

БИБЛИОГРАФИЯ

535.89(049 3)

УЛЬТРАКОРОТКИЕ СВЕТОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ
(Пикосекундная техника и ее применения)

Ultrashort Light Pulses: Picosecond Technique and Applications /Auston D. N., Bradley D. J., Campillo A. J., Eiseenthal K. B., Ippen E. P., von der Linde D., Shank C. V., Shapiro S. L./Ed. S. L. Shapiro.— Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1977.—390 p.— (Topics in Applied Physics. V. 18).

XVIII том тематического сборника обзорных статей из серии «Проблемы прикладной физики» посвящен новому перспективному направлению в физике быстропротекающих процессов — пикосекундной технике. Начало эры пикосекундных исследований ($1 \text{ псек} = 10^{-12} \text{ сек}$) связывают с созданием в 1965 г. рубинового (H. W. Mocker, R. J. Collins) и в 1966 г. неодимового (A. J. De Maria et al.) лазеров с модуляцией добротности пассивным фильтром на нелинейном поглотителе. Такие лазеры в режиме самосинхронизации мод генерируют излучение в виде пуга ультракоротких импульсов. К настоящему времени методы формирования пикосекундных импульсов развиты настолько, что практически во всем видимом, ближнем инфракрасном, ультрафиолетовом и мягком рентгеновском спектральных диапазонах генерируется излучение с минимальной длительностью от десятка до долей пикосекунды.

Существенный прогресс достигнут и в области пикосекундных измерений. Так, многочисленные автокорреляционные методы позволяют с точностью до $0,1 - 0,3 \text{ псек}$ измерять длительность и форму повторяющихся ультракоротких импульсов излучения. Прямые методы сверхскоростной электронно-оптической регистрации обеспечивают разрешение до $0,5 \text{ псек}$ в видимом и инфракрасном и $5-10 \text{ псек}$ — в мягком рентгеновском ($\sim 1 \text{ кэв}$) диапазонах при изучении однократных неповторяющихся явлений.

Взаимно обусловленное, обогащающее друг друга развитие методов генерирования и способов измерения ультракоротких импульсов излучения приближается к своему пределу, ограниченному в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга величиной 1 фсек (10^{-15} сек) в оптическом и 1 асек (10^{-18} сек) в рентгеновском ($\sim 1 \text{ кэв}$) диапазонах. Еще до приближения к этому пределу такие эффекты, как дисперсия, самофокусировка, частотная и фазовая модуляция, будут ограничивать минимально достижимую длительность оптических импульсов. При генерации ультракоротких рентгеновских импульсов плазмой их минимальная длительность будет предопределяться скоростью разлета плазмы и длительностью инициирующего лазерного излучения. Небеспредельны по своим возможностям и измерительные методы. Так, быстроедействие нелинейных оптических методов измерений определяется релаксационными процессами в атомах и молекулах и ограничивается диапазоном $10 \text{ псек} - 10 \text{ фсек}$. Временное разрешение электронно-оптических методов регистрации ограничивается хроматическими aberrациями электронно-оптических линз на уровне $100 - 10 \text{ фсек}$ в оптическом и 1 псек — в рентгеновском диапазонах. Все это говорит о том, что генерирование и измерение пикосекундных импульсов излучения представляет собой разностороннюю проблему, связанную с решением сложных физических задач.

До последнего времени основной материал по пикосекундным исследованиям содержался главным образом в оригинальных журнальных статьях и докладах на конференциях и симпозиумах. Это ограничивало круг читателей, потенциально заинтересованных в достижениях и возможных применениях пикосекундной техники. Рецензируемый сборник является первой серьезной попыткой обращения к широкой читательской аудитории. В нем в форме обзорных статей признанных экспертов достаточно полно освещается современное состояние вопроса и излагаются различные аспекты пикосекундных исследований.

Книга открывается вводной статьей редактора сборника S. L. Shapiro, в которой автор на основе работ, проводящихся в лаборатории «Белл — телефон» и краткого экскурса в историю вопроса пытается проследить за развитием техники генерирования и измерения ультракоротких импульсов света.

Первые успехи в этой области относятся к середине прошлого века, когда на базе работ Витстоуна и Фуко по развертке изображений вращающимся зеркалом было зарегистрировано свечение коротких искровых разрядов с временным разрешением $\sim 10^{-6}$ сек.

В конце прошлого столетия Абрагам и Лемуа, используя открытый несколько ранее эффект Керра, построили прибор, способный измерять промежутки времени с точностью до 10^{-9} сек. Этот временной диапазон до сих пор интенсивно осваивается осциллографическими, оптико-механическими, электронно-оптическими и оптико-электронными методами. С изобретением лазеров, работающих в режиме синхронизации мод, возникла задача определения временного профиля интенсивности импульсов, имеющих длительность единицы и доли пикосекунды. Пригодными здесь оказались лишь методы нелинейной оптики и сверхскоростной электронно-оптической регистрации. Основные достижения за прошедшее десятилетие как в области генерирования и измерения, так и применения пикосекундных лазерных импульсов, рассматриваются в последующих статьях сборника.

D. Bradley проводит теоретический и экспериментальный анализ лазерных систем, генерирующих импульсы излучения длительностью ≤ 10 псек. К этим системам относятся рубиновые (≥ 10 псек) и неодимовые (≥ 2 псек) лазеры с модуляцией добротности пассивным фильтром, обеспечивающим режим самосинхронизации мод; импульсные лазеры на красителях с самосинхронизацией мод и накачкой от импульсной лампы (≥ 2 псек) или от принудительного синхронного излучения внешнего лазера (≥ 2 псек); непрерывные лазеры на красителях с самосинхронизацией мод пассивным фильтром ($\geq 0,2$ псек). Автор анализирует оптические схемы пикосекундных лазеров, описывает оптические свойства генерируемого ими излучения и рассматривает флуктуационную модель развития пикосекундных импульсов из спонтанного шума.

Энергия лазерных пикосекундных импульсов не превышает 10^{-10} Дж (300 эВ) для непрерывных лазеров на красителях, $5 \cdot 10^{-5}$ Дж (25 МэВ для лазеров на красителях с накачкой от импульсной лампы и 10^{-3} Дж (200 МэВ) для твердотельных лазеров с самосинхронизацией мод. Поскольку для многих экспериментов, например по физике лазерной плазмы, требуются импульсы большей мощности, автором рассмотрены различные способы усиления пикосекундных импульсов и намечены некоторые пути решения возникающих при этом проблем.

D. Bradley приводит также результаты последних работ по генерированию пикосекундных импульсов в УФ, ИК, ВУФ-спектральных диапазонах с помощью техники нелинейного преобразования частоты, генерации гармоник, нелинейного оптического смешения. Для измерения длительности и формы пикосекундных импульсов видимого и рентгеновского диапазонов D. Bradley в руководимой им оптической лаборатории в Лондонском имперском колледже широко использует прямые методы сверхскоростной электронно-оптической регистрации. Созданные в этой лаборатории электронно-оптические камеры обеспечивают временное разрешение порядка 900 фсек в видимом диапазоне и порядка 20 псек в мягком рентгеновском.

Критическому обзору автокорреляционных методов измерений ультракоротких импульсов посвящена сравнительно небольшая по объему статья E. P. Ippen и C. V. Shank. В свое время в литературе вопрос о достоверности пикосекундных измерений косвенными методами нелинейной оптики широко обсуждался (см., например, обзор Б. Я. Зельдовича и Т. И. Кузнецовой, УФН, 1972, т. 106, с. 47.) Ценность рецензируемой статьи заключается в том, что авторы путем тщательного сопоставления различных косвенных методов измерений приходят к заключению о том, что при разумном комбинировании автокорреляционных методов в принципе можно получить надежную информацию о длительности, форме и динамике спектра в пикосекундном лазерном импульсе. Авторы справедливо отмечают, что когда в 1965 г. физики столкнулись с проблемой измерения длительности ультракоротких импульсов, а имевшиеся тогда скоростные осциллографы и электронно-оптические камеры были ограничены временным разрешением порядка 100 псек, именно нелинейные методы, предложенные самими же физиками, обеспечили продвижение работ по пикосекундным лазерам. В арсенал нелинейных методов входят: генерация второй гармоники (H. P. Weber, 1966); метод двухфотонной люминесценции (J. A. Giordmain et al., 1967); многофотонная люминесценция (H. P. Weber et al., 1968); динамическая спектроскопия на основе дифракционных решеток (Tracy, 1969); скоростной затвор, основанный на оптическом керр-эффекте (M. Duguay, Hansen, 1970).

В 1975 г. E. P. Ippen и C. V. Shank первыми создали непрерывный лазер на красителе с самосинхронизацией мод, излучение которого представляло собой строго периодическую последовательность рекордно коротких 0,2—0,3 псек световых импульсов, перестраиваемых в диапазоне 598—615 нм. Применяв такой лазер для измерения времени релаксации вращательных и колебательных уровней молекул различных

красителей, авторы измерили время жизни оптического керр-эффекта, которое для кюветы с раствором CS_2 оказалось равным $2 \pm 0,3$ псек.

Статья D. H. Auston носит характер расширенного обзора литературы, в котором упоминается 346 литературных источников (хотя на 34 последних нет ссылок в тексте). Обсуждаются следующие разделы нелинейной оптики: оптическое смещение и генерация гармоник, в том числе высоких порядков; параметрическая генерация; стимулированное комбинационное рассеяние; фазовая самомодуляция и самофокусировка; оптическое разрушение; суперлюминесценция и наведенное просветление. В этом обзоре отражен большой вклад в развитие нелинейной оптики советских ученых — Г. А. Аскарьяна, С. А. Ахманова, В. Н. Лугового, А. М. Прохорова, Р. В. Хохлова и др.

Мощные пикосекундные импульсы позволили наблюдать многие нелинейные оптические эффекты, физическая картина которых затухала при действии наносекундных и микросекундных импульсов. Установлено, что в пикосекундном диапазоне порог оптического разрушения на несколько порядков выше для подавляющего большинства материалов, а влияние теплового нагрева существенно снижается. Это позволяет на фоне медленных эффектов выделить быстрые, такие например, как стимулированное комбинационное рассеяние и самофокусировка, имеющие характерные времена установления от 10 псек до 10 фсек.

В заключительном разделе статьи D. E. Auston кратко анализирует особенности использования пикосекундных импульсов при разработке устройств оптической связи, голографической памяти, элементов быстродействующих оптических процессоров. Автором в 1975 г. был впервые предложен пикосекундный коммутатор электрических импульсов, управляемый лазерным излучением ультракороткой длительности. Этот коммутатор, представляющий собой кремниевую таблетку с размерами $0,2 \times 0,2$ мм², вводимую в разрыв микрополосковой линии, требует для запуска энергию в 1—5 мдж. Для формирования прямоугольных импульсов разрядник запускается второй гармоникой излучения неодимового лазера, вызывающего наведенную проводимость на поверхности кремния. Чтобы замкнуть линию накоротко, используется сдвинутый по времени импульс основного излучения, наводящий проводимость в толще образца. Сообщается о формировании электрических импульсов амплитудой до 1,5 кВ при фронте нарастания порядка 25 псек. Автор рассматривает возможные ограничения при формировании перепадов напряжений и приходит к выводу, что минимальный предел времени нарастания импульсов для полупроводниковых разрядников составляет 1 псек.

Оригинальное применение пикосекундных импульсов для измерения релаксационных процессов в жидкостях и твердых телах описывает D. von der Linde. На основе собственных исследований и с привлечением литературных источников он рассматривает методику измерения времени колебательной релаксации в основном состоянии для относительно небольших молекул жидкостей, измерение колебательной релаксации решеток в твердых телах, измерение времени жизни фононов в кристаллах, а также измерение энергии релаксации и энергии переходов. Многие из этих измерений были сделаны впервые именно благодаря пикосекундной технике.

Один из разделов статьи посвящен исследованию электронного возбуждения в твердых телах. В частности, рассмотрены эффекты многофотонного поглощения и оптического насыщения, образования плотной электронно-дырочной плазмы, возбуждаемой пикосекундными импульсами. Автором получены количественные выражения для поперечного сечения и спектров многофотонного поглощения. Новые данные по диффузии, проводимости, рекомбинации плотного газа свободных носителей в полупроводниках также явились итогом использования пикосекундных импульсов. Спектр люминесценции экситонов, впервые изученный с высоким временным разрешением, дает богатую информацию о динамических процессах в полупроводниках, протекающих за сверхмалые промежутки времени.

Несмотря на безусловный интерес затронутых в статье вопросов, следует отметить, что автор сузил дискуссию повторением материала, изложенного в других статьях сборника, и обсуждением, главным образом, работ, сделанных в лабораториях фирмы «Белл-телефон», причем практически он не упомянул работ советских авторов по пикосекундной спектроскопии, проводимых, например, В. С. Летоховым и др.

К. В. Eisenthal обсуждает пикосекундные релаксационные процессы в химии. Пикосекундные исследования процессов переноса и обмена энергии в молекулах, химических реакций в жидкостях и др. позволяют по-новому представить природу многих фундаментальных явлений. Автор посвящает свой обзор следующим вопросам: межмолекулярному переносу энергии; молекулярной релаксации в растворах, содержащих большие и малые молекулы, явлениям переноса электронов, внутренним превращениям и межмолекулярным обменам. Многие из этих вопросов подробно рассмотрены в периодической литературе, а проблеме межмолекулярной передачи энергии посвящена интересная книга М. Д. Галанина.

В последней статье сборника, написанной А. J. Campillo и S. L. Shapiro, затронута сравнительно новая область применения пикосекундных импульсов — лазерная фотобиология. Пикосекундная техника позволила изучать быстротекущие явления, происходящие при фотосинтезе, измерять переходные процессы в молекуле гемоглобина

с помощью непрерывных лазеров на красителях, описать первичные процессы зрения и селективные биохимические реакции в молекулах ДНК, ответственных за генетический код. Для изучения времени флуоресценции хлорофилла, возбуждаемого пикосекундными импульсами, как за рубежом, так и в нашей стране (Л. Б. Рубин, В. З. Пашенко и др.) широко используются методы электронно-оптической хронографии. Показано, что время жизни хлорофилла зависит от концентрации раствора и уменьшается до 10–15 псек при снижении концентрации до значений, имеющих в живых клетках. Для изучения процессов, происходящих в реакционном центре, исследователи применяют бактерии родопсина, которые имеют простую структуру, легко выращиваются и отличаются стабильностью параметров.

Авторы приводят результаты измерений с соединениями на основе молекулы гемоглобина HbCO и HbO_2 . В частности, при возбуждении этих соединений субпикосекундными импульсами от непрерывного лазера на красителе 0,3 псек; 615 нм наведенное поглощение формировалось за времена короче 0,5 псек, а затем затухало за времена $\leq 2,5$ псек. Измерение первичных фотохимических актов в бактериях родопсина, в значительной степени ответственных за процесс зрения, показало быстрое нарастание поглощения за времена 6–10 псек на длине волны 635 нм и быстрое затухание поглощения с постоянной времени ~ 15 сек при освещении бактерий излучением на длине волны 580 нм.

Для исследования процессов быстрого переноса энергии по цепочке двухспиральных молекул генетического кода ДНК, последние возбуждались одиночными импульсами излучения длительностью 10 пс ($\lambda = 265$ нм, а их флуоресценция фотографировалась на электронно-оптической камере. Было показано, что постоянная времени нарастания флуоресценции составляет 20 псек.

В заключение, отмечая несомненную полезность книги как для специалистов, так и для тех, кто желает познакомиться с возможностями и применениями пикосекундных методов исследований, следует обратить внимание на то, что в книге практически не освещены вопросы применения пикосекундных импульсов большой мощности. Известно, что такие импульсы широко используются для нагрева вещества термоядерной мишени и генерации тяжелых ионов из высокоионизированной лазерной плазмы, для диагностики лазерной плазмы и т. п. Известно также, что проблемы лазерного термосинтеза находятся в центре внимания многих лабораторий мира. Очень схематично отражены в сборнике методы пико-фемтосекундной электронно-оптической диагностики и особенно уникальные возможности этой техники в рентгеновском спектральном диапазоне. Очевидно, что пикосекундная диагностика, основанная на применении рентгеновских ЭОП, будет играть решающую роль при проведении экспериментов по лазерному и электронному УТС.

Несмотря на указанные недостатки книги, освещение широкого круга вопросов генерирования и измерения пико-фемтосекундных импульсов излучения и их применения в биологии, спектроскопии, химии и нелинейной оптике в значительной степени обогащает арсенал уже известных экспериментальных средств и способствует дальнейшему прогрессу физических исследований.

М. Я. Щелев