



Institute of Problem of Chemical Physics,  
Chernogolovka, Russia

# Регистрация выхода плазмы и мелкодисперсных частиц зондом Ленгмюра, *С.В.Дудин, М.И.Кулиш, В.Б.Минцев*

**Цель работы:** диагностика потока плазмы и мелкодисперсных частиц при выходе ударной волны на свободную поверхность медной мишени.

## **Задачи:**

1. Получение результатов экспериментов по регистрации выхода плазмы и мелкодисперсных частиц со свободной поверхности с использованием электрического зонда Ленгмюра в плоской постановке.
2. Сопоставление полученных результатов с экспериментами, где использовались оптические методы и пьезодатчики.
3. Оценка расчетных параметров плазмы для условий эксперимента с учетом добавки ионов материала мишени (меди).

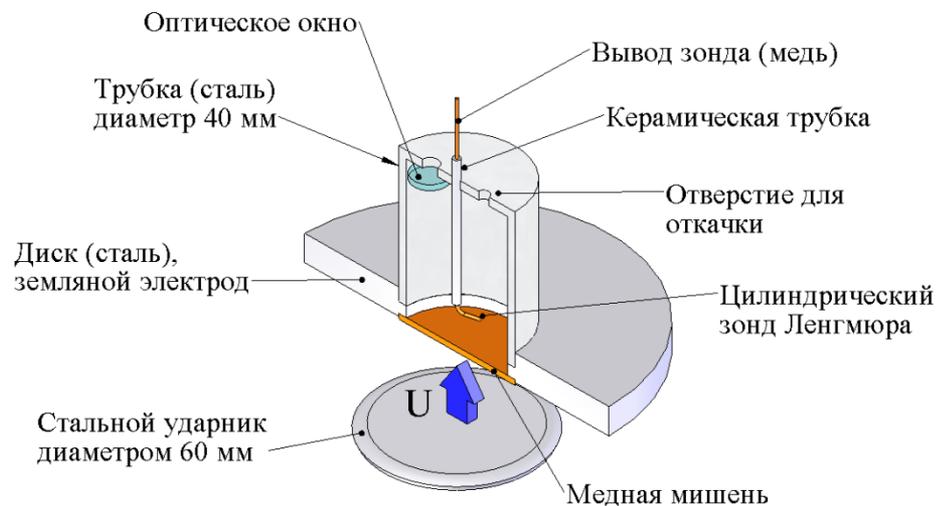


## Литература

1. S.V.Dudin, M.I. Kulish, A.V. Shutov, V.B. Mintsev, Investigation of Exit of Strong Shock Wave at Free Surface of Metal, International Conference Shock Waves in Condensed Matter, Kiev, Ukraine, 2012, p.231-238
2. Kulish M.I., Dudin S.V. 2019 Microparticles and plasma stream registration during cylinder compression of a metal liner *J. Phys.: Conf. Ser.* **1147** 012025 [[doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012025](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1147/1/012025)]
3. M. I. Kulish, V. B. Mintsev, S. V. Dudin, A. E. Ushnurtsev and V. E. Fortov Measurement of the temperature of the copper plasma generated in the process of release of a shock-compressed target, *JETP LETT*, 2011, 94, 2, p. 101-105
4. Kulish M.I., Dudin S.V., Ushnurtsev A.E., Mintsev V.B. The liner brightness temperature measurement by two channel optical pyrometer, *Journal of Physics: Conference Series*, 946 (2017)
5. Langmuir I. // *Phys. review.* 1926. V. 26. P. 727
6. В.А. Котельников, В.П. Ким, М.В. Котельников, Зондовые измерения в затопленной разреженной струе плазмы, *Письма в ЖТФ*, **36**, вып.16, 2010, с 70
7. Е.В. Хайдуков, О.А. Новодворский, А.А. Лотин, В.В. Рочева, О.Д. Храмова, В.Я. Панченко, Зондовые исследования лазерного эрозионного факела при абляции кремния в вакууме, *ЖТФ*, 80, вып. 4, 2010, С.59
8. Лямкин А.И., Матыцин А.И., Ставер А.М. Эмиссия электронов при выходе ударной волны из порошка в вакуум. // *Журн. прикл. механики и техн. физики.* - 1982. - № 3. - С. 123 – 127
9. Леб Л., Основные процессы электрических разрядов в газах, пер. с англ., М. - Л., 1950.
10. Лебедев Ю.А. Введение в зондовую диагностику плазмы пониженного давления (учебное пособие) Московский инженерно-физический институт (государственный университет), М.: 2003, 55 с.
11. Г. Н. Макаров, Экстремальные процесс в кластерах при столкновении с твердой поверхностью, *УФН*, **176**, 2, 2006, 121
12. В. К. Грязнов, Термодинамика низкотемпературной плазмы в квазихимическом представлении, *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*, Под ред. В. Е. Фортова, Вводный том I, М.: Наука, 2000, с. 299.
13. Kulish, M.I., Mintsev, V.B., Dudin, S.V. et al. Measurement of the temperature of the copper plasma generated in the process of release of a shock-compressed target. *Jetp Lett.* 94, 101 (2011). <https://doi.org/10.1134/S0021364011140086>.
114. Ogorodnikov, V.A., Mikhailov, A.L., Burtsev, V.V. et al. Detecting the ejection of particles from the free surface of a shock-loaded sample. *J. Exp. Theor. Phys.* 109, 530 (2009). <https://doi.org/10.1134/S1063776109090180>.
15. В. С. Трофимов, Г. П. Трофимова, А. Н. Дремин, Зависимость электропроводности ударно сжатого воздуха от материала поршня, *ФГВ*, 4, 1972, 490-501.

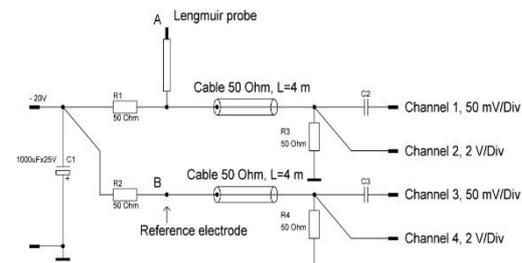


## Схема эксперимента

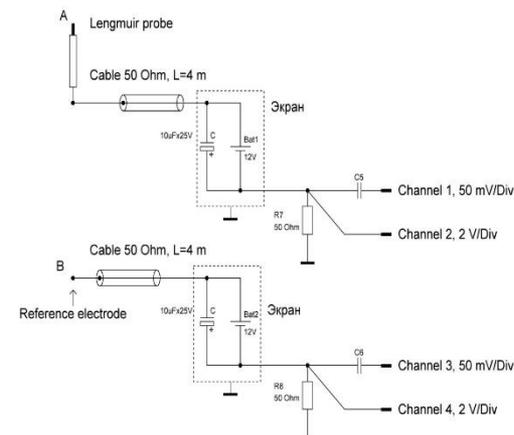


Экспериментальная сборка для измерения сигналов зонда Ленгмюра.

### Прежняя измерительная схема



### Модифицированная схема измерения





# Результаты экспериментов

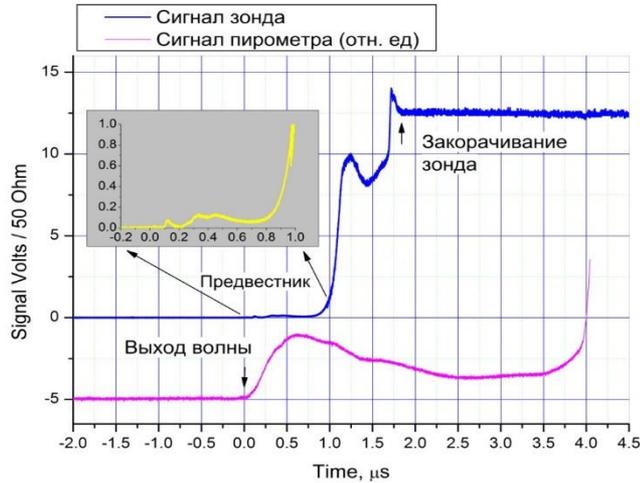
- скорость сплошной мишени  $U \approx 5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$
- скорость лидирующей части потока  $v \approx 10 \frac{\text{км}}{\text{с}}$

Ионный ток в режиме орбитального движения:

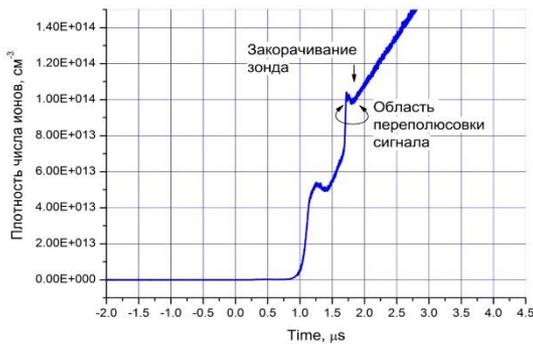
$$I_i = (dl)n_i v e \sqrt{1 - \frac{2e\phi}{m_i v^2}}$$

Для условий эксперимента ионный ток

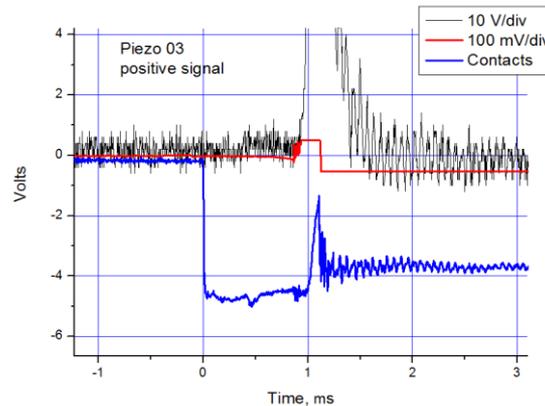
$$I_i = (dl)n_i v e$$



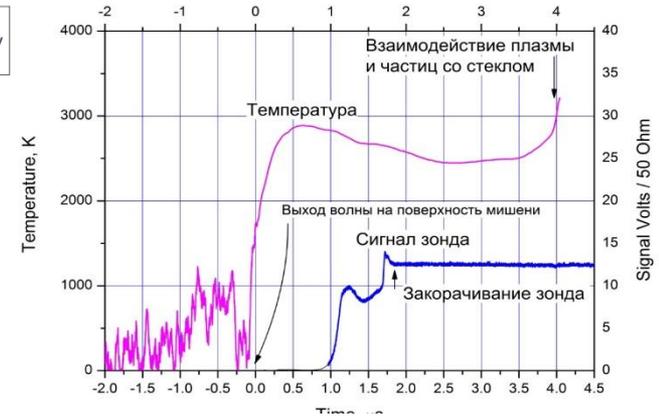
## Сигналы зонда и оптический сигнал



Плотность числа однозарядных ионов, пересекающих плоскость расположения зонда в зависимости от времени



Сигналы с пьезодатчика и контактного датчика сигнала



— Яркостная температура и сигнал зонда



# Расчет плазмы

Параметры плазмы ударно-сжатого воздуха для двух характерных скоростей поршня:  $U_1 \approx 5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$  и  $U_2 \approx 10 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ . Расчеты выполнены для начального давления воздуха  $P_0=0.0005$  бар по программе В. К. Грязнова

## Состав воздушной плазмы

Элемент	Объемная доля	Массовая доля
N	.7848	.7556
O	.2105	.2315
Ar	.0047	.0129

## Расчетные параметры плазмы

D [km/s]	5.42461E+00	1.06941E+01
U [km/s]	4.99998E+00	1.00004E+01
P [bar]	1.61632E-01	6.35839E-01
T [K]	5.55795E+03	1.12042E+04
ne	3.59246E+13	3.26582E+16
NO+	3.48178E+13	1.62728E+13
N+	3.21347E+11	2.77831E+16

Состав воздушной плазмы с объемной долей меди 10%.

Элемент	Объемная доля	Массовая доля
N	.7096	.5133
O	.1899	.1569
Ar	.1005	.3298

## Расчетные параметры плазмы с примесью меди

D [km/s]	5.39520E+00	1.07027E+01
U [km/s]	4.99997E+00	1.00006E+01
P [bar]	1.95232E-01	7.73153E-01
T [K]	5.99716E+03	1.28394E+04
ne	2.95589E+15	9.61463E+16
NO+	1.18292E+12	5.09927E+12
N+	7.39515E+10	5.34858E+16
Cu+	2.95542E+15	3.32363E+16



## Заключение

- Разработана экспериментальная сборка для измерения сигналов зонда, в которой после воздействия ударника на мишень с давлением ударного сжатия  $P=160$  Гпа формируется поток мелкодисперсных частиц и плазмы металла мишени.
- Скорость лидирующей группы частиц и плазмы составляет 10-12 км/с, а скорость мишени при этом 5 км/с.
- Электрический сигнал, который появляется при подлете потока к зонду Ленгмюра, регистрируется с высоким временным разрешением, и полезная его часть выделяется при помощи специальной схемы.
- От момента выхода ударной волны до прихода лидирующей группы потока, во всех экспериментах ясно просматривается предвестник, которому пока нет четкого объяснения.
- Проведена синхронизация сигналов с пьезодатчиков и интенсивности излучения с сигналом с зонда Ленгмюра, что подтвердило гипотезу о распределении частиц по скоростям и по размерам.
- Оценены расчетные параметры плазмы для условий эксперимента с учетом примеси ионов меди.