

Experimental Study of the Microwave (40 GHz) and Laser Radiation (1.55 μm) Transmission Through an Air-Plasma Layer behind the Shock Wave Front

N.G. Bykova¹, K.S. Gochelashvily², D.M. Karfidov², G.F. Makarenko²,
A.K. Senatorov³, K.F. Sergeichev², O.P. Shatalov¹, I.E. Zabelinskii¹

¹ Moscow State University, Institute of Mechanics, Russia, Moscow, Michurinsky prospect, 1

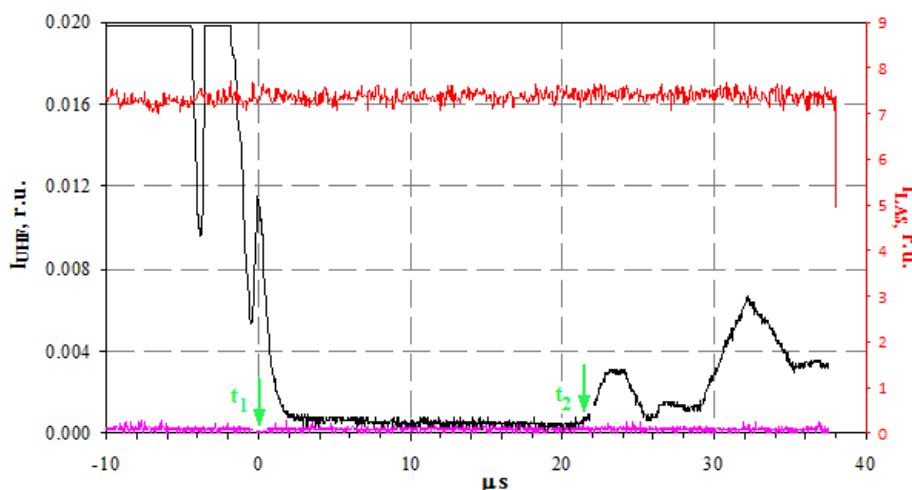
² General Physics Institute of RAS, Russia, Moscow, Vavilov str., 38

³ Fiber Optics Research Center of RAS, Russia, Moscow, Vavilov str., 38
shatalov@imec.msu.ru

Abstract

The transmission of microwave and laser radiation through the air-plasma layer behind the front of the shock wave is studied on the shock tube. The well-known fact that the plasma is not transparent for microwave radiation in the range of electron concentrations $2 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ is experimentally confirmed. At the same time, the theoretical estimates of plasma transparency for laser infrared radiation at the wavelength of 1.55 μm is first proved experimentally.

Keywords: shock wave, plasma, electrons concentration, absorption of laser radiation, absorption of microwave radiation.



Oscilloscope traces of transmission signals from the microwave detector (40 GHz, black line) and IR laser detector (1.55 μm , red line) of light passing through the plasma behind the shock wave front.

$$V_s = 7.89 \text{ km/s}, n_e = 3.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}.$$

УДК:533.6; 533.9; 535.3; 537.5

Экспериментальное исследование прохождения СВЧ (40 ГГц) и лазерного излучения (1.55 мкм) сквозь слой воздушной плазмы за фронтом ударной волны

Н.Г. Быкова¹, К.С. Гочелашвили², И.Е. Забелинский¹, Д.М. Карфидов², Г.Ф. Макаренко², А.К. Сенаторов³, К.Ф. Сергейчев², О.П. Шаталов¹

¹ НИИ механики МГУ, Москва, Мичуринский проспект, 1

² Институт общей физики РАН, Москва, ул. Вавилова, 38

³ Центр волоконной оптики РАН, Москва, ул. Вавилова, 38.

shatalov@imec.msu.ru

Аннотация

На ударной трубе исследовано прохождение СВЧ и лазерного излучения сквозь слой воздушной плазмы за фронтом ударной волны. Экспериментально подтвержден известный факт, что в диапазоне концентраций электронов $2 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, плазма не прозрачна для излучения СВЧ-сигнала (частота излучения 40 ГГц). В то же время впервые экспериментально подтверждена предсказанная ранее теоретически прозрачность воздушной плазмы для лазерного инфракрасного излучения на длине волны 1,55 мкм.

Ключевые слова: ударные волны, плазма, концентрация электронов, поглощение лазерного излучения, поглощение СВЧ излучения.

1. Введение

Прерывание радиосвязи при наличии достаточно плотного слоя плазмы на пути распространения электромагнитного сигнала является давно известной, но до сих пор нерешенной проблемой. В современных условиях эта проблема чрезвычайно актуальна в связи с прерыванием связи при входе космического аппарата в атмосферу Земли. Утрата связи привела, в частности, к аварии космического корабля Колумбия 1 февраля 2003 года [1].

Во время входа в атмосферу космический аппарат имеет орбитальную скорость $\geq 7 \text{ км/сек}$, и перед его лобовой поверхностью образуется сильная ударная волна, нагревающая воздух и приводящая к диссоциации и ионизации его молекул и атомов. Таким образом, на высотах от 100 до 40 км вокруг аппарата образуется "плазменная оболочка", которая из-за высокой плотности плазмы создает непроницаемую завесу для радиоволн, отражающую и поглощающую электромагнитные волны как ВЧ, так и СВЧ диапазона [2]. Этот слой плотной плазмы мешает приему сигналов GPS и передаче сигналов радиосвязи, что в англоязычной литературе принято называть "blackout".

Электромагнитное излучение частотой $f = \frac{\omega}{2\pi}$ при нормальных условиях не может проходить сквозь толстые слои немагнитной плазмы, если плазменная частота ω_p больше, чем частота электромагнитной волны $\omega_p > \omega$ [3],

$$\omega_p = (e^2 n_e / \varepsilon_0 m)^{1/2} = 57 \sqrt{n_e}, \quad (1)$$

где e , m – заряд и масса электрона, n_e [м⁻³] – концентрация электронов плазмы, ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума. Плотность электронов в плазменном слое вокруг поверхности спускаемого аппарата в атмосфере может достигать значений, превышающих $10^{18} - 10^{20}$ м⁻³. При таких высоких значениях плотности плазменная частота может значительно превышать частоты полос радиосвязи, соответствующие приблизительно 1 ÷ 40 ГГц. Но потеря связи может также произойти для радиоволны с частотой выше плазменной вследствие сильного затухания из-за высокой частоты столкновений электронов ν с нейтральными частицами воздуха,

$$\nu \approx \frac{5,8 \times 10^{12} p}{T^{1/2}}, \quad (2)$$

где T – температура газа (К), p – давление (атм).

Когда электромагнитная волна падает на плазменную оболочку, её отражение и затухание зависят от отношений плазменной частоты и частоты столкновений электронов к частоте волны ω_p / ω и ν / ω . Поэтому легко видеть, что единственный способ устранить блекаут является удовлетворение условию $\omega_p < \omega \gg \nu$, т.е. увеличение частоты радиосвязи.

Электромагнитная волна, распространяющаяся в прозрачной плазме, имеет низкий декремент затухания благодаря соотношению $\nu / \omega \ll 1$. Плазма, имеющая плотность n_e больше критической n_{ce} для заданной микроволновой частоты, $n_e > n_{ce}$, отражает электромагнитную волну от плазменного слоя. Критическая частота плазмы n_{ce} определяется из равенства радио- и плазменной частот:

$$n_{ce} = \varepsilon_0 m \omega^2 / e^2. \quad (3)$$

В настоящей работе плазма зондируется излучением от двух источников: СВЧ-излучением на частоте 40 ГГц и излучением лазера в области ближнего инфракрасного диапазона (NIR) с частотой 194 ТГц ($\lambda = 1.45$ мкм).

Выбранная для нашего эксперимента частота 40 ГГц близка к предельной частоте 50 ГГц, которую можно использовать в практике микроволновой коммуникации. В частности, это подтверждается многочисленными работами по численному моделированию прерывания радиосвязи при входе аппарата в атмосферу Земли. Частота 40 ГГц соответствует критическому значению плотности плазмы $n_{ce} \approx 2 \cdot 10^{19}$ м⁻³, которая уже близка к максимальной плотности плазмы в ударном слое в атмосфере $\sim 10^{20}$ м⁻³. Использование диапазона спектра 0,1 – 10 ТГц между СВЧ-диапазоном и дальней инфракрасной областью не представляется возможным из-за сильного влияния водяного пара в атмосфере. Кроме того, этот диапазон спектра не имеет развитой технологии связи. Таким образом, только ближний инфракрасный диапазон спектра NIR, по-видимому, является приемлемым для преодоления плазменного барьера.

2. Обзор методов преодоления плазменного барьера

Подробный обзор основных подходов к преодолению плазменного барьера сделан в работе [4]. В их числе использование статических магнитных полей [5–9] для создания окон прозрачности в плазменной завесе благодаря использованию дрейфа плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, а также преобразование радиоволн в свистовые волны, способные проникать сквозь плотную плазму [10,11], наконец, применение инъекции

в плазменный слой электрофильной жидкости [12] или порошка керамических частиц (из оксидов металлов) [13], активирующих рекомбинацию плазмы. Численное моделирование задачи ускорения зарядов в скрещенных полях $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ в слое плотной плазмы [2] показывает, что дрейф электронов в перпендикулярном направлении к векторам \mathbf{E} и \mathbf{B} инициирует сильные электрические поля и ускорение ионов, которое приводит к уменьшению плотности плазмы. К сожалению, это уменьшение не превышает одного порядка величины и, например, для установления связи со спускаемым в атмосферу аппаратом этот метод нельзя считать эффективным, так как что он применим только на больших высотах (60-80 км), где частота столкновения электронов мала, и он становится совсем неприемлемым, когда аппарат входит в плотные слои атмосферы.

Есть и другие идеи, например, использование самого слоя плазмы в качестве гигантской антенны, или использование специфических резонансных свойств плазмы, чтобы плазму сделать как бы «прозрачной». В частности, в работе [14] предлагается использовать эффект взаимодействия двух электромагнитных волн различных частот, направленных на плазменный слой с противоположных сторон, причем для падающей извне волны плазменный слой является непрозрачным. Волна с внешней стороны отражается от плазменного слоя, но создает локальный резонанс поля на фронтальном профиле плотности плазмы там, где выполняется условие $\omega = \omega_p$. Вторая волна, исходящая с противоположной стороны слоя (со стороны детектора излучения), распространяясь внутри слоя, рассеивается на возмущении плотности, созданном плазменным резонансом первой волны. Возвращаясь обратно к детектору излучения, рассеянное излучение второй волны в своем спектре содержит информацию от падающей извне волны, после чего эта информация декодируется. Авторы [14] в своих расчетах рассматривают волны с частотой 2,2 ГГц (внешний источник) и 14 ГГц (детектор). Выбор частоты 14 ГГц, продиктованный необходимостью получения максимальной эффективности комбинационного эффекта при взаимодействии волн, дает, тем не менее, низкое значение коэффициента преобразования $\sim 10^{-5}$. Помимо сказанного почему-то считается, что радиоволны 14 ГГц могут свободно распространяться внутри плазмы за фронтом ударной волны. Вероятнее всего это не так. В работе [15] численными методами подробно исследовались отражение, дифракция и затухание электромагнитных волн в плазменной оболочке на фронте сильной ударной волны перед транспортным аппаратом на различных высотах. Был определен диапазон частот, в котором наступает потеря радиосвязи со спускаемыми капсулами, имеющими тупые лобовые формы. Показано, что плотность плазмы на фронте ударной волны характеризуется сильной пространственной неоднородностью, которая непрерывно меняется во время спуска космического аппарата подобно струящемуся пламени, так как атмосферное давление и вместе с ним частота столкновений электронов растут. На этом фоне комбинационные эффекты взаимодействия двух радиоволн будут чрезвычайно нестабильны, что практически исключает возможность использования предлагаемого механизма связи, по крайней мере, со спускаемым космическим аппаратом, посредством радиоволн разных частот [14]. Таким образом, существенное увеличение частоты связи над частотами ВЧ и СВЧ диапазонов остается пока единственным перспективным направлением для решения этой проблемы.

Если иметь в виду, что плотность плазмы может достигать значения 10^{22} м^{-3} , то естественным должен быть вывод, что связь должна быть перенесена в диапазон терагерцового (ТГц) излучения или принадлежать уже хорошо освоенному диапазону ИК-лазерной коммуникации. Как отмечалось выше, применение для дальней связи спектральной полосы 0,1–10 ТГц ограничено сильным поглощением волн в атмосфере парами воды и радикалами ОН. Зато логично использовать с этой целью когерентное лазерное излучение в области ближнего инфракрасного диапазона (NIR) в окнах прозрачности атмосферы [16]. Минимальное поглощение ИК-излучения приходится на длины волн 1,31 и 1,55 мкм, и это уже широко используется для телекоммуникаций в свободном пространстве между спутниками Земли.

В работе [17] был выполнен, вероятно, первый эксперимент по прохождению лазерного луча через плазму, в котором использовался гелий-неоновый лазер в видимом диапазоне с длиной волны 630 нм. Плазменный слой был образован на поверхности диска диаметром 9 см направленной на него струей плазмы, созданной генератором мощностью 8 МВт. Эксперименты показали незначительное влияние плазменного слоя на прохождение лазерного луча, что подтверждает высказанные выше соображения. Однако эти эксперименты нельзя рассматривать как доказательство возможности установления линии лазерной связи сквозь плазменный слой с высокой концентрацией заряженных частиц, поскольку информация о концентрации заряженных частиц, достигнутой в слое перед мишенью, в [17] отсутствует. Наша оценка на основе отсечки прохождения использованного в [17] 10-сантиметрового излучения дает концентрацию плазмы 10^{15} – 10^{16} м⁻³, что значительно меньше, чем, например, в условиях спуска аппарата в атмосферу Земли (более чем 10^{19} м⁻³).

Численное моделирование использования оптического сигнала для преодоления плазменного барьера было выполнено также в работе [18]. Теоретические оценки и результаты моделирования [18] показали, что для лазерного излучения с длиной волны 532 нм влияние плазменной оболочки спускаемого аппарата на передачу оптического сигнала незначительно.

На сегодняшний день состояние лазерной коммуникационной технологии в космосе достигло высокого уровня развития [19–21]. Использование лазерной связи в ИК диапазоне длин волн в космосе становится привлекательной альтернативой эксплуатируемой СВЧ связи. Ее главное преимущество состоит в широкой полосе частот и, следовательно, в пропускной способности, которая увеличивается пропорционально значению несущей частоты, а также в весе, размере и в потребляемой мощности оптического приемопередающего модуля по сравнению с модулями СВЧ приемопередатчиков.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке теоретических и экспериментальных данных о прозрачности воздушной плазмы за фронтом ударной волны с концентрацией электронов 10^{12} – 10^{14} см⁻³ для СВЧ излучения с частотой 40 ГГц и для лазерного излучения на длине волны $\lambda=1,55$ мкм (частота 194 ТГц).

3. Методика эксперимента

Эксперименты выполнялись на цилиндрической ударной трубе [22] с внутренним диаметром 50 мм. Труба (рисунок 1) состоит из камеры высокого давления (КВД) и камеры низкого давления (КНД). Медная диафрагма (1) толщиной 0.13 – 0.31 мм разделяет КВД и КНД. Камера КВД длиной 0.7 м заполнялась гремучей смесью, разбавленной гелием в соотношении: 40-50% ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$) + He (остальное). Смесью воспламенялась при помощи автомобильной свечи зажигания (2) расположенной в торце КВД. Камера низкого давления длиной 4.0 м заполнялась воздухом при давлении 0.15 - 9 мм.рт.ст. В момент срабатывания поджигающей свечи происходил взрыв гремучей смеси и разрыв диафрагмы. Ударная волна, возникающая в камере низкого давления, распространялась со скоростью 3-8 км/с. КНД завершается демпферным баком (3), имеет устройства (4, 5) для напуска и контроля газа в КНД. Для измерения скорости фронта падающей ударной волны в двух последовательных измерительных секциях ударной трубы установлены пьезодатчики импульсного давления (6) (Dytran 2300V4). В этих же секциях установлены две пары окон (7) для оптических и СВЧ измерений. Погрешность измерения скорости не превышает 1%, что следует из неопределенности геометрических и временных факторов (точности установки, размеров и реакции инерции датчиков). В зависимости от скорости ударной волны температура непосредственно за ударно-волновым фронтом достигает 15000 К. Окна (7) в измерительных секциях изготовлены из кварца. КНД с демпферным баком 3 предварительно откачивались турбомолекулярным насосом (HiPace 80) (8) в паре с форвакуумным насосом (ISP-250CSV)

(9) до остаточного давления 2×10^{-5} мм рт.ст. Рост давления газа в КНД из-за натекания через вакуумные уплотнения и десорбции со стенок трубы составляет менее 1×10^{-5} мм рт.ст./мин.

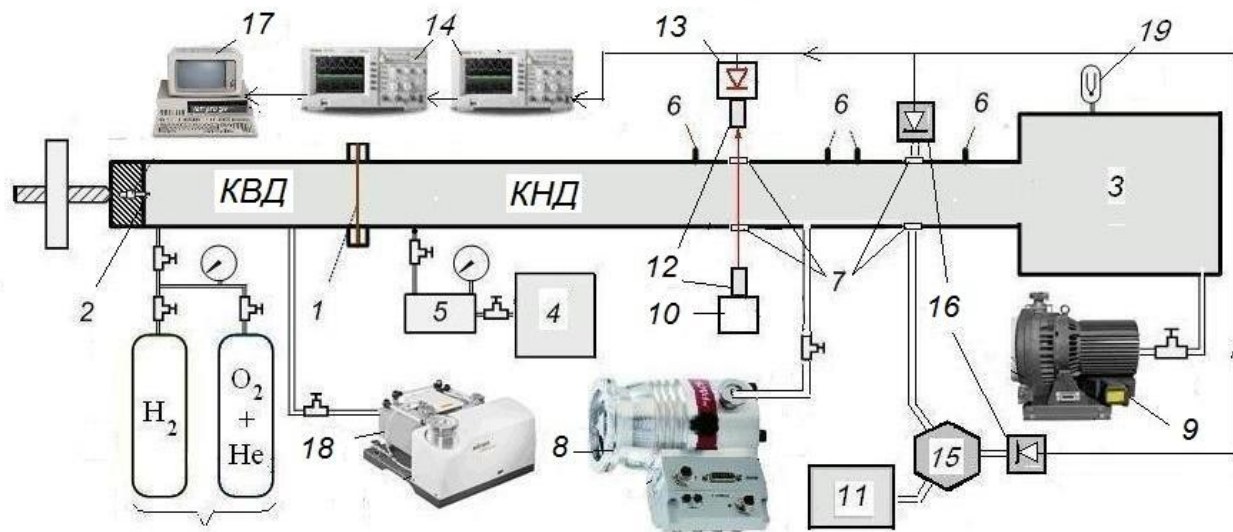


Рис. 1. Схема ударной трубы УТС и экспериментального оборудования

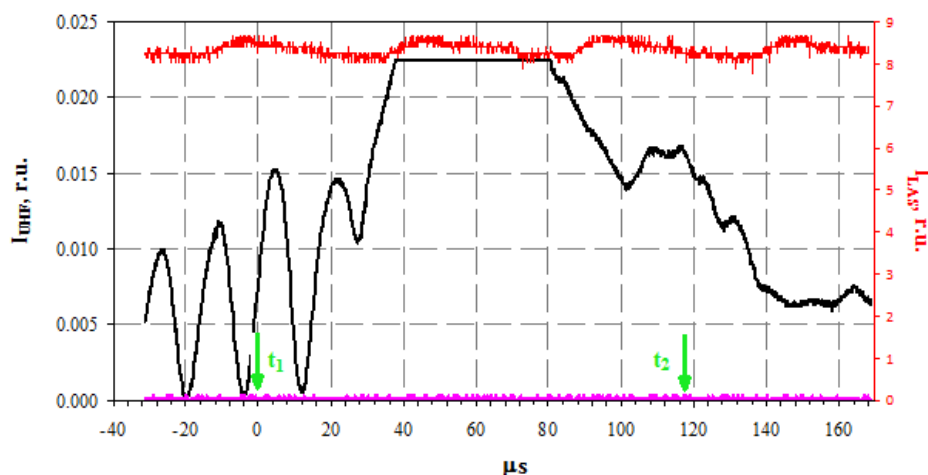
1-медная диафрагма; 2-свеча зажигания; 3-демпферный бак; 4, 5-напуск и регулировка давления исследуемого газа; 6-пьезодатчики динамического давления для измерения скорости ударной волны; 7-смотровые оптические окна; 8-турбомолекулярный насос (тип NiPace80); 9-форвакуумный спиральный насос (тип ISP-250CSV); 10-полупроводниковый лазер непрерывного действия (NIR); 11-генератор СВЧ-излучения (Г4-30); 12-коллиматор (selfokon); 13-германиевый диод (ЛФД-2); 14-цифровые осциллографы (DSO 5014 и 54624A, фирмы Agilent); 15-ферритовый циркулятор; 16-СВЧ-диоды; 17-персональный компьютер; 18-откачной пост (DRYTEL 1025 фирмы ALCATEL) для откачки КВД; 19-датчик контроля напуска давления исследуемого газа в КНД (Баратрон-ёмкостной вакуумный датчик фирмы MKS Instruments)

В процессе эксперимента ударная волна, проходящая мимо смотровых окон (7), просвечивалась лучом полупроводникового лазера непрерывного действия NIR (10) с длиной волны 1.55 мкм, а также излучением от непрерывного СВЧ источника частотой 40 ГГц (11). Излучение лазера (10) вводилось через секцию одномодового оптоволокна (SMF) в коллиматор (12) (selfokon), в котором расходящийся лазерный луч преобразовывался в параллельный пучок, направленный через окна (7) поперек ударной трубы. Диаметр пучка на выходе коллиматора $\leq 1,5$ мм. Пройдя через ударную трубу, луч попадал в приемный тракт через аналогичный коллиматор (12), и затем по оптоволокну на германиевый диод (13) (ЛФД-2), используемый в качестве приемника. Нагрузкой для диода служил резистор в выходной цепи. Сигнал, пропорциональный фототоку, регистрировался на цифровом осциллографе (14), который синхронизирован с моментом детонации смеси в КВД. Зондирующее СВЧ-излучение от генератора (Г4-30) – (11) проходило через ферритовый циркулятор (15) и затем по волноводам во входной канал второй пары измерительных окон (7). Сигналы прошедшего сквозь плазму СВЧ излучения попадали на диод (16) и далее регистрировались осциллографом (14). СВЧ-излучение, отраженное от плазмы ударной волны, также регистрировалось диодным детектором (16). Все сигналы лазерного и СВЧ излучения обрабатывались на персональном компьютере (17). Начальное давление в КНД и в демпферном баке регистрировалось датчиком (19), точность измерения начального давления газа составляла 1.0%.

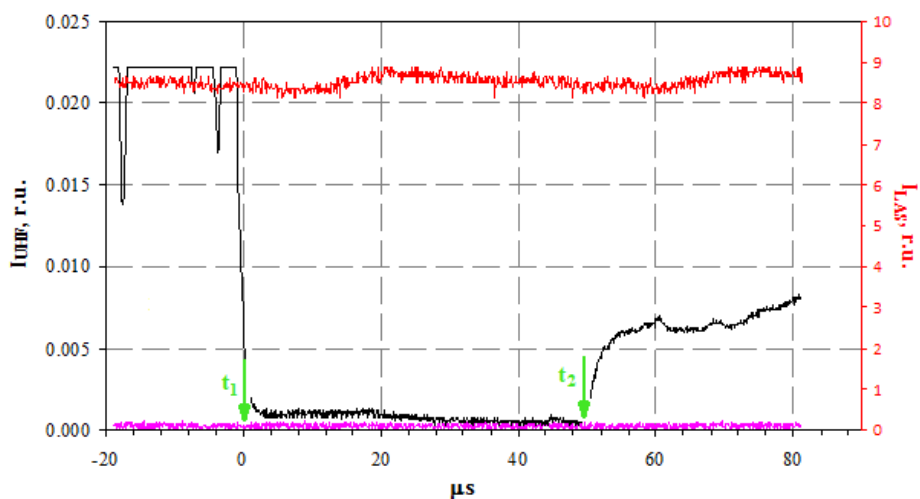
4. Результаты и обсуждение

Эксперименты выполнялись при давлении воздуха перед фронтом ударной волны от 0.15 до 9 мм рт.ст. Скорость ударной волны менялась в каждом эксперименте, ее измерение проводилось с помощью двух пар датчиков (6). Начальные условия эксперимента (состав газа, давление и скорость ударной волны) позволяют оценить равновесные параметры плазмы за фронтом ударной волны в каждом эксперименте (температуру T_2 , концентрацию электронов в плазме n_e и т.д.). Эти данные были получены с помощью программы компьютерного моделирования сверхзвуковых потоков, описанной в [23].

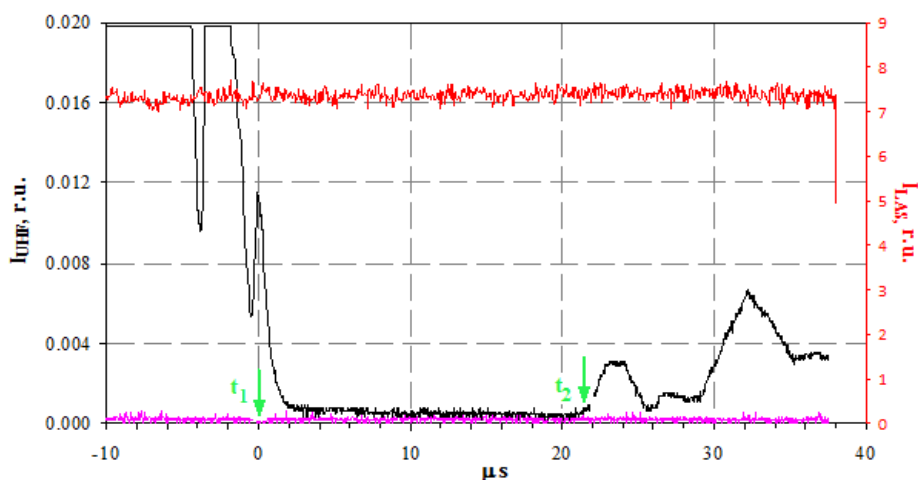
На рисунках 2 (а, б, в) представлены типичные образцы сигналов СВЧ и NIR излучения, прошедших через плазму ударной волны, которые отличаются скоростями фронта ударной волны и, как следствие, значениями плотности плазмы за фронтом волны.



а



б



6

Рис. 2 Осциллограммы сигналов СВЧ- (40 ГГц, черный сигнал) и ИК- (1,55 мкм, красный сигнал) излучения, просвечивающих плазму за фронтом ударной волны

- а) Ударная волна $V_s = 2,93$ км/с; $p_1 = 9,0$ мм.рт.ст.; $n_e \approx 2,0 \times 10^{11}$ см⁻³;
- б) Ударная волна $V_s = 4,12$ км/с; $p_1 = 9,0$ мм.рт.ст.; $n_e \approx 2,0 \times 10^{13}$ см⁻³;
- в) Ударная волна $V_s = 7,89$ км/с; $p_1 = 0,25$ мм.рт.ст.; $n_e = 3,7 \times 10^{14}$ см⁻³

На рисунке 3 представлены результаты 11 серий измерений, выполненных при начальном давлении газа 9 и 2 мм рт.ст. и скоростях ударной волны от 2.9 до 6 км/с. На рисунке дана концентрация электронов в ударной волне n_e (кривая 1, с отсчетом значений по левой шкале ординат) и относительная прозрачность волны I/I_0 для прохождения лазерного и СВЧ излучения (кривые 2 и 3, соответственно, с отсчетом значений по правой шкале ординат) в зависимости от скорости движения фронта ударной волны. Кривые построены раздельно для значений начального давления газа 9 и 2 мм рт.ст. как параметра. При скоростях 4.12 – 4.7 км/с в этом интервале давлений измерений не проводилось.

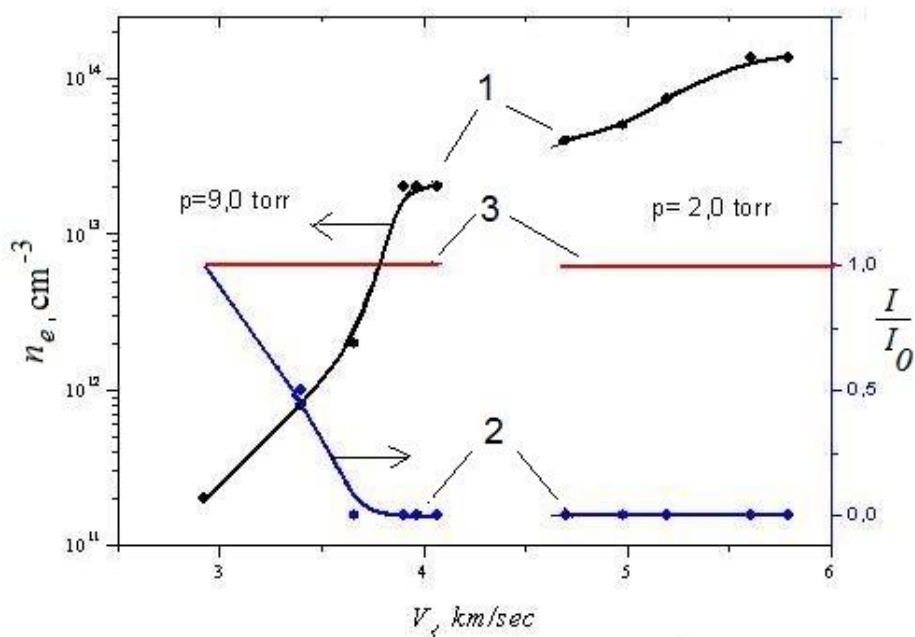


Рис. 3 Графики плотности электронов n_e - кривая 1, относительной прозрачности плазмы I/I_0 для СВЧ (40 ГГц) - кривая 2, и лазерного излучения (1.55 мкм) - кривая 3 в зависимости от скорости фронта ударной волны V_s для двух значений давления газа 9 и 2 мм рт.ст.

Значения коэффициента прозрачности I/I_0 на рисунке 3 можно соотносить с концентрацией плазмы (кривая 1) при выбранных значениях скорости ударной волны и давления. Из рисунка видно, что с увеличением скорости ударной волны от 2,9 км/с ($n_e = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) до 3,6 км/с ($n_e = 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$) интенсивность прошедшего через плазму СВЧ излучения I/I_0 падает от 1 до 0, и далее плазма остаётся полностью непрозрачной для этого излучения. В то время лазерный луч проходит через плазму абсолютно без изменений. Критическая концентрация плазмы, при которой должна наступать отсечка проходящего СВЧ на детектор сигнала согласно условию $\omega = \omega_p$ для $f = 40 \text{ ГГц}$ составляет $n_{ec} \approx 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Однако СВЧ сигнал принимает нулевое значение уже при концентрации на порядок меньше, что связано со спецификой распространения волн в полых волноводах.

Известно, что если выполняется неравенство (4)

$$n_e / n_{ecl} < v_{ea} / \omega_l \quad (4)$$

между относительной концентрацией электронов плазмы n_e/n_{ecl} (n_{ecl} – критическая концентрация плазмы для частоты ИК лазера ω_l), и отношением частоты столкновений электронов к частоте лазера, то затухание лазерного излучения определяется формулой [24]:

$$\alpha L = \frac{1}{2} kL \frac{n_e}{n_{ecl}} \frac{v_e / \omega_l}{1 + (v_e / \omega_l)^2}, \quad (5)$$

где α – постоянная затухания при распространение электромагнитной волны через плазму, k – волновое число, т.е. постоянная распространения волны в однородной плазме. Даже если гипотетическая толщина плазмы L достигает ~ 1 м, ослабление зондирующего лазерного излучения оказывается пренебрежимо малым и не превышает 2%. Это означает, что высокая концентрация плазмы и высокий уровень частоты столкновений электронов в плазме ударной волны не смогут существенно ослабить сигнал лазерной телекоммуникации.

5. Выводы

Результаты выполненных в настоящей работе экспериментов показали способность когерентного лазерного излучения на длине волны 1,55 мкм проходить сквозь слой плотной воздушной плазмы, непреодолимый для СВЧ сигнала, с концентрацией электронов $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Этот результат может найти применение для многих научных и практически важных приложений, в частности служить основой для преодоления проблемы прерывание связи космического аппарата с наземными станциями или навигационными спутниками во время спуска в широком диапазоне скоростей и на всей траектории спуска.

Авторы выражают искреннюю благодарность С.Т. Суржикову за предоставленную возможность использовать его программу численного моделирования сверхзвуковых газовых потоков, а также А.А. Сисолятину, П.В. Козлову и Ю.В. Акимову за помощь в выполнении данной работы.

Литература

1. Australian Space Academy, "Spacecraft reentry communications blackout", <http://www.spaceacademy.net.au/spacelink/blackout.htm>

2. Kim M., Keidar M., Boid I.D. Two-dimensional Model of an Electromagnetic Layer for the Mitigation of Communications Blackout. AIAA-Paper 2009-1232. 2009.
3. Heald M.A., Wharton C.B. Plasma diagnostics with microwaves. John Wiley & Sons Inc., New York, 1978. 452 p.
4. Hartunian R.A., Stewart G.E., Ferguson S.D., Curtiss T.J., and Seibold R.W. Cause and Mitigations Radio Frequency (RF) Blackout During re-entry of Reusable Launch Vehicles. Aerospace Corporation, ATR-2007(5309)-1. 2007.
5. Kundrapu M., Loverich J., Beckwith K., Stoltz P., Shashurin A., and Keidar M. Modeling radio communication blackout and blackout mitigation in hypersonic vehicles// Journal of Spacecraft and Rockets. 2014. V.52. P. 853-862.
6. Hodara H. The use of magnetic fields in the elimination of the re-entry radio blackout. Proc. IRE. 1961. V.49. P. 1825-1830.
7. Manning R.M. Analysis of electromagnetic wave propagation in a magnetized re-entry plasma sheath via the kinetic equation., NASA/TM-2009-216096. 2009.
8. Thoma C., Rose D.V., Miller C.L., Clark R.E., and Hughes T.P. Electromagnetic wave propagation through an overdense magnetized collisional plasma layer // J. Appl. Phys. 2009. V.106. 043301.
9. Starkey R.P. Electromagnetic wave/magnetoactive plasma sheath interaction for hypersonic vehicle telemetry blackout analysis. AIAA-Paper 2003-4167. 2003.
10. Stenzel R.L. Whistler wave propagation in a large magnetoplasma // Phys. Fluids. 1976. V19. P. 857-864.
11. Usui H., Matsumoto H., Yamashita F., Yamane M., and Takenaka S. Computer experiments on radio blackout of a reentry vehicle. AFRL-VS-TR-20001578. 2000. P.107-110.
12. Shroeder L.C., Russo F.P. Flight Investigation and Analysis Alleviation of Communications Blackout by Water Injection During Gemini 3 Reentry. NASA TM X-1521. 1968.
13. Gillman E.D., Foster J.E., and Blankson I.M. Review of leading approaches for mitigating hyper-sonic vehicle communications blackout and a method of ceramic particulate injection via cathode spot arcs for blackout mitigation. NASA TM-2010-216220. 2010.
14. Korotkevich A.O., Newell A.C., Zakharov V.E. Communication through Plasma Sheaths// Journal of Applied Physics. 2007. V.102. 083305. DOI: 10.1063/1.2794856
15. Takahashi Y., Yamada K., and Abe T. Examination of radio frequency blackout for an inflatable vehicle during atmospheric reentry// J. Spacecr. Rockets. 2014. V.51. P.430-441.
16. Prokhorov A.M., Bunkin F.V., Gochelashvily K.S., Shishov V.I. Laser irradiance propagation in turbulent media. Proc. IEEE 63. P. 790-811. 1975.
17. Barr T.A., Cason Ch. Laboratory Simulation of Laser Communications from a Reentry Vehicle. The Space Congress. Proceedings. (5th). The Challenge of the 1970's. P. 9.4-1 - 9.4-5. 1968. <http://commons.erau.edu/space-congress-proceedings/proceedings-1968-5th/session-9/2>
18. Hang J.I., Yong M.A., Chao M.A., Lin J., and Wang H. Transmission of optical signal in the plasma sheath of reentry vehicle. Proc. SPIE 6795, 67955E. 2007.
19. Leeb W.R. Laser Space Communications: Systems, Technologies, and Application // Rev. Laser Eng. 2000. V.28. P. 804-808.
20. Cornwell D.M. NASA's Optical Communications Program for 2015 and beyond. Proc. SPIE. 9354. 2015.
21. Rabinovich W.S., Moore C.I., Mahon R., Goetz P.G., R. Burris H., Ferraro M.S., Murphy J.L., Thomas L.M., Gilbreath G.C., M. Vilcheck, and Suite M.R. Free-space optical communications research and demonstrations at the U.S. Naval Research Laboratory//Appl. Opt. 2015. V.54. P. F189-F200.
22. Быкова Н. Г., Герасимов И. Г., Забелинский И. Е., Ибрагимова Л. Б., Шаталов О. П. Исследование ударно-нагретого воздуха в спектральной области 120-900 нм: панорамный спектр и эволюция излучения за фронтом ударной волны//Физико-химическая кинетика в

- газовой динамике. 2014. Т.15, вып. 2. 7с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-2/articles/114/>.
23. Shang J.S., Surzhikov S.T. Nonequilibrium radiative hypersonic flow simulation// Progress in Aerospace Sciences. 2012. V.53. P. 46–65.
24. Ramo S., Whinnery J.R. Fields and Waves in Modern Radio. 2nd Ed. By J. Wiley&Sons Inc. 1953. 576 p.

Статья поступила в редакцию 13 июня 2017 г.