

Регистрация излучения Ti:сапфирового лазера с высоким временным и пространственным разрешением

А.М.Прохоров, Н.С.Воробьев, В.И.Лозовой, А.В.Смирнов, М.Я.Щелев

Сообщается о достижении высокого пространственно-временного разрешения при регистрации излучения лазера на Ti:сапфире методами фемтосекундной фотозлектроники. В режиме линейной развертки изображений при скорости сканирования 5×10^{10} см/с и плотности входной мощности $(1-5) \times 10^3$ Вт/см² на длине волны 800 нм получено временное разрешение 2×10^{-13} с при линейном динамическом диапазоне регистрации не более 10.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, пространственно-временная регистрация изображений.

1. Введение

Создание в конце 90-х годов лазеров на Ti:сапфире, генерирующих в ближнем ИК диапазоне одиночные импульсы с предельно малой длительностью (~ 5 фс) [1], сделало актуальной проблему прямой (линейной по времени и интенсивности) регистрации изображений с фемтосекундным временным разрешением. Заложенные в автокорреляционных методах идеи измерения, требующие априорных сведений о форме импульса и сводящиеся к необходимости решения обратной задачи, не позволяют однозначно судить о временном профиле интенсивности фемтосекундных импульсов. Остается нерешенной и проблема фемтосекундной регистрации изображений однократных быстропротекающих процессов в различных участках спектра (от мягкого рентгеновского до ИК диапазона) и в широком интервале интенсивностей (от пиковатт до петаватт на квадратный сантиметр).

В Отделе фотозлектроники ИОФАН с использованием многолетнего опыта [2, 3] создана аппаратура и отработана методика, обеспечивающие регистрацию оптических ($\lambda = 115 - 1550$ нм) изображений сверхбыстрых явлений с рекордным временным (2×10^{-13} с) и высоким пространственным (30 пар лин./мм) разрешениями.

2. Экспериментальная установка

В экспериментах применялась фемтосекундная лазерная система фирмы Spectra-Physics. В этой системе в качестве задающего генератора использовался лазер на Ti:сапфире, работающий в режиме самосинхронизации мод за счет керровской линзы. Генератор излучал одиночные импульсы длительностью 60 фс с частотой повторения 82 МГц при средней мощности 0,6 Вт (энергия одиночного импульса составляла 2пДж). После регенеративного усилителя, работавшего с частотой повторения 10 Гц, длительность одиночных импульсов увеличилась до 120 фс при максимальной энергии 1,8 мДж.

Диаметр рабочего поля электронно-оптического преобразователя (ЭОП) составлял 5 мм. На его входе устанавливалась регулируемая (с точностью до 5 мкм) механическая щель, на которую проецировался пучок лазерного излучения диаметром 5 мм. Плоскость щели отображалась на входной фотокатод оптической системой, содержащей два объектива «Гелиос-44» и набор фильтров. Согласно оценкам, в отображающей системе происходило затягивание входных импульсов до 130 фс, если они поступали непосредственно от генератора, и до 160 фс, если они поступали от регенеративного усилителя. Длительность лазерных импульсов измерялась с помощью автокоррелятора. Пространственное разрешение регистрирующей системы, отнесенное к плоскости фотокатода, составляло более 30 пар лин./мм. Серебрянокислородно-цезиевые фотокатоды, применявшиеся в ЭОП, могли обеспечивать регистрацию импульсов в спектральном диапазоне 115–1550 нм.

Для получения изображения входной щели требовалось обеспечить ее засветку синхронно с импульсом напряжения длительностью 5 нс, прикладываемым к промежуточной сетке – фотокатод. Эксперименты проводились при напряженности электрического поля у фотокатода 13 кВ/мм. Лазерное излучение от регенеративного усилителя освещало входную щель шириной 30 мкм. Изображение развернутого во времени процесса с экрана фемтосекундного ЭОП через усилитель яркости на основе микроканальной пластины с коэффициентом усиления 3×10^4 поступало на вход ПЗС-камеры типа С 4880-06 фирмы Hamamatsu. Зарегистрированная полуширина изображения щели на экране ЭОП составляла 100 мкм при электронно-оптическом увеличении $2.8 \times$.

3. Экспериментальные результаты

Первая серия экспериментов заключалась в калибровке скорости развертки по экрану ЭОП. Для этого в половину лазерного пучка вводились калиброванные по толщине стеклянные пластинки. На экране регистрировались сдвоенные импульсы с известным временным расстоянием между ними. В схему запуска развертки вводилась калиброванная задержка с шагом 10 пс. При этом изображение сдвоенных импульсов перемещалось по

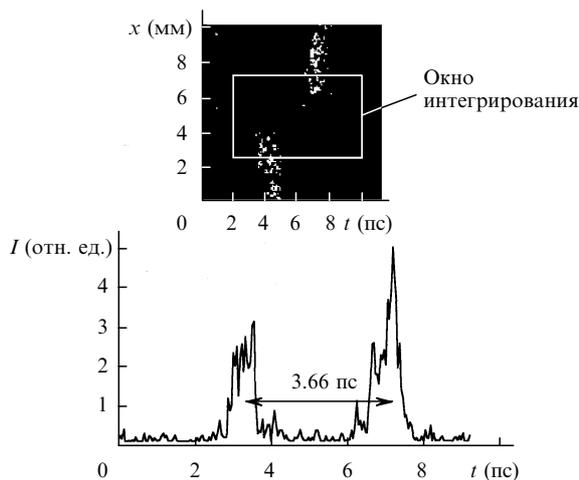


Рис.1. Калибровка скорости развертки с помощью задержанных по времени относительно друг друга двух частей одиночного фемтосекундного лазерного импульса – изображение с экрана камеры (а) и соответствующая микроденситограмма (б).

экрану, что позволяло оценить нелинейность скорости развертки.

На рис.1 показан пример регистрации двух сдвоенных лазерных импульсов с временным зазором 3.66 пс. Интенсивность на входе ЭОП ($\sim 5 \times 10^4$ Вт/см²) более чем на порядок превышала интенсивность лазерного излучения, характерную для режима линейной (по интенсивности) регистрации. Это было необходимо для более точного определения положения сдвоенных импульсов. Установлено, что нестабильность срабатывания развертки не превышает 20 пс при времени регистрации на 25-миллиметровом экране, равном 50 пс. Таким образом, при нелинейности, не превышающей 10 %, скорость развертки фотоэлектронных изображений на экране ЭОП составила 5×10^{10} см/с.

Во второй серии экспериментов измерялось максимально достижимое временное разрешение ЭОП. Расчетное временное разрешение с учетом скорости развертки, напряженности поля у фотокатода, длины волны падающего излучения и т. п. было не хуже 200 фс. Измерялась минимально достижимая полуширина регистрируемого импульса, представлявшего собой свертку из временной аппаратной функции ЭОП и лазерного импульса длительностью 160 фс.

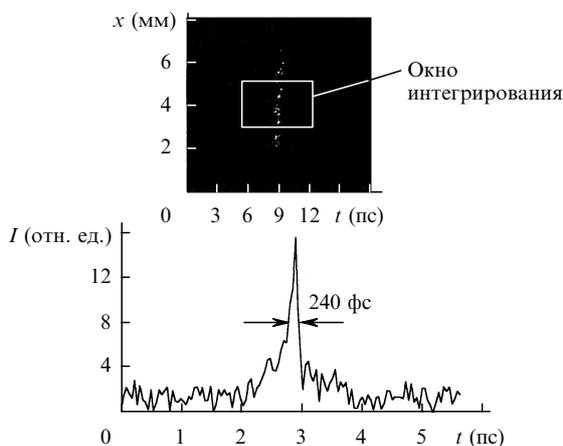


Рис.2. Развертка на экране ЭОП поля излучения одиночного лазерного импульса длительностью 160 фс (а) и соответствующая микроденситограмма (б).

На рис.2 показан типичный одиночный лазерный импульс, зарегистрированный на экране ЭОП. Кривизна изображения определялась разными пролетными временами осевых и периферийных фотоэлектронов. Она учитывалась при компьютерной обработке и дополнительно служила для калибровки скорости развертки. В зависимости от положения окна интегрирования измеренная на экране длительность импульса по полуширине составляла 240 ± 40 фс. С учетом длительности входного лазерного импульса временное разрешение ЭОП оказалось не хуже 200 фс.

Эксперименты проводились при входной интенсивности на фотокатоде $1 - 5$ кВт/см² и его чувствительности на длине волны 800 нм ~ 0.4 мА/Вт. Это позволяет сделать вывод о том, что в построении изображения участвовало от 400 до 2000 фотоэлектронов. Величину такого же порядка дает обработка регистрируемых картин.

Из анализа изображений лазерного импульса, содержащего более 300 «точек» (отсчетов) разной интенсивности, видно, что погрешность определения профиля интенсивности лазерного импульса во времени составляла ~ 5 %, исходя из числа регистрируемых отсчетов. Вдоль пространственной оси укладываются ~ 150 разрешаемых элементов (высота входной щели 5 мм, размер пространственно разрешаемого элемента вдоль щели 30 мкм). В свою очередь в каждом пространственном элементе развернутого на экране изображения в среднем содержится примерно две точки отсчета, поэтому погрешность измерений здесь возрастает до 70 %.

В третьей серии экспериментов измерялся динамический диапазон регистрации при максимальном временном разрешении. Для этого мы, меняя плотность мощности излучения на фотокатоде с помощью линейного ослабителя, измеряли длительность импульса по полуширине, следя за тем, чтобы эта полуширина не увеличилась более чем на 20 % по сравнению с полушириной, измеренной при минимальной регистрируемой входной плотности мощности излучения. Измерения показали, что динамический диапазон регистрации не превышает 10, что находится в хорошем соответствии с результатами компьютерного моделирования.

4. Заключение

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что в ИОФАНе создана аппаратура и отработана методика ее применения для регистрации пространственно-временных картин быстропротекающих процессов (лазерное излучение и процессы, им инициируемые) с временным разрешением не хуже 200 фс. Полученные результаты лишь на порядок величины отделяют нас от тех значений (десятки фемтосекунд), которые 50 лет назад были предсказаны Е.К.Завойским и его учениками [4].

В заключение авторы выражают глубокую благодарность всем сотрудникам Отдела фотоэлектроники ИОФАН, благодаря творческим усилиям которых изложенные результаты стали возможными.

1. Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 95 (2001).
2. Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **31**, 477 (2001).
3. Брюхневич Г.И., Воробьев Н.С., Коробкин В.В., Прохоров А.М., Степанов Б.М., Щелев М.Я. *Письма в ЖТФ*, **2**, 1009 (1976).
4. Завойский Е.К., Фанченко С.Д. *ДАН СССР*, **100**, 661 (1955); *ДАН СССР*, **108**, 218 (1956).