

CONTINUOUS OPTICAL
DISCHARGE:
GENERATION AND
SUPPORT OF DENSE
LOW-TEMPERATURE
PLASMA BY LASER
IRRADIATION

Yu. P. RAIZER

The maintaining of stable plasma with the help of the focused CO₂-laser is analyzed. The article describes the generation of the plasma beam (or, optical plasmatron) and outlines general ideas concerning its action. A simple estimation of the necessary power is presented. Possible applications of laser devices are discussed.

Рассматривается поддержание стационарной плазмы сфокусированным излучением непрерывного CO₂-лазера, а также генерация плазменной струи – оптический плазмотрон. Даются общие представления об эффекте и простая оценка необходимой лазерной мощности, рассказывается о возможных приложениях.

© Райзэр Ю.П., 1996

НЕПРЕРЫВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД – ПОДДЕРЖАНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ ПЛОТНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ю. П. РАЙЗЕР

Московский физико-технический институт

ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛОТНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Прочтя название “низкотемпературная плазма”, не следует представлять себе нечто холодное. Тем более не следует удивляться тому, что так называют плазму с температурой порядка 10000 градусов. Употребляя этот термин, отличают такую плазму от высокотемпературной, которая присутствует в экспериментах по термоядерному синтезу. У высокотемпературной плазмы температура выше 1 миллиона градусов. Под термином “плотная” подразумевают, что это плазма с давлением порядка атмосферного.

Чаще всего плазма атмосферного давления равновесна. Это означает, что температура электронного газа и температура газа тяжелых частиц (атомов, ионов) почти одинаковы, и степень ионизации определяется исключительно температурой и давлением вне зависимости от механизмов и скоростей рождения и гибели зарядов. Термодинамическое равновесие всегда устанавливается в результате компенсации прямых и обратных кинетических процессов, а в плотном газе все процессы протекают быстрее. Потому равновесие и устанавливается, несмотря на действие электрического поля, которое стремится вывести газ из состояния термодинамического равновесия.

Плотную низкотемпературную плазму обычно получают в газовых разрядах, в постоянном или переменном электрических полях. Ее получение и свойства являются объектом огромного множества исследований. В немалой степени это связано с тем, что плотная низкотемпературная плазма присутствует и ее применяют во многих практически важных процессах: дуговая сварка и резка конструкций, дуговая плавка в металлургии, производство тугоплавких веществ, абразивных материалов и т.д. Чаще всего в приложениях применяют устройства, которые называют плазмотронами. Плазмотрон – это генератор низкотемпературной плазмы. Через горящий разряд продувают холодный газ, в разряде

РАЙЗЕР Ю.П. НЕПРЕРЫВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД

он превращается в плазму и вытекает в виде плазменной струи. Для многих технологий в холодный газ подмешивают вещество, скажем, порошок, который должен подвергнуться тепловому и плазмохимическому воздействию в разряде. Каждому типу плазмотрона соответствует аналогичный разряд в неподвижном газе. В этом случае разряд горит в определенной массе газа, поддерживается в ней электрическим полем. Выделившееся в плазме джоулево тепло тока отводится при этом в стенки разрядной камеры, преимущественно теплопроводностным механизмом, отчасти тепловым излучением. В плазмотроне выделяющаяся энергия затрачивается на превращение холодного газа в плазму и выносится из разряда вместе с нею.

Для поддержания и генерации плотной низкотемпературной плазмы традиционно применяют электрические поля условно трех частотных диапазонов. Разряд в постоянном поле, как правило, дуговой, соответственно и плазмотрон называют дуговым (рис. 1 a). Это наиболее распространенный генератор плазмы, который широко применяется в технике и технологии. Мощности дуговых плазмотронов бывают самыми разными: от сотен ватт до нескольких мегаватт. В высокочастотном (ВЧ) плазмотроне – его еще называют индукционной плазменной горелкой (рис. 1 b) – применяются поля мегагерцевого диапазона частот. Переменный ток,

пропускаемый через катушку-индуктор, которая может состоять и из двух – четырех витков, своим магнитным полем индуцирует круговые электрические поля и токи, которые и поддерживают разряд. Ценнейшим преимуществом высокочастотных плазмотронов – и оно используется в производстве сверхчистых материалов – является отсутствие электродов. Благодаря этому создается стерильно чистая плазма. В дуговом разряде плазма обычно загрязнена продуктами разрушения электродов (в основном катода). Промышленные индукционные установки имеют мощность в несколько десятков киловатт. В СВЧ-плазмотроне применяют электромагнитное поле гигагерцевого диапазона частот (сантиметровые волны). СВЧ-излучение по волноводу передается к прозрачной для него диэлектрической трубке, в которой горит разряд и через которую продувают газ (рис. 1 v). Разряд также безэлектродный; обычная мощность – несколько киловатт.

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СПОСОБА ПОДДЕРЖАНИЯ И ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ

Разряд в оптическом диапазоне частот электромагнитного поля – явление сравнительно новое. Даже к самому сочетанию слов “оптический разряд” привыкли не так давно. Тем не менее оно отражает сущность физического процесса в той же мере,

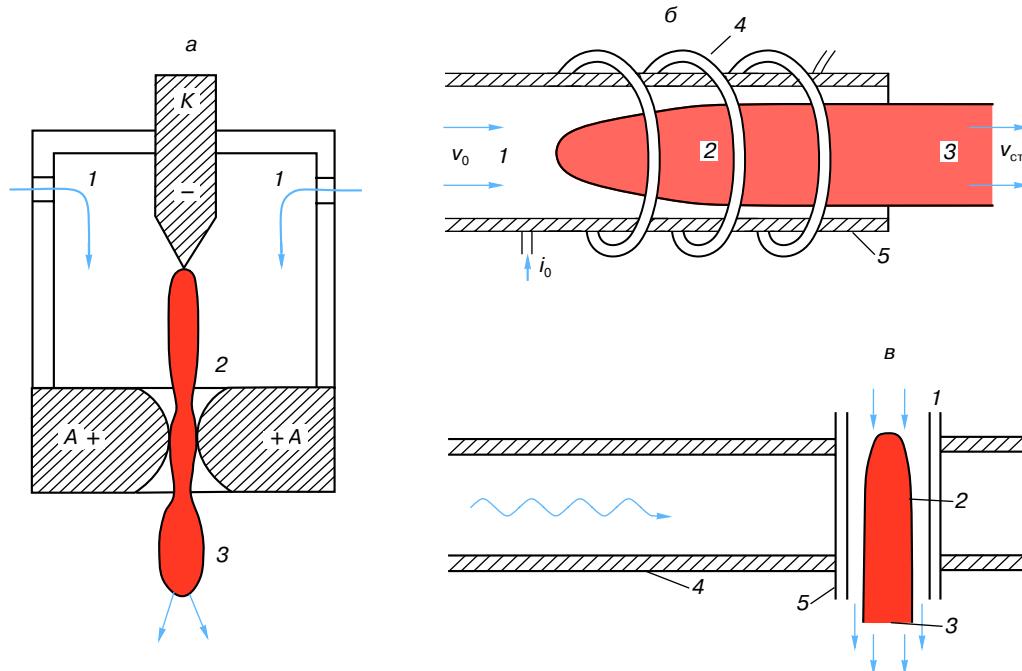


Рис. 1. Принципиальные схемы плазмотронов: а – дугового: плазменная струя 3 вытекает через отверстие в аноде А, К – катод, 1 – подача холодного газа, 2 – разряд; б – индукционного: 4 – индуктор, 5 – диэлектрическая трубка; в – СВЧ: 4 – волновод, остальные обозначения, как в а и б.

как и давно укоренившиеся термины “СВЧ-, ВЧ-разряд”. Плотную равновесную плазму можно стационарно поддерживать оптическим излучением, так же как и другими постоянными и переменными полями. Точно так же, продувая через области разряда холодный газ, можно сделать генератор плазмы — оптический плазмотрон. Возможность осуществления таких процессов была предсказана и теоретически обоснована в 1970 году [1], и в том же году непрерывный оптический разряд (НОР) был получен на опыте [2]. Это было сделано в Институте проблем механики Академии наук СССР (ныне ИПМ РАН). Немедленно после первых публикаций исследования были подхвачены в США, Польше, Германии (в то время Западной). Продолжались они и в ИПМ.

Для поддержания плазмы требуются довольно большие мощности излучения. Если стремиться к длительному эффекту, как это получается во всех других полях, пока можно рассчитывать только на излучение CO₂-лазера, ибо это единственный практический доступный мощный лазер непрерывного действия. Благодаря счастливому стечению обстоятельств, тот факт, что лазер на CO₂ дает длинноволновое инфракрасное излучение ($\lambda = 10,6$ мкм), для данной цели является чрезвычайно благоприятным. Коэффициент поглощения света в плазме μ_ω быстро падает с ростом частоты ω . Видимое излучение, например, поглощается в плазме атмосферного давления довольно слабо. Для снабжения плазмы необходимой энергией за счет поглощения видимого света или света неодимового лазера ($\lambda = 1,06$ мкм) потребовались бы мощности в 100 — 1000 раз большие, чем мощность CO₂-лазера.

Физическая причина уменьшения μ_ω с ростом ω состоит в следующем. Переменное электрическое поле волны раскачивает электрон в период между его столкновениями с атомами. При столкновении электрон резко меняет направление своего движения, фаза его вынужденных колебаний в поле волны “сбивается” и колебания как бы начинают раскачиваться заново. Приобретаемая от поля колебательная энергия электронов при столкновениях переходит в энергию их хаотического движения, то есть в электронное “тепло”. Такую же энергию электромагнитная волна теряет, в чем и проявляется поглощение излучения. Но как следствие второго закона Ньютона, амплитуда скорости колебаний частицы под действием осциллирующей силы $V \sim \omega^{-1}$, а ее кинетическая энергия колебаний $\varepsilon \sim mV^2/2 \sim \omega^{-2}$. Поэтому и коэффициент поглощения электромагнитной волны, пропорциональный поглощаемой энергии, $\mu_\omega \sim \omega^{-2}$.

Оптический способ снабжения плазмы энергии обладает особенностью, которая отличает его от всех прочих. Для подвода энергии к плазме не нужны конструктивные элементы: электроды, индуктор, волновод. Оптическое излучение можно транс-

портировать световым лучом прямо через свободное пространство или атмосферу любого газа, и эта возможность представляется привлекательной и перспективной для приложений. В принципе оптический разряд можно зажечь в любом месте, вдали от каких-либо твердых предметов, можно заставить разряд бежать по лучу, а можно локализовать его путем фокусировки излучения и тем самым стабилизировать. Можно двигать плазму в пространстве, передвигая луч, скажем фокус, к которому “привязан” разряд. Можно создать оптический плазмотрон, продувая холодный газ через стабилизированный фокусировкой луча разряд, и получать непрерывную плазменную струю высокой температуры. Температура плазмы в оптическом разряде даже в стандартных условиях существенно выше, чем в других, — 15000 — 20000 К, тогда как в дуговом разряде обычно 7000 — 8000 К, в ВЧ-разряде — 9000 — 10000 К. Наконец, благодаря высокой температуре оптический разряд можно использовать в качестве стабильного источника света очень большой яркости, который в принципе можно расположить в свободном пространстве.

Возможности получения непрерывного оптического разряда при помощи световых источников нелазерного типа крайне ограничены. Из-за малости коэффициента поглощения излучений оптического диапазона для заметного выделения энергии в области ограниченных размеров требуются весьма высокие степени ионизации газа, приближающиеся к полной однократной. Для этого температура плазмы должна быть высокой, 15000 — 20000 К. Но источник, питающий плазму, должен обладать по крайней мере столь же высокой температурой. Ведь согласно второму закону термодинамики свободная перекачка энергии от менее нагревого тела к более нагретому невозможна. Так, например, фокусируя солнечные лучи зеркалом или линзой сколь угодно большого диаметра и концентрируя сколь угодно большую мощность, все равно нельзя поддерживать в веществе температуру выше солнечной (6000 К). Но при столь низкой температуре свет в плазме поглощается настолько слабо, что, даже будучи однажды зажженной, плазма немедленно распалась бы из-за невосполнимых потерь энергии.

Реально только лазерный источник оптического излучения способен питать плазму с температурой $T = 20000$ К, ибо температуры лазерного излучения T_ω воистину колоссальны, они достигают $T_\omega \sim 10^{20}$ К! Почему так получается? Эффективная температура излучения T_ω совпадает с температурой абсолютно черного тела, которое в данном спектральном интервале $\Delta\omega$ давало бы такую же интенсивность излучения I_ω , что и наш источник. (Напоминаем, что I_ω — это количество энергии, излучаемой с 1 см² в 1 с в единичный интервал частот и единичный интервал телесного угла в направлении излучения.) Мощность P излучателя в диапазоне $\Delta\omega$ пропорциональна $I_\omega \Delta\omega$. Но лазерная линия обладает исключительно

малой частотной шириной $\Delta\omega$, она даже уже обычных спектральных линий атомов. Между тем мощность лазерного излучателя P сравнительно велика. Поэтому интенсивность I_ω оказывается огромной. По закону Планка, вернее по закону Рэлея–Джинса (поскольку $\hbar\omega \ll kT_\omega$) $I_\omega \sim T_\omega$, поэтому огромной оказывается и температура излучения.

СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Луч СО₂-лазера фокусируют линзой (или зеркалом) (рис. 2). Линза изготавливается из NaCl или KCl, так как обычное стекло непрозрачно для инфракрасного излучения с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. Чтобы зажечь разряд, необходимо создать начальный плазменный очаг (задача поджига стоит в любых равновесных разрядах). Это можно сделать, вводя на короткое время в фокус вольфрамовую проволочку. Немного металла с поверхности испаряется, пары ионизируются и начинают поглощать лазерный луч. Потом проволочку удаляют, а разряд продолжает гореть уже в атмосфере газа. Плазма несколько сдвигается от фокуса навстречу лазерному излучению до того сечения сходящегося светового канала, где интенсивности луча еще достаточно для ее поддержания. Размеры плазмы меняются от 1 мм (на пределе существования) до величины порядка 1 см и более при повышенных мощностях лазера.

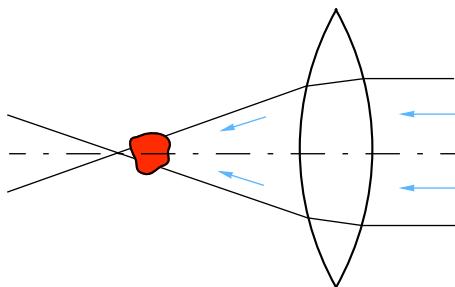


Рис. 2. Схема опыта по получению НОР в неподвижном газе.

Чтобы можно было пользоваться разными газами и варьировать давление, луч через соляное окно вводится в камеру. Если хватает лазерной мощности, непрерывный оптический разряд можно зажигать прямо в свободном воздухе. Первые опыты были сделаны с помощью лазера маленькой по нынешним временам мощности (150 Вт). В ту пору (1970 г.) более мощные лазеры были большой редкостью. Разряд был зажжен в ксеноне при давлении в несколько атмосфер, для чего, согласно теоретическим воззрениям, требуется небольшая лазерная мощность. Сейчас, когда в руках исследователей имеются и более мощные лазеры, разряд получают в разных условиях, в том числе и прямо в комнате.

Правда, для последнего требуется лазер большой даже по нынешним временам мощности (4–5 кВт), а главное, нужен луч высокого качества (малой расходимости), который поддается хорошей фокусировке.

Можно представить себе три схемы получения НОР, и все они реализованы на опыте.

1) Разряд зажигается и стабильно горит в области фокуса хорошо сфокусированного лазерного луча, как на рис. 2. Обычно для этой цели используют короткофокусные линзы или зеркала с фокусными расстояниями f порядка нескольких сантиметров. В такой схеме НОР горит устойчиво и неограниченно долго в любых газах при давлении от $p \approx 1$ атм и вплоть до десятка, а в некоторых случаях и до сотни атмосфер. Это зависит от рода газа, фокусного расстояния линзы, ориентации луча: горизонтален он или вертикален. Наиболее благоприятна для стабильности геометрия, в которой лазерный луч подается вертикально снизу вверх. Дело в том, что горячая плазма, обладая низкой массовой плотностью, стремится всплыть под действием архимедовой силы. Поднимаясь, плазма вступает в область, более близкую к геометрическому фокусу, где сечения луча меньше, а интенсивность лазерного излучения выше. Для поддержания НОР при давлениях в несколько атмосфер и выше достаточно лазерной мощности от нескольких сотен ватт до киловатта.

2) Если зажечь разряд в фокусе слабосфокусированного луча, скажем, при помощи линзы с $f = 40$ см или еще больше, возникшее плазменное образование размером в несколько миллиметров или сантиметр (в зависимости от лазерной мощности) бежит по слаборасходящемуся световому каналу по направлению к линзе, то есть навстречу излучению. Скорость движения не очень велика, порядка 10 м/с. Добегая до какого-то сечения луча, дальше которого интенсивности лазерного излучения уже не хватает для поддержания плазмы, плазма останавливается. Дальнейшая ее судьба зависит от того, покоятся ли среда или в опыте применяется дутье, обеспечивающее газовый поток в направлении потока излучения. В отсутствие потока разряд обычно гаснет. Слабая фокусировка не способствует устойчивости горения. В газовом потоке плазма останавливается и продолжает гореть. Но эта ситуация уже относится к следующей схеме, рис. 3).

Описанный выше процесс распространения плазменного фронта навстречу лучу называют лазерным, или световым, горением, или волной горения, поддерживаемой лазером. Этот процесс очень похож и внешне и по своему существу на распространение пламени в горючей смеси, с той только разницей, что при обычном горении выделяется химическая энергия, которая содержится в самом веществе, а здесь энергия поставляется лазерным лучом. Причина распространения фронта высокой температуры по веществу в обоих случаях одна: тепло от нагретых слоев, расположенных за фронтом волны,

проникает благодаря теплопроводности в область перед фронтом и нагревает ранее холодный газ до высокой температуры. В случае пламени во вновь нагретом слое начинает интенсивно протекать химическая реакция с выделением тепла, при лазерном горении во вновь образованном слое плазмы начинает поглощаться лазерное излучение. В обоих случаях в новом слое происходит выделение энергии и фронт волны переходит в новое место и т.д. Такой механизм распространения разряда свойствен разрядам во всех частотных диапазонах, включая и оптический, о котором сейчас идет речь. Лазерная волна горения впервые наблюдалась на опыте в 1969 году в Физическом институте АН СССР в луче импульсного неодимового лазера [3]. Лазер давал энергию 1000 Дж при длительности импульса 2 мс, то есть среднюю мощность 0,5 МВт, фокусировался в воздухе длиннофокусной линзой с $f = 50$ см. В области фокуса, диаметр которого был равен 3 мм, интенсивность света составляла 10 – 15 МВт/см². Для поддержания светового горения в луче CO₂-лазера достаточно гораздо меньшей мощности – 1 кВт. Так происходит от того, что более длинноволновое излучение CO₂-лазера поглощается в плазме гораздо сильнее, чем неодимовое.

3) Третья схема представляет собой в буквальном смысле слова оптический плазмотрон, принцип действия его не отличается от всех других плазмотронов. НОР горит в потоке газа, направленном в сторону потока лазерного излучения (рис. 3). В разряде холодный газ превращается в плазму и вытекает из окрестности фокуса, где локализуется разряд, в виде плазменной струи. Конечно, плазма быстро остывает, так что струя имеет небольшие размеры, но на фотографиях это выглядит так, как показано схематически на рис. 3. Скорость дутья обычно невелика, несколько метров в секунду. В оптическом плазмотроне плазма нагревается до более высокой (на несколько тысяч градусов) температуры, чем в НОР, горящем в неподвижном газе. Неподвижный разряд в потоке и плазма, движущаяся по лучу, – это в сущности одно и то же явление распространения разряда по веществу, с той лишь разницей, что в одном случае среда покоятся, а фронт бежит, а в другом наоборот. То же самое происходит и при горении: пламя может бежать в трубе, наполненной горючей смесью, а может быть локализованным в горелке, где к пламени подают непрерывным потоком горючий газ (как в кухонной плите).

БАЛАНС ЭНЕРГИИ И ТЕМПЕРАТУРА ПЛАЗМЫ

Стационарное поддержание плазмы предполагает сбалансированность всех энергетических процессов: поступление энергии от лазерного излучения в ходе его поглощения должно компенсировать все потери энергии. Теряет энергию плазма за счет теплопроводностного вытекания, вследствие излучения тепловой радиации, частично энергия выно-

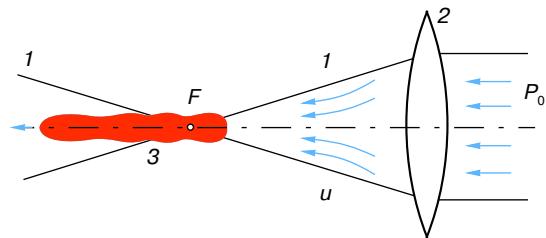


Рис. 3. Схема оптического плазмотрона. Стрелками показаны направления лазерного излучения и газового потока.

ится из области разряда, то есть области поглощения лазерного луча, вместе с газовым потоком, если таковой имеется. Балансом энергии определяется температура плазмы и лазерная мощность, необходимая для ее поддержания. Поясним это сперва на простейшем примере, который относится к предельным условиям возникновения и существования плазмы в покоящемся газе, но вместе с тем качественно отражает многие важные особенности явления. Представим себе маленький плазменный шар радиуса r_0 , на который со всех сторон сферически симметрично падает поток лазерного излучения мощности P_0 . Конечно, реальная геометрия процесса не обладает сферической симметрией, что видно из рис. 2, задача, обладая осевой симметрией, двумерна. Но в двумерной постановке процесс можно рассчитывать только численными методами, и результаты такого расчета будут приведены ниже. Для выяснения принципиальных моментов желательно пользоваться какими-то разумными простыми моделями, и сферически симметричная модель хороша для этой цели.

Итак, рассмотрим баланс энергии в такой идеализированной ситуации. Излучение частично поглощается в плазме. В сильно ионизированном газе кванты CO₂-лазера $h\nu = 0,117$ эВ поглощаются свободными электронами при столкновениях их с ионами. Следовательно, коэффициент поглощения μ_ω пропорционален плотностям тех и других n_e и n_+ . Поскольку в электронейтральной плазме $n_e = n_+$, $\mu_\omega \sim n_e^2$. Плотность электронов в равновесной плазме очень резко нарастает с ростом температуры, а после отрыва наружного (оптического) электрона у всех атомов и достижения полной однократной ионизации несколько падает. Так происходит до начала второй ионизации, то есть отрыва следующего электрона. Падение n_e связано с уменьшением плотности газа при росте температуры, поскольку давление, равное давлению окружающей среды, остается неизменным. Таким образом, коэффициент поглощения $\mu_\omega(T)$ имеет максимум (рис. 4) – это важно для дальнейшего. В небольшом полупрозрачном для лазерного излучения плазменном шаре, радиус которого существенно меньше длины пробега квантов

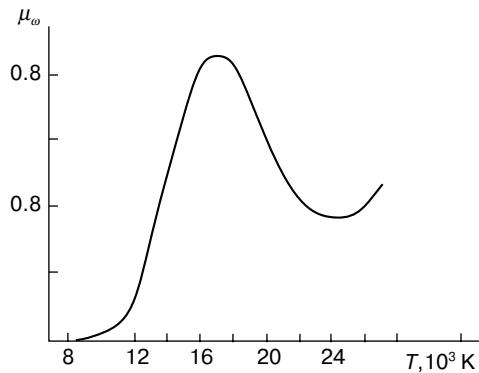


Рис. 4. Коэффициент поглощения излучения CO₂-лазера в воздухе, $P = 1$ атм.

для поглощения μ_{ω}^{-1} , поглощается лазерная мощность, примерно равная $P_1 = P_0 \mu_{\omega} r_0$.

При небольших размерах плазмы, как это бывает у порога существования НОР, потери энергии на тепловое излучение малы. Поглощенная лазерная энергия выносится из плазмы теплопроводностным потоком:

$$P_1 = -4\pi r_0^2 \lambda \frac{dT}{dr} \approx 4\pi r_0^2 \frac{\Delta\theta}{r_0}, \quad P_1 = P_0 \mu_{\omega} r_0, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности,

$$\theta = \int_0^T \lambda(T) dT$$

— потенциал потока тепла, который вводится, когда λ сильно зависит от температуры, как в нашем случае; $\Delta\theta = \theta_m - \theta_0$ — перепад θ от центра, где он равен θ_m , до границы шара. Вне плазменного шара лазерное излучение не поглощается, теплопроводностный поток через каждое сферическое сечение не меняется. Считая, что далеко, на “бесконечности” $\theta = 0$, найдем

$$-4\pi r^2 \lambda \frac{dT}{dr} = \text{const} = P_1, \quad \theta = \frac{P_1}{4\pi r}, \quad \theta_0 = \frac{P_1}{4\pi r_0}. \quad (2)$$

Комбинируя равенства (1), (2), получим связь лазерной мощности P_0 с максимальной температурой T_m в центре шара

$$P_0 = \frac{2\pi\theta(T_m)}{\mu_{\omega}(T_m)}. \quad (3)$$

Поскольку функция $\theta(T)$ монотонно возрастающая, а $\mu_{\omega}(T)$ проходит через максимум, функция $P_0(T_m)$ проходит через минимум (рис. 5). Минимум P_0 соответствует примерно максимуму $\mu_{\omega}(T)$, то есть той температуре, при которой достигается полная однократная ионизация газа. Минимальное значение P_0 представляет собой ту наименьшую лазерную мощность, которая необходима для поддержания

плазмы НОР. Для воздуха при 1 атм по этим оценкам $T_m \approx 18000$ К, $P_0 \text{ min} \approx 2,2$ кВт ($\mu_{\omega} \text{ max} \approx 0,85$ см⁻¹, $\theta_m \approx 0,3$ кВт/см). Эти цифры хорошо подтвердились последующими опытами. Из формулы (3) следует, что пороговая мощность уменьшается в случае газов с низким потенциалом ионизации, где полная однократная ионизация достигается при более низкой температуре, понижению мощности способствует плохая теплопроводность (меньше λ и θ), а также повышенные давления, при которых повышается поглощающая способность газа (больше μ_{ω}). Именно по этим причинам для первых опытов были выбраны ксенон и аргон при давлениях 3 – 4 атм, для зажигания НОР в этих условиях потребовалось всего 100 – 200 Вт.

На первых порах после открытия для объяснения основных особенностей НОР, в том числе и в потоке газа, были построены различные упрощенные теории и сделано много приближенных расчетов. Однако явление настолько сложно и многообразно, что сколько-нибудь полная его картина теоретически может быть получена только путем двумерного численного моделирования. Численные модели включают в себя многие существенные составляющие эффекта. Прежде всего весьма детальным образом описывается баланс энергии плазмы в каждой точке пространства. В балансе энергии имеется несколько статей: это выделение энергии вследствие поглощения лазерного излучения с учетом ослабления его потока по мере проникновения в плазму, теплопроводностные потери, вся газодинамическая часть, которая включает в себя вынос энергии с газовым потоком, работу расширения газа и т.д. Очень важную роль при лазерных мощностях, сильно превышающих пороговую, и больших размерах плазмы играет лучистый теплообмен. В наиболее горячих местах плазма излучает тепловую радиацию в самых различных участках спектра от инфракрасного до ультрафиолетового, а в более холодных тепловая радиация частично поглощается. По своему результату лучистый теплообмен в

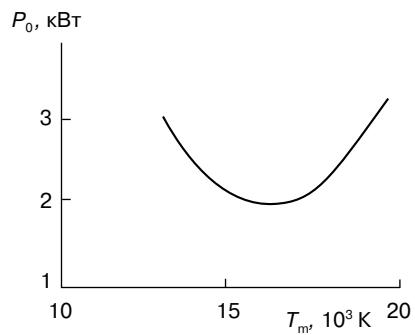


Рис. 5. Зависимость лазерной мощности от температуры плазмы.

каком-то смысле эквивалентен действию теплопроводности.

Баланс энергии в НОР можно проиллюстрировать следующими цифрами, полученными расчетным путем. При разряде в неподвижном воздухе атмосферного давления, поддерживаемом CO₂-лазером 6-кВт мощности, в плазме поглощается 3,2 кВт, остальные 2,8 кВт проходят насквозь и уносятся вдали расходящимся за фокусом лучом. Вся лазерная энергия поглощается в центральной зоне с температурами $T > 10000$ К. Почти вся поглощенная энергия излучается в виде тепловой радиации, но ультрафиолетовая часть излучения, в которой сосредоточено 1,9 кВт, поглощается поблизости, в области, где $6000 < T < 10000$ К. На “бесконечность” 2 кВт уносится теплопроводностью и 1,2 кВт излучением в видимой и небольших соседних областях спектра. Как видим, лучистый теплообмен очень велик.

Важную роль играет рефракция лазерного излучения в плазме, которая существенным образом искаивает первоначальный ход лазерных лучей, соответствующий отсутствию плазмы. Распространяясь в оптически неоднородной среде, световые лучи всегда отклоняются в сторону увеличения показателя преломления n . В отличие от других сред показатель преломления плазмы всегда меньше единицы, причем тем меньше, чем больше плотность электронов n_e . Но в НОР n_e максимальна на оси лазерного луча и разряда, вместе с температурой уменьшаясь в боковых направлениях при удалении от оси. Следовательно, лазерные лучи, попадая в разрядную плазму, отклоняются в сторону от оси (рис. 6).

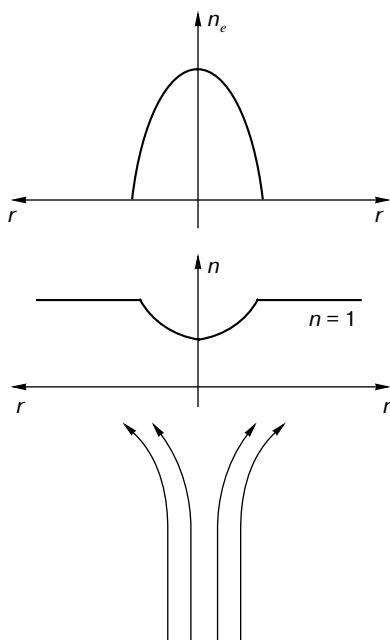


Рис. 6. Рефракция лазерного излучения в плазме.

Это приводит к результату, который объясняет одну любопытную и долгое время остававшуюся загадочной особенностью НОР.

Дело в том, и это подтверждено и экспериментами, и расчетами, что плазма НОР поглощает лазерный луч далеко не полностью. Через нее проходит примерно половина лазерной мощности, и часто этой мощности достаточно, чтобы поддерживать еще один НОР в фокусе. Однако двух очагов плазмы никогда не наблюдалось. Загадка объясняется действием рефракции. Плазма всегда локализуется в фокусе, просто сам фокус теперь сдвигается к линзе. Новое минимальное сечение гораздо больше, чем диаметр фокусного пятна в невозмущенном газе, и луч расходится за фокусом под большим углом, чем сходится перед фокусом. На рис. 7 приведен пример двумерного расчета НОР в потоке газа с учетом всех перечисленных (и других) влияний. Видно, что в потоке образуются завихрения.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Плазма НОР может служить очень стабильным стационарным источником света рекордно высокой яркости. Других, неограниченно действующих источников столь высокой яркости, пожалуй, нет. Это объясняется исключительно высокой температурой плазмы НОР, не достижимой в других разрядах. Плазму НОР и оптический плазмотрон

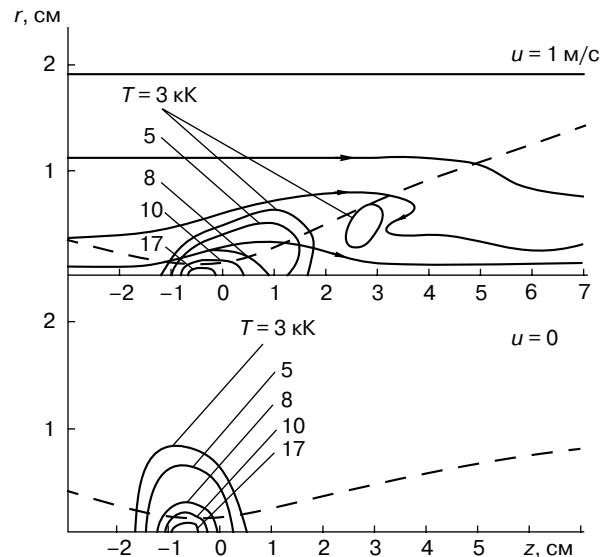


Рис. 7. Результаты двумерного расчета течения в оптическом плазмотроне [4]. Воздух, $\rho = 1$ атм, $P_0 = 6$ кВт, $f = 15$ см, скорость холодного потока $u = 1$ м/с. Осевая координата z отсчитывается от точки геометрического фокуса, r – радиальная координата. Наверху – изотермы и линии тока (со стрелками), внизу – изотермы в отсутствие потока. Штриховая линия – контур лазерного луча, искаженный рефракцией. Луч и поток слева направо.

целесообразно использовать для технологических целей в тех случаях, когда требуется создать плазму в труднодоступном месте, когда требуются очень высокие температуры, когда нужно избавиться от каких-либо конструктивных элементов и т.д.

Расскажем в заключение об одном довольно фантастическом американском проекте, который начали разрабатывать после первых публикаций о НОР и оптическом плазмотроне. Речь идет о лазерном ракетном двигателе, в основу которого положена схема оптического плазмотрона (рис. 3). Лазерный луч фокусируется в области горла сопла. Параллельно лучу продувают холодный водород под высоким давлением, и в нем поддерживается НОР. Образующаяся плазменная струя расширяется через сопло и приобретает большую скорость, что и создает реактивную тягу. Преимущество такой системы перед обычными реактивными двигателями на химическом топливе состоит в возможности достижения очень высокой температуры в очень легком газе. Благодаря этому получается очень высокий удельный импульс, недостижимый обычными способами. Лазерную энергию предполагалось подавать на корабль либо с Земли, либо с орбитальной станции. Конечно, здесь требуются гигантские лазерные мощности, о чем сейчас можно только фантазировать. Значение такого рода работ, быть может, состоит не столько в получении реального практического результата, которого трудно ожидать в обозримом будущем, а в том, что в ходе разработки возникают и решаются многие проблемы, пред-

ставляющие и научный, и практический интерес. Так случилось и с данным проектом, который стимулировал исследования в этой новой области физики разрядов и взаимодействия излучения с плазмой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзера Ю.П. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 195; ЖЭТФ. 1970. Т. 58. С. 2127.
2. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Маслюков В.А., Райзера Ю.П. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 447; ЖЭТФ. 1971. Т. 61. С. 1434.
3. Бункин Ф.В., Конов В.И., Прохоров А.М., Федоров В.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 609.
4. Райзера Ю.П., Силантьев А.Ю., Суржиков С.Т. // Теплофизика высоких температур. 1987. Т. 25. С. 454.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Райзера Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974.
2. Райзера Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 2-е изд.

* * *

Юрий Петрович Райзера, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией Института проблем механики РАН, профессор Московского физико-технического института. Автор 170 статей, 3 изобретений, 5 монографий.