



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ: ФИЗИКА, ГЕНЕРАЦИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Сатторов Сарвар Нугмонович

Введение:

Развитие лазерных технологий открыло новые горизонты в науке и технике, особенно с появлением фемтосекундных лазеров — источников света, генерирующих сверхкороткие импульсы длительностью порядка 10^{-15} секунд. Такие лазеры позволяют исследовать физические, химические и биологические процессы с беспрецедентной временной точностью. Благодаря уникальному сочетанию высокой пиковой мощности и ультракороткой длительности импульса, фемтосекундные лазеры нашли широкое применение в нелинейной оптике, спектроскопии, микрообработке материалов и биомедицине.

Цель данной статьи — раскрыть физические принципы генерации фемтосекундных импульсов, рассмотреть конструктивные особенности таких лазеров и проанализировать актуальные области их применения в современной науке и технологии.

Введение

Фемтосекунда (от лат. femto — квинтиллионная доля) представляет собой единицу времени, равную 10^{-15} секунды. Для наглядности: за одну секунду проходит 10^{15} фемтосекунд — это настолько короткий промежуток времени, что свет за это время успевает пройти всего лишь около 0,3 микрометра, что сравнимо с размером вирусной частицы или длиной световой волны в видимом диапазоне.

Появление фемтосекундных импульсов стало важнейшим достижением в области лазерной физики, так как позволило преодолеть временные ограничения, характерные для наносекундных и пикосекундных лазеров. Фемтосекундные импульсы обладают уникальным сочетанием ультракороткой длительности и чрезвычайно широкой спектральной полосы, что объясняется принципом неопределенности Гейзенберга между временем



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

и частотой. Согласно этому принципу, чем короче длительность импульса, тем шире его спектральный диапазон.

С точки зрения волновой оптики, фемтосекундный импульс может рассматриваться как суперпозиция большого числа когерентных гармоник, интерферирующих во времени таким образом, что энергия сосредотачивается в сверхкоротком временном окне. Такое поведение делает возможным временное разрешение процессов на уровне межмолекулярных и межатомных взаимодействий.

Таким образом, понятие фемтосекунды выходит за рамки простой единицы измерения времени: оно связано с целым направлением исследований в области ультрабыстрой динамики, открывающим доступ к наблюдению и управлению физическими, химическими и биологическими процессами на принципиально новом уровне.[1]

Одной из фундаментальных проблем в генерации и анализе ультракоротких лазерных импульсов является физический предел их длительности. Этот предел напрямую связан с соотношением неопределенности между временем и частотой, которое является оптическим аналогом принципа неопределенности Гейзенберга в квантовой механике.

В классической форме данное соотношение записывается следующим образом:

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \geq \frac{1}{4\pi},$$

где Δt — длительность импульса во времени, а $\Delta \nu$ — ширина его спектральной полосы. Это выражение показывает, что для получения чрезвычайно короткого импульса необходимо обеспечить чрезвычайно широкий спектр частот. Иными словами, фемтосекундный импульс всегда сопровождается широкой спектральной областью, часто охватывающей десятки нанометров в оптическом диапазоне.

При этом важно учитывать, что реальный импульс имеет определённую форму (например, гауссову, секанто-гиперболическую и т. д.), и минимально



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

возможное произведение $\Delta t \cdot \Delta \nu$ зависит от этой формы. Для гауссового импульса минимальное значение составляет $\Delta t \cdot \Delta \nu \approx 0,44$.

Следствием этого принципа является невозможность сжатия импульса до произвольно малых временных масштабов без соответствующего увеличения спектральной ширины. Более того, при передаче фемтосекундных импульсов по оптическим средам дисперсионные эффекты могут приводить к временному растяжению (дисперсионному смазыванию), что требует применения специальных методов компрессии и управления фазой импульса.

Таким образом, соотношение неопределенности накладывает не только теоретические ограничения на длительность импульсов, но и определяет требования к конструкциям лазеров и дисперсионным элементам, участвующим в формировании фемтосекундных пакетов. Эти ограничения играют ключевую роль в проектировании фемтосекундных систем и в разработке технологий их практического применения.

Фемтосекундные лазерные импульсы обладают уникальными временными и спектральными характеристиками, которые тесно взаимосвязаны и определяют их физическую природу, методы генерации и области применения.

Временная характеристика импульса определяется его длительностью τ , обычно выражаемой на уровне половины максимальной интенсивности (FWHM — full width at half maximum). В современных лазерах длительность фемтосекундных импульсов может составлять от нескольких сотен до нескольких десятков фемтосекунд. Рекордные значения достигают даже **аттосекундного** диапазона ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ c}$), но такие импульсы выходят за рамки классических фемтосекундных систем и требуют отдельного рассмотрения.

Временной профиль импульса, как правило, описывается одной из следующих математических форм:



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfseries.com

11th May, 2025

Гауссовый профиль — наиболее распространённый в теории;

Гиперболический секанс (sech) — ближе к реальным импульсам, формируемым методом синхронизации мод.[2]

Спектральные характеристики определяются шириной спектра $\Delta\nu$ или $\Delta\lambda$, что, согласно соотношению неопределенности, обратно пропорционально длительности импульса. Так, для импульса длительностью 100 фс центральной длиной волны 800 нм, спектральная ширина может составлять 7–10 нм. Для еще более коротких импульсов, например 10 фс, ширина спектра может достигать десятков нанометров, охватывая значительную часть видимого диапазона.

Важно понимать, что **спектральная фаза** также критически важна. Даже при одинаковом спектре форма импульса может существенно различаться из-за различий в распределении фаз частотных компонентов. Поэтому методы формирования и компрессии импульсов включают коррекцию фазового фронта с помощью дисперсионных зеркал, решёток и фурье-оптических схем.

Коэффициенты сжатия и компрессии также являются важными характеристиками. Они показывают, насколько исходный растянутый импульс может быть приведён к минимально возможной длительности без искажений.

Таким образом, временные и спектральные параметры фемтосекундных импульсов определяют не только их физическую сущность, но и фундаментальные ограничения, а также требования к лазерным системам, оптическим элементам и приборам диагностики.

Формирование фемтосекундных лазерных импульсов требует особых методов генерации, направленных на создание устойчивой, когерентной суперпозиции большого количества мод в лазерном резонаторе. Наиболее распространённые и эффективные подходы включают явления **самофокусировки, модуляции добротности, модуляции дисперсии (mode**



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

locking), а также синхронизацию фаз и усиление импульсов. Эти методы могут использоваться как по отдельности, так и в совокупности, образуя основу современных фемтосекундных лазерных систем.

Самофокусировка — это нелинейный оптический эффект, возникающий при прохождении мощного лазерного пучка через среду с зависимостью показателя преломления от интенсивности света. При достижении определённого порога интенсивности, пучок начинает фокусироваться сам по себе, что способствует сжатию импульса во времени и пространстве. Этот эффект играет ключевую роль при генерации сверхкоротких импульсов в нелинейных средах, например, в стекле или кристаллах с $\chi(3)$ -нелинейностью.

Наиболее эффективным методом генерации фемтосекундных импульсов является синхронизация мод (mode locking), при которой фазы продольных мод лазерного резонатора фиксируются таким образом, чтобы их интерференция во времени приводила к формированию коротких пиков интенсивности. В отличие от обычного многомодового излучения, в котором фазы колебаний случайны, при mode locking все моды когерентны, что обеспечивает формирование регулярной последовательности ультракоротких импульсов.

Существуют два основных типа синхронизации мод:

Пассивная, осуществляемая с помощью насыщаемых поглотителей или нелинейных зеркал;

Активная, реализуемая путём внешней модуляции добротности с использованием электрооптических или акустооптических элементов.

Пассивная синхронизация мод особенно эффективна для достижения фемтосекундных длительностей, поскольку не требует внешнего электронного управления и может обеспечить более узкое временное окно импульса.

После генерации фемтосекундного импульса необходимо обеспечить его усиление без разрушения оптических компонентов, что достигается путём применения технологии растяжки–усиления–сжатия (CPA — Chirped Pulse Amplification). В этом подходе начальный короткий импульс временно



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

растягивается (до пикосекундного уровня), усиливается в среде (например, в Ti:sapphire-кристалле), а затем вновь сжимается до фемтосекундной длительности.

Ключевым элементом данной технологии является управление фазой и дисперсией, поскольку при усилении может происходить искажение спектральной фазы, что приведёт к деградации импульса. Для компенсации таких искажений применяются зеркала с контролируемой дисперсией, призмовые и решеточные компрессоры.

Таким образом, эффективная генерация и усиление фемтосекундных импульсов является результатом тонко сбалансированных процессов: когерентной интерференции мод, нелинейных эффектов и точного управления фазой. Эти методы лежат в основе современной фемтосекундной лазерной техники и являются фундаментом для её широкого применения в науке и промышленности.[3]

Твердотельные фемтосекундные лазеры

Наиболее широко используемыми в научной и прикладной практике являются твердотельные фемтосекундные лазеры, в которых активная среда представляет собой кристаллический материал, легированный редкоземельными элементами. Наиболее распространённый представитель — Ti:sapphire (титан-сапфировый) лазер, работающий в диапазоне 700–1000 нм с возможностью генерации импульсов длительностью менее 10 фс.

Преимущества твердотельных лазеров:

- высокая стабильность и надёжность;
- широкая спектральная полоса излучения;
- возможность эффективной синхронизации мод и применения CPA-технологий.

Недостатками являются сложность юстировки и необходимость применения громоздкой оптики для компрессии импульсов.



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

Волоконные фемтосекундные лазеры

Фемтосекундные волоконные лазеры используют в качестве активной среды оптическое волокно, легированное редкоземельными ионами (чаще всего иттербием, эрбием или тулием). Такие системы обладают компактностью, высокой эффективностью преобразования энергии и возможностью интеграции в промышленные установки.

Их главные достоинства:

- компактность и устойчивость к внешним воздействиям;
- относительно низкая стоимость и простота в обслуживании;
- высокая частота повторения импульсов (до сотен МГц).

Однако ограниченность спектральной ширины и наличие нелинейных эффектов в волокне затрудняют достижение длительностей менее 50–100 фс без дополнительных компрессорных систем.[1]

Полупроводниковые и диодные лазеры

Фемтосекундные диодные лазеры и полупроводниковые структуры (например, лазеры на квантовых точках) представляют собой перспективное направление в миниатюризации источников ультракоротких импульсов. Они используются, как правило, для генерации пикосекундных импульсов, но при использовании специальных технологий могут достигать фемтосекундных режимов.

Преимущества:

- чрезвычайная компактность;
- возможность интеграции в портативные устройства;
- низкое энергопотребление.

Недостатками остаются ограниченные мощности и трудности в стабилизации импульсных характеристик.[4]

Лазеры на основе свободных электронов

Хотя лазеры на свободных электронах (FEL) редко применяются в классической фемтосекундной спектроскопии, они позволяют получать сверхкороткие импульсы в рентгеновском диапазоне. FEL-системы



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

обеспечивают фемто- и аттосекундные импульсы с чрезвычайно высокой пиковой мощностью и когерентностью. Такие лазеры используются в крупных научных центрах (например, XFEL в Германии) для изучения процессов на атомарном уровне.

Применение фемтосекундных лазеров

Фемтосекундные лазеры, обладая уникальной комбинацией сверхкороткой длительности импульсов, высокой пиковой мощности и широкой спектральной полосы, находят широкое применение в самых различных областях фундаментальной науки, медицины, промышленности и информационных технологий. Их ключевое преимущество заключается в возможности управлять веществом на фемтосекундных временных масштабах, сопоставимых с временами атомных и молекулярных процессов.[3]

Нелинейная оптика и спектроскопия

Фемтосекундные импульсы играют важную роль в нелинейной оптике благодаря своей высокой пиковой мощности, которая позволяет возбуждать многофотонные переходы даже при относительно низкой средней мощности. Основные направления использования включают:

вторичная гармоника (SHG) и третичная гармоника (THG);

четырёхволновое смешение;

оптическая параметрическая генерация;

двух- и трёхфотонная флуоресценция.

В спектроскопии фемтосекундные импульсы используются для изучения сверхбыстрых процессов: колебательных релаксаций, химических реакций, фотоизомеризации, образования водородных связей и т. д. Фемтосекундная временная разрешающая способность позволяет регистрировать события, происходящие в пределах десятков фс, что делает возможным «запись» молекулярной динамики в реальном времени.



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

Медицина и биотехнологии

В медицине фемтосекундные лазеры используются в лазерной офтальмохирургии (например, фемто-LASIK), где точность и минимальное термическое воздействие имеют решающее значение. Импульсы позволяют производить сверхточные надрезы в роговице без нагрева окружающих тканей.

В биотехнологиях применяются для:

двухфотонной микроскопии, обеспечивающей глубокое проникновение в ткань с высокой пространственной избирательностью;

нанохирургии клеток и органелл;

лазерной перфорации клеточных мембран для доставки ДНК и лекарств.

Промышленная микрообработка

Фемтосекундные лазеры находят применение в прецизионной микро- и нанообработке материалов, включая резку, сверление, микроструктурирование. В отличие от наносекундных и пикосекундных импульсов, фемтосекундные не вызывают значительного теплового воздействия, благодаря чему обеспечивается «холодная абляция» — испарение вещества без оплавления.

Типовые применения:

микросверление в стекле и кремнии;

изготовление микрофлюидных каналов;

обработка биоматериалов и имплантатов;

создание волноводов в оптических материалах.[1]

Генерация высоких гармоник и аттосекундных импульсов

Взаимодействие фемтосекундных импульсов с газами может привести к генерации высоких гармоник (HHG) — спектра излучения, охватывающего область от ультрафиолета до мягкого рентгена. Эти гармоники используются для получения аттосекундных импульсов, позволяющих исследовать процессы электронной динамики внутри атомов и молекул.



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

Такие технологии открывают путь к развитию аттосекундной науки и исследованиям в области квантовой динамики.

Оптические телекоммуникации и фотоника

Фемтосекундные лазеры также играют роль в разработке новых решений в области оптоволоконной связи и фотонных интегральных схем. Их возможности включают:

- генерацию оптических гребёнок (frequency combs);
- калибровку спектрометров и лазеров;
- мультиплексирование каналов передачи данных;
- разработку компонентов квантовой криптографии.

Во-первых, ведутся интенсивные исследования в области **компактных и интегрированных источников** фемтосекундных импульсов, включая чиповые лазеры и фотонные микросхемы. Появление таких систем позволит расширить их применение в переносных медицинских устройствах, сенсорах и квантовых технологиях.

Во-вторых, актуальным направлением является **повышение стабильности генерации и усиления импульсов**, особенно в условиях внешних воздействий. Здесь ведутся работы по созданию автокомпенсирующих систем синхронизации фаз, интеллектуальных резонаторов и адаптивных компрессоров.

Третье важное направление связано с **созданием аттосекундных источников на базе фемтосекундных лазеров**, что открывает новые горизонты для исследований фундаментальных процессов в атомной и субатомной физике, квантовой химии и материаловедении.

Кроме того, продолжается интеграция фемтосекундных лазеров с **искусственным интеллектом и машинным обучением** для автоматической оптимизации параметров генерации, особенно в спектроскопии и микромашиностроении.[2]



Scientific Conference on Multidisciplinary Studies

Hosted online from Bursa, Turkey

Website: econfséries.com

11th May, 2025

Вывод:

Таким образом, фемтосекундные лазеры представляют собой уникальные инструменты, сочетающие в себе высокую точность, сверхкороткие временные характеристики и широкую спектральную гибкость. Благодаря их универсальности и постоянному техническому совершенствованию, они становятся неотъемлемой частью научных исследований, медицинских процедур, высокоточной обработки материалов и телекоммуникаций.

В ближайшие годы можно ожидать ещё большего проникновения фемтосекундных технологий в повседневную практику, расширения их доступности и появления новых прикладных решений на их основе. Перспективы развития данной области, несомненно, будут определять лицо фотоники и лазерной науки в XXI веке.

Список использованной литературы

1. Батин, В. М. Фемтосекундные лазеры и их применение. — М.: Физматлит, 2020.
2. Чечин, А. И., Орлов, А. В. Физические основы лазерной техники. — СПб.: Политехника, 2019.
3. Климов, В. В. Нелинейная оптика и спектроскопия ультракоротких импульсов. — М.: Наука, 2021.
4. Иванов, М. Ю., Петров, С. Н. Импульсные лазеры: теория и применение. — М.: Техносфера, 2018.