

# РЕГИСТРАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГИПЕРСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОФИКСАЦИИ

А.Э. Риф  
Лицей при ТПУ

Плазма – четвертое состояние вещества, наиболее характерное для Вселенной. Это квазинейтральный газовый ансамбль заряженных частиц, размер которого превышает радиус Дебая.

Огромная часть вещества Вселенной находится именно в состоянии плазмы. Солнце, другие звезды, а также межзвездная среда вследствие высокой температуры состоят, в основном, из полностью ионизированной плазмы. Межзвездная плазма является примером низкотемпературной плазмы. Плазменные объекты окружают нас и в повседневной жизни, например, плазма используется в лампах дневного света или мы можем наблюдать её при электросварке.

Диагностика плазмы имеет достаточно важное значение в практических целях, и в первую очередь в получении управляемой термоядерной реакции. С другой стороны, понимание процессов, протекающих в технологическом объекте, позволяет направленно совершенствовать его рабочие характеристики.

Трудность измерения температуры плазмы заключается в том, что любой прибор, помещенный в среду с температурой в миллионы градусов, должен либо охладить ее, либо сгореть. Следовательно, судить о параметрах плазмы надо на расстоянии, и «термометр» безусловно должен быть бесконтактным.

В наше время существует много различных методов измерения температуры плазмы, большинство из них основаны на оптических явлениях, такие как:

## 1. Томсоновское рассеяние света [1]

Метод заключается в измерении температуры плазмы по доплеровскому уширению линии упруго рассеянного лазерного излучения. Погрешность измерения не превышает 10%.

## 2. Лазерно-индуцированная флуоресценция [1]

Метод, состоящий в лазерном возбуждении электронных уровней молекул и регистрации спектра спонтанного излучения. Температура же молекул определяется по больцмановскому распределению интенсивности во вращательной структуре полос излучения. Погрешность измерения  $\pm 5\%$ .

## 3. Доплеровское уширение спектральных линий поглощения [1]

Метод основан на регистрации профилей и измерении ширины спектральных линий поглощения света тяжелыми частицами плазмы. Погрешность измерения не более 5%.

## 4. Лазерная интерферометрия пламён и плазмы [1]

Метод, основанный на связи температуры, плотности, а, следовательно, и показателя преломления газа.

Существующие методы, несмотря на достаточно низкую погрешность в измерениях, имеют свои недостатки, в частности необходимость использования сложных технических решений и последующей математической обработки. А

также такие методы не позволяют измерить температуру в быстропротекающих плазменных процессах.

Одним из таких быстропротекающих плазменных процессов является гиперзвуковая плазменная струя, генерируемая коаксиальным магнитоплазменным ускорителем [2].

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель [3] относится к области электротехники и электрофизики, а именно к ускорительной технике, и может быть использован для генерирования сверхзвуковых высокоэнтальпийных струй электроразрядной плазмы и получения ультрадисперсных фаз сверхтвердых материалов, оксидов, нитридов, карбидов и боридов (рис.1).

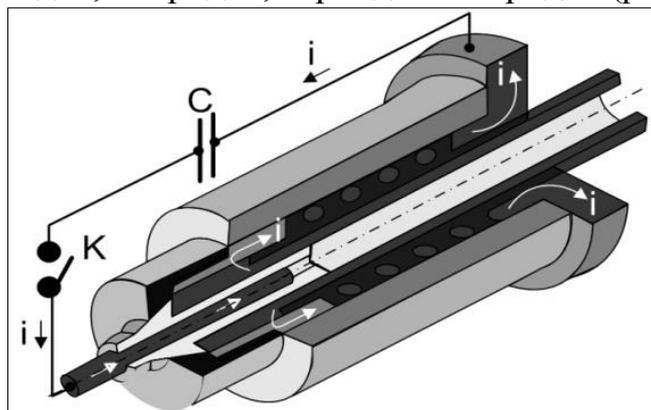


Рис.1. Ускоритель

Для изучения химических и физических явлений, происходящих в ускорителе, нужно знать условия, при которых генерируется плазма. Одним из таких условий является температура. Поэтому в данной работе мы предлагаем методику измерения температуры плазмы, основанную на высокоскоростной видеофиксации явлений.

Суть метода регистрации состоит в сравнении с эталоном и заключается в съемке объектов с известной температурой (эталона) и последующей обработки (построение градуировочной кривой) и оценки температуры плазмы у реального процесса.

В качестве объекта исследования была выбрана гиперзвуковая плазма, генерируемая коаксиальным магнитоплазменным ускорителем и зафиксированная с использованием высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA1.1.

Для работы в качестве «эталона» была выбрана спираль накала лампы накаливания мощностью 100 Вт. Для оценки температуры спирали накала использовался пирометр фирмы Raytek (Германия), с диапазоном регистрации температур от 600 до 3000 °С. Съемка плазмы проводилась с помощью монохромной высокоскоростной камеры Photron SA1.1. с установленным объективом Helios 44-2 в режиме съемки: диафрагма 2.0 и использованием двух светофильтров ND64 и ND32. Использование дополнительных светофильтров обеспечивает регистрацию «не засвеченной» картины истечения плазмы.

Методика оценки температуры плазмы заключается в следующем: при помощи лабораторного автотрансформатора изменяя мощность лампы накаливания (соответственно и интенсивность накала самой спирали), одновременно проводится оценка температуры нити с использованием пирометра, одновре-

менно при этом фиксируются изображения с использованием высокоскоростной камеры. В итоге проведения данной работы нами была получена серия изображений спирали накаливания с разным уровнем интенсивности свечения при известных температурах.

Уровень интенсивности свечения нити накала (в градациях серого) для всех полученных снимков был оценен с использованием свободного программного продукта ImageJ. На снимках для оценки максимального значения свечения нити в градациях серого, через интересующий нас участок, проводилась линия. Используя системную функцию программы Plot Profile, программа автоматически создает массив данных с указанием величины в градациях серого для каждого пикселя (от 0 до 255).

Проведя анализ серии снимков с разным уровнем интенсивности излучения, нами был получен массив данных, обработка которого позволила выявить описывающую функцию – градировочную кривую.

Итоговый анализ фотографии истечения гиперзвуковой плазмы, представлен на рис.3

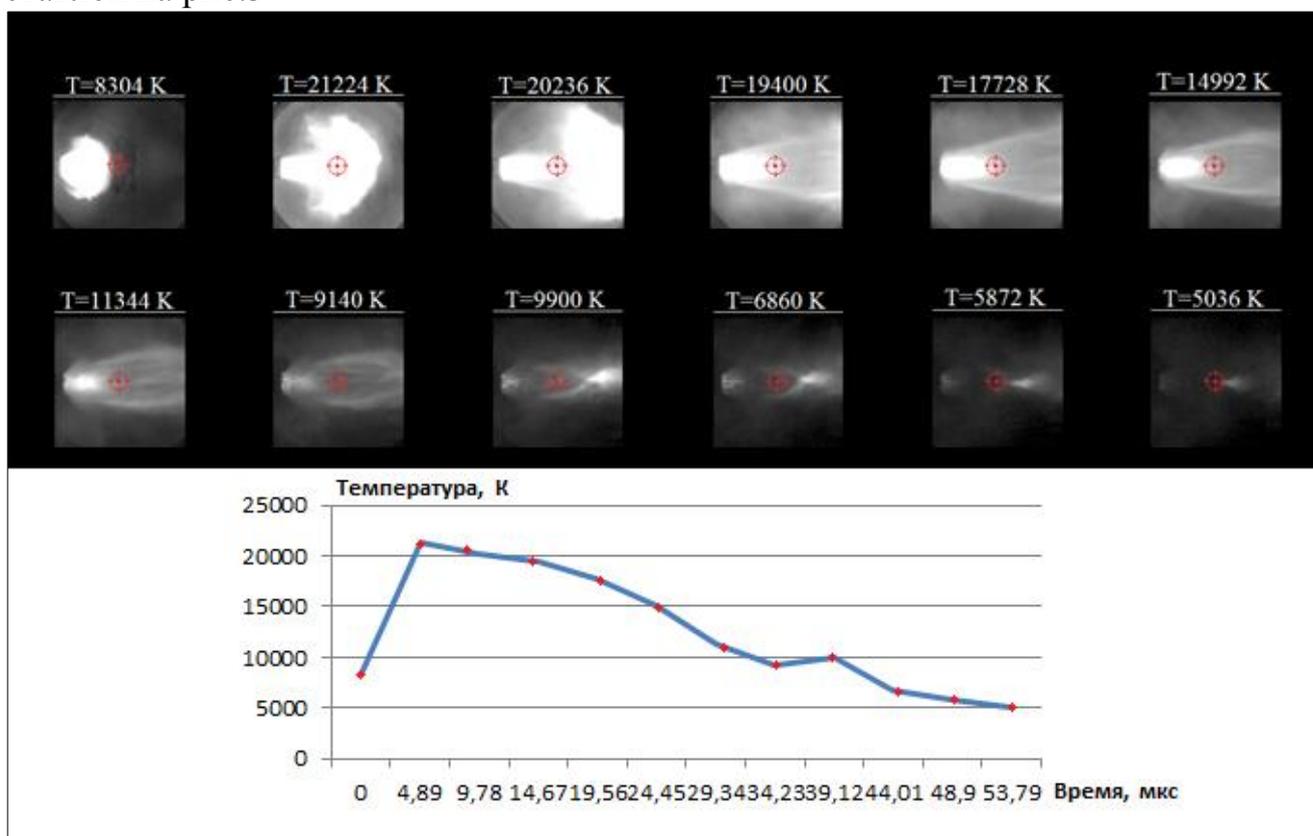


Рис. 2. Динамика изменения температуры плазмы во время работы коаксиального магнитоплазменного ускорителя

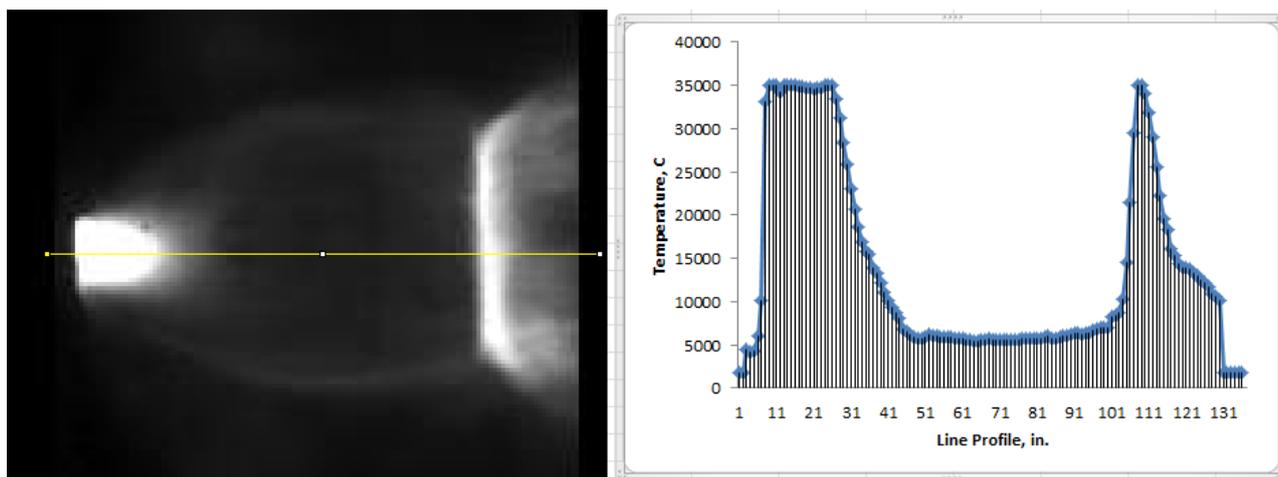


Рис. 3. Итоговый анализ фотограммы истечения плазмы

На основании проведенной работы были выявлены следующие особенности данного метода такого подхода оценки температуры плазмы или иными словами можно сказать – выявлены достоинства и недостатки.

К достоинствам метода стоит отнести следующее: во-первых, это достаточно простая техническая реализация; во-вторых, возможно проведение измерений температуры в полуавтоматическом режиме (реализация пакетной обработки данных).

К недостаткам относится более высокая погрешность измерения (около 20%) относительно других методов, описанных ранее и невозможность оценки максимальной температуры в случае «засвета» фото-/видеосъемки, либо отдельных объектов на неё.

Указанные недостатки являются не существенными и могут быть практически полностью устранены в случае подбора и использования более сильных светофильтров и проведения предварительной калибровки системы на объектах с известной температурой близкой к анализируемой.

Предложенная методика является достаточно универсальной и может быть применена в различных научных и технических сферах.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Магунов А. Н. Лазерная термометрия плазмы, газов и конденсированных сред // Фотоника №3, 2010, 43-47.
2. Сивков А.А., Найденов Е.П., Пак А.Я. Динамический синтез ультрадисперсных кристаллических фаз системы С-N. // Сверхтвердые материалы, №5, 2009, с.22-30
3. FindPatent.ru - патентный поиск, 2012-2016.  
<http://www.findpatent.ru/patent/243/2431947.html>
4. Курнаев В.А. Плазма – XXI век. Москва, 2008.

Научный руководитель: А.С. Ивашутенко, к.т.н., доцент кафедры ЭПП ЭНИН ТПУ.