

# Трехканальный поляроинтерферометр для диагностики лазерной плазмы с фемтосекундным временным разрешением

Е.А.Болховитинов, Г.А.Господинов, К.А.Иванов, А.А.Рупасов, А.Б.Савельев

*Описан модернизированный трехканальный поляроинтерферометр, позволивший осуществить зондирование лазерной плазмы с фемтосекундным временным разрешением. Проведены тестовые эксперименты с искрой в воздухе, создаваемой формирующим наносекундным лазерным импульсом, при использовании зондирующего импульса длительностью 50 фс. Получены высококонтрастные интерференционные изображения плазмы, позволяющие восстанавливать профиль электронной концентрации плазмы с фемтосекундным временным разрешением и в широком диапазоне изменений задержек зондирующего импульса относительно формирующего импульса.*

**Ключевые слова:** лазерная плазма, поляроинтерферометр, интерференционное изображение, временное разрешение.

## 1. Введение

Оптическое зондирование является одним из наиболее важных и широко используемых методов исследования динамики лазерной плазмы [1]. Различные варианты реализации этого метода обеспечивают измерение скорости расширения и формы непрозрачного плазменного облака (теневое фотографирование), пространственного распределения концентрации электронов (интерферометрия) и магнитных полей в ее прозрачной, подкритической области (полярометрия). Временное разрешение всех этих методов определяется в первую очередь длительностью зондирующего лазерного импульса. В последнее время наибольшую актуальность получили задачи, связанные с воздействием на вещество фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью  $10^{16} - 10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup> [2–7], для изучения которых необходимо временное разрешение зачастую составляет менее 1 пс.

Ранее в ФИАНе был разработан трехканальный поляроинтерферометр [8], совмещающий все три методики оптического зондирования и позволяющий в одном и том же лазерном импульсе определять одновременно форму непрозрачной области плазмы, пространственный профиль электронной концентрации подкритической плазмы и структуру возникающих в ней спонтанных магнитных полей. Разработанная в [8] схема для исследования высокотемпературной плазмы обладала естественным ограничением на длительность зондирующего импульса

около 1 пс. Это связано с тем, что интерферирующие пучки, проходящие через двулучепреломляющие элементы схемы, приходят в плоскость формирования интерференционной картины с временной задержкой одного из пучков по отношению к другому, поскольку, обладая взаимно ортогональными поляризациями внутри двулучепреломляющих анализирующих кристаллов, пучки имеют различные фазовые скорости и несколько различающиеся оптические пути. Это приводит к тому, что при длительностях зондирующего импульса менее 1 пс импульсы перестают перекрываться по времени в плоскости регистрации и поэтому не интерферируют.

В настоящей работе продемонстрирована возможность усовершенствования схемы поляроинтерферометра и создания прибора, который позволит зондировать лазерную плазму с фемтосекундным разрешением и получать при этом четкую интерференционную картину.

## 2. Схема поляроинтерферометра и его применение в эксперименте

Для диагностики высокотемпературной плазмы, создаваемой лазерным излучением с широким диапазоном длительностей импульса (от нано- до фемтосекунд), и зондирования лазерной плазмы как нано-, так и фемтосекундными лазерными импульсами в частотном режиме (с частотой следования 10 Гц) на комплексе лазерных установок в МЛЦ МГУ [7] поляроинтерферометр был существенно модернизирован. Основу прибора составила предложенная в ФИАНе схема, которая дает возможность получать одновременно три изображения плазмы: теневое, интерференционное и поляризационное (рис.1). Эти изображения, формируемые зондирующим лазерным пучком, позволяют восстанавливать профиль электронной концентрации плазмы и структуру спонтанных магнитных полей.

На выходе поляроинтерферометра за счет использования двулучепреломляющих клиньев и поляризаторов создаются три пучка, разнесенные в пространстве: ое (теневой канал), ое (поляризационный канал), ее (пучок, образующий интерференционный канал при его пе-

Е.А.Болховитинов, А.А.Рупасов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: bolhovitinovea@lebedev.ru

Г.А.Господинов. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

К.А.Иванов, А.Б.Савельев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Поступила в редакцию 11 октября 2018 г., после доработки – 31 января 2019 г.

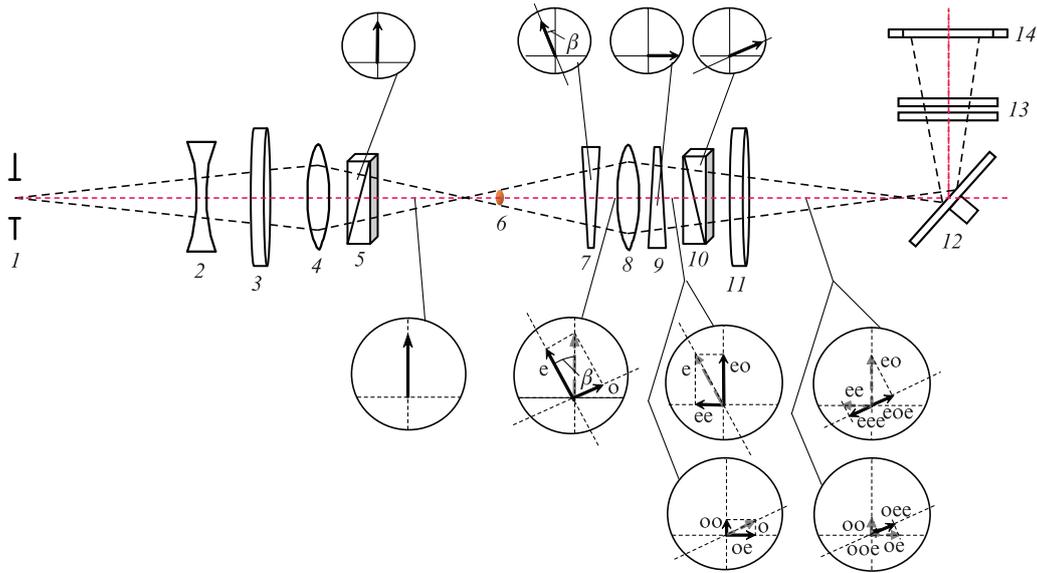


Рис.1. Оптическая схема трехканального поляриинтерферометра:

1 – формирующая диафрагма; 2 – отрицательная линза; 3, 11 – окна вакуумной камеры; 4, 8 – положительные линзы; 5, 10 – призмы Глана; 6 – положение объекта и изображение формирующей диафрагмы в его плоскости; 7, 9 – двулучепреломляющие клинья; 12 – устройство из двух зеркал, обеспечивающее синхронизацию интерферирующих пучков; 13 – светофильтры; 14 – матрица ПЗС-камеры;  $\beta$  – угол начальной раскрестки оптических осей клина 7 и призмы Глана 5. В верхней части рисунка показаны ориентации оптических осей кристаллов, в нижней – векторные диаграммы поляризации пучков в соответствующих точках оптической схемы. Пучок eoe формирует теневое изображение, пучок eoe – поляризационное изображение, а пучки eee и eoe дают интерференционное изображение.

рекрытия на матрице ПЗС-камеры с частью пучка eoe). Как было отмечено выше, ввиду различия оптических путей в клиньях задержка между пучками eoe и eee в плоскости ПЗС-матрицы составляет  $\sim 1$  пс. Тем самым возникает естественное ограничение на длительность зондирующего лазерного импульса, который должен быть длиннее 1 пс.

В случае, когда не требовалось получения высокого временного разрешения, в качестве зондирующего использовался импульс на основной длине волны излучения неодимового лазера (1064 нм) с длительностью 6 нс. Для перехода в диапазон пикосекундного разрешения при зондировании плазмы использовался импульс длительностью 2 пс на длине волны 400 нм, который еще позволял получать достаточный контраст интерференционных полос. Для формирования такого импульса короткий фемтосекундный импульс был удлинен посредством преобразования его во вторую гармонику в кристалле KDP, толщина которого существенно больше групповой длины. В таком режиме импульс второй гармоники удлиняется, и при использовании кристалла толщиной 3 см его длительность составила около 2 пс.

Для изучения быстропротекающих процессов в лазерной плазме часто требуется обеспечить максимально высокое временное разрешение поляриинтерферометра, т. е. зондировать плазму фемтосекундным импульсом, чему препятствует отмеченное выше ограничение, связанное с различием оптических путей интерферирующих пучков. Поэтому для получения качественного изображения в интерференционном канале при зондировании плазмы фемтосекундным импульсом было разработано компенсирующее устройство для задержки одного интерферирующего пучка относительно другого на основе двух поворотных зеркал (рис.2). Верхнее зеркало в этом устройстве было зафиксировано, положение нижнего регулировалось микрометрическим винтом. Такое устройство было помещено близко к фокусу линзы 8 (см. рис.1), передаю-

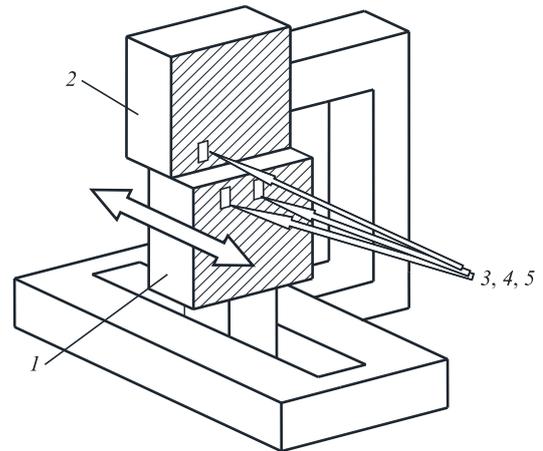


Рис.2. Устройство оптической задержки для синхронизации пучков в интерференционном канале поляриинтерферометра:

1 – зеркало с микрометрической подвижкой; 2 – неподвижное зеркало; 3–5 – трансформируемые в оптическом тракте поляризационное (eoe) и теневые (eee, eoe) изображения плазмы в разделенном зондирующем лазерном пучке после прохождения двулучепреломляющих клиньев.

щей изображение плазмы на плоскость регистрации, что позволяло развести пучки по разным зеркалам (пучок eee направлялся на верхнее зеркало, а пучки eoe и eoe – на нижнее).

Отраженные от зеркал пучки направлялись на ПЗС-камеру. Варьируя положение микрометрического винта, удалось получить в плоскости ПЗС-матрицы интерференционную картину, зона высокой контрастности полос в которой сравнима или немного меньше области перекрытия интерферирующих изображений. Оцененное временное разрешение оказалось сравнимым с длительностью зондирующего импульса и в проведенных тестовых экспериментах, описываемых ниже, достигло 50 фс. При

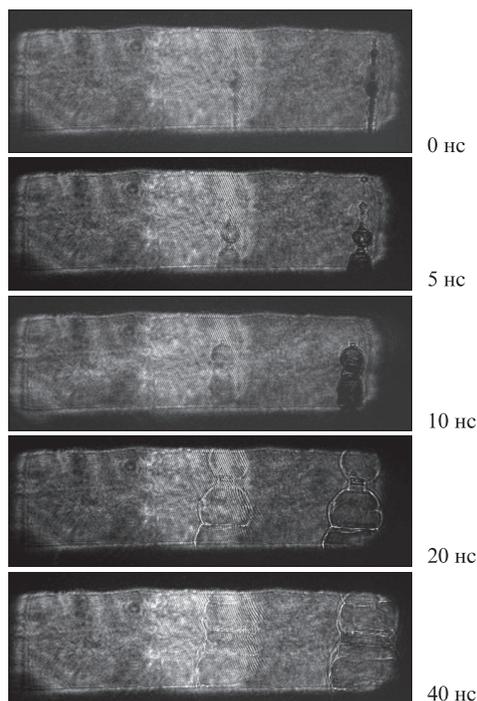


Рис.3. Изображения лазерной искры в воздухе в интерференционном (в центральной части изображения) и поляризационном (в правой части изображения) каналах поляроинтерферометра при различных временах задержки зондирующего лазерного импульса относительно формирующего плазму лазерного импульса. Длительность зондирующего импульса составляла 50 фс.

этом пространственное разрешение данной оптической схемы составило  $\sim 15$  мкм.

Для тестирования новой схемы было проведено зондирование искрового пробоя в воздухе, возникающего под действием импульсов Nd:YAG-лазера, который излучает на основной гармонике с длиной волны 1064 нм импульсы длительностью 6 нс с частотой следования 10 Гц. Энергия импульса на выходе лазера составляла 100 мДж. Зондирование искрового пробоя проводилось на основной гармонике титан-сапфирового фемтосекундного лазера с длиной волны 800 нм при длительности импульса 50 фс. Изображения плазмы искры на выходе поляроинтерферометра регистрировались на матрицу ПЗС-камеры, синхронизированной с зондирующим пучком с точностью 1 нс. На рис.3 показаны изображения плазмы лазерной искры в двух каналах поляроинтерферометра – поляризационном и интерференционном, зарегистрированные при различных временах задержки зондирующего лазерного импульса по отношению к формирующему плазму лазерному импульсу, которые варьировались в диапазоне 0–40 нс.

Ширина интерференционных полос 15 мкм позволяет разрешить их изгибы на градиенте плотности плазмы, и следовательно, вычислить пространственный набег фазы и восстановить профиль электронной концентрации плазмы (рис.4). Критическая электронная концентрация лазерной плазмы  $N_c$  для зондирующего излучения в условиях нашего эксперимента составила  $1.74 \times 10^{21}$  см $^{-3}$ .

Для восстановления распределения электронной концентрации лазерной плазмы был использован алгоритм

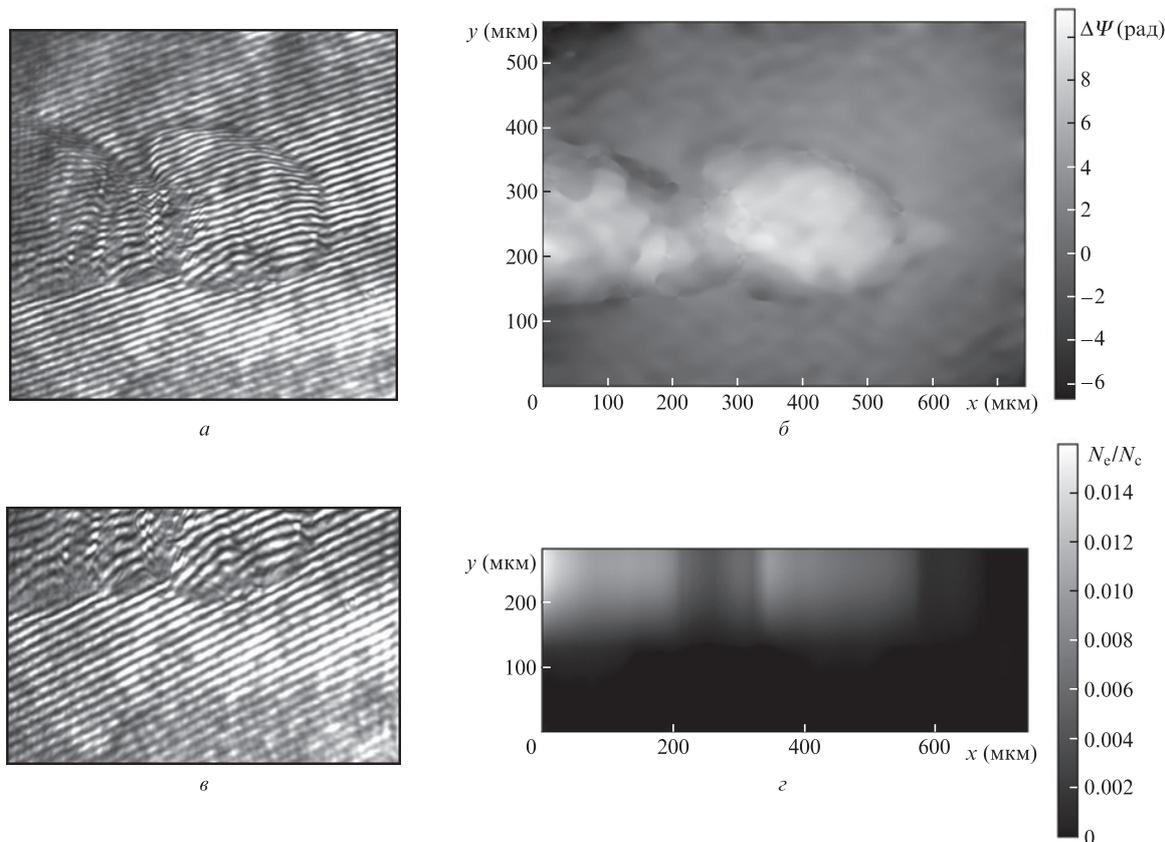


Рис.4. Интерференционная картина плазмы лазерной искры в воздухе (а), восстановленное распределение набег фазы  $\Delta\Psi$  (б), обработанная часть интерференционного изображения разряда (в), а также результат программного восстановления профиля электронной концентрации плазмы для этой части в долях  $N_e/N_c$  (г). Длительность зондирующего импульса равна 50 фс, а его задержка по отношению к формирующему плазму импульсу – 20 нс.

на основе обратного преобразования Абея. Применение данного подхода к обработке интерференционного изображения плазмы требует наличия аксиальной симметрии функции распределения электронной концентрации, которая обычно реализуется в условиях взаимодействия лазерного излучения с мишенью в вакууме. Однако в проведенных наблюдениях лазерной искры в воздухе, которая выступала в роли тестового объекта исследования, разлет плазмы, как правило, был не симметричным, поэтому для корректного восстановления электронной концентрации обрабатывалась часть интерференционного изображения плазмы (рис.4,а). Полученное распределение электронной концентрации плазмы лазерной искры в воздухе приведено на рис.4,б для времени задержки зондирующего импульса по отношению к формирующей плазму импульсу 20 нс.

Таким образом, проведена модернизация трехканального поляроинтерферометра с использованием схемы задержки одного из интерферирующих пучков на основе двух зеркал с микрометрической подвижкой, и было продемонстрировано, что усовершенствованная схема дает возможность получать четкие интерферометрические изображения, которые позволяют восстанавливать профиль

электронной концентрации плазмы с временным разрешением до 50 фс.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-02-00302-а).

1. Басов Н.Г., Захариенков Ю.А., Рупасов А.А., Склизков Г.В., Шиканов А.С. *Диагностика плотной плазмы* (М.: Физматлит, 1989. гл. 2).
2. Gibbon P. *Short Pulse Laser Interactions with Matter* (London: Imperial College Press, 2005).
3. Mourou G., Tajima T., Bulanov S. *Rev. Modern Phys.*, **78**, 309 (2006).
4. Андреев А.В., Гордиенко В.М., Савельев А.Б. *Квантовая электроника*, **31**, 941 (2001) [*Quantum Electron.*, **31**, 941 (2001)].
5. Uryupina D.S., Ivanov K.A., Brantov A.V., Savel'ev A.B., Vyshenkov V.Yu., Povarnitsyn M.E., Volkov R.V., Tikhonchuk V.T. *Phys. Plasmas*, **19**, 013104 (2012).
6. Nakatsutsumi M., Sentoku Y., Korzhimanov A., Chen S.N., Buffechoux S., Kon A., Atherton B., Audebert P., Geissel M., Hurd L., Kimmel M., Rambo P., Schollmeier M., Schwarz J., Starodubtsev M., Gremillet L., Kodama R., Fuchs J. *Nat. Commun.*, **280** (9), 1 (2018).
7. Крестовских Д.А., Иванов К.А., Цымбалов И.Н., Шуляпов С.А., Букин В.В., Волков Р.В., Рупасов А.А., Савельев А.Б. *Квантовая электроника*, **47**, 45 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 45 (2017)].
8. Болховитинов Е.А., Краюшкин И.А., Рупасов А.А., Федотов С.И., Шиканов А.С. *ПТЭ*, № 3, 101 (2007).