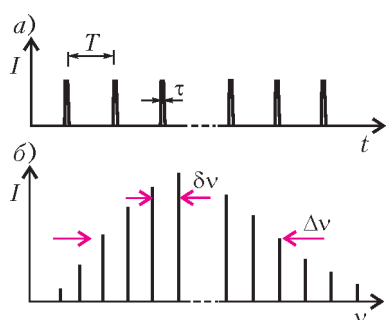


Рис.20. Временная (а) и спектральная (б) характеристики фемтосекундного лазера непрерывного действия

тервал между «зубьями» гребенки  $\delta\nu$  – их периодом в последовательности:  $\delta\nu = 1/T$ . Как мы видели, этот период задается расстоянием между зеркалами резонатора, поэтому путем перемещения одного из зеркал можно регулировать и стабилизировать частотный интервал гребенки. Частота этого интервала лежит в области долей и единиц гигагерца, и ее можно сопоставить с частотой эталона секунды. Таким образом, излучение фемтосекундного лазера непрерывного действия дает своеобразную «линейку» оптических частот «делениями», значения которых можно точно определить по отношению к стандарту частоты.

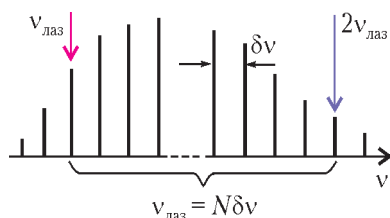


Рис.21. Схема измерения частоты лазерной линии путем пересчета делений «линейки» оптических частот

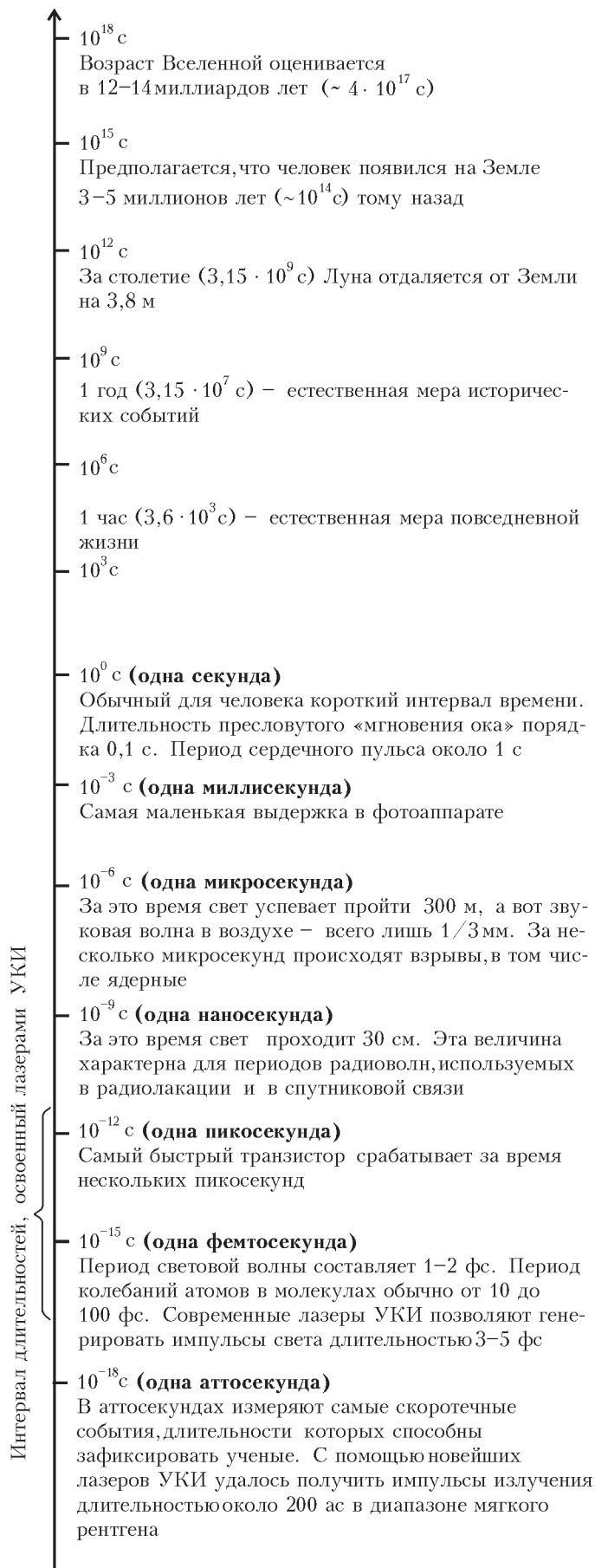


Рис.22. Шкала времен

С помощью такой линейки можно измерить частоту узкой лазерной линии  $\nu_{\text{лаз}}$ . Пусть эта частота попадает на красный край гребенки, а ее 2-я гармоника – на фиолетовый край, как показано на рисунке 21. Тогда при соответствующей настройке длины резонатора фемтосекундного лазера выполняется соотношение  $2\nu_{\text{лаз}} - \nu_{\text{лаз}} = \nu_{\text{лаз}} = N\delta\nu$ , и измерение лазерной частоты сводится к подсчету числа «зубьев» гребенки. Этот принцип, который, как было указано ранее, отмечен Нобелевской премией, лежит в основе создания сверхточных оптических часов.

Подводя итоги, отметим, что с помощью лазеров можно исследовать исключительно малые промежутки времени и измерять текущее время с чрезвычайно высокой точностью. Согласно современным воззрениям, возраст нашей Вселенной около 20 миллиардов лет. Если бы сверхточные оптические часы, которые создаются в настоящее время, были запущены в момент «рождения» Вселенной, показания их расходились бы не более чем на несколько секунд.

Отметим, что сверхточные часы (с точностью порядка  $10^{-14} - 10^{-16}$ ) являются необходимой частью

навигационной системы ГЛОНАСС, которая позволяет определять координаты с точностью до долей метра.

На рисунке 22 показана шкала времен, на которой отмечены характерные события и указана область, измерения в которой проводятся с помощью лазеров.

### Заключение

Работа по лазерам и их применениям интенсивно развивается. Важнейшей частью этой работы является стремление усовершенствовать сами лазеры, сделать их более эффективными и доступными. Это, в свою очередь, будет способствовать развитию различных научных и технических применений. В области фундаментальной науки рассматриваются такие амбициозные проекты, как обнаружение гравитационных волн или выяснение того, не изменяются ли мировые физические константы с течением времени (гипотеза Дирака).

Любознательные читатели, желающие посвятить себя науке и технике, имеют шанс принять участие в этой увлекательной и перспективной деятельности.

## КВАНТ + DVD

**Мы рады сообщить нашим читателям, что вышел в свет электронный архив журнала «Квант» с 1970 по 2006 год.**

**Материалы, опубликованные в журнале «Квант» за многие годы его существования, бесценны. И это не пустые слова. Не одно поколение «прошедших» через «Квант» молодых людей, как из числа занявших сегодня достойное место в мировой науке, так и пополнивших лучшие ряды сегодняшнего учительства, с благодарностью вспоминают журнал «Квант», который в их жизни сыграл роль путеводной звезды, определил выбор в пользу фундаментальных знаний.**

**Сегодня в нашем обществе явно прослеживается тенденция возрождения истинных ценностей, витает в воздухе потребность в восстановлении реальных приоритетов в образовании, пробуждается интерес к фундаментальным знаниям. Поэтому мы решили на базе громадного позитивного опыта, накопленного творческим коллективом журнала «Квант», создать адекватный современному состоянию и тенденциям развития информационных технологий научно-образовательный продукт. Мы уверены, что он, во-первых, откроет всем желающим путь к уникальному архиву журнала «Квант», а во-вторых, для кого-то сыграет решающую роль в выборе будущей профессии.**

*Диск можно приобрести в редакции журнала «Квант».*

*Наши координаты – на последней странице журнала.*

*Пишите, звоните. Мы вас ждем.*