



# НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

Авторы: Б. М. Смирнов

---

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА, ионизованный газ, состоящий из электронов, ионов и нейтральных частиц, у которого ср. энергия электронов меньше характерного потенциала ионизации атома ( $<10$  эВ). Темп-ра Н. п. обычно не превышает  $10^5$  К. Плазма с темп-рой  $>10^6$ - $10^7$  К называется высокотемпературной. Обычно Н. п. ионизована слабо, т. е. число нейтральных атомов и молекул значительно превышает число электронов и ионов. Отношение числа ионизованных атомов к их полному числу в единице объёма называется степенью ионизации плазмы. В соответствии с физич. свойствами Н. п. может быть стационарной или нестационарной, равновесной или неравновесной, идеальной или неидеальной.

Стационарная Н. п. обладает существенно большим временем жизни по сравнению со временем релаксации в ней. Время жизни нестационарной (импульсной) Н. п. определяется временем установления равновесия в плазме и внешними условиями. Плазма, время жизни которой незначительно превышает характерное время процессов релаксации, называется квазистационарной.

Если темп-ры электронов, ионов и нейтральных частиц совпадают и степень ионизации соответствует термодинамич. равновесию, то плазма называется равновесной. В Н. п. легко создаются неравновесные условия: под воздействием внешних электрич. полей заряженные частицы ускоряются, а затем отдают энергию частицам газа при столкновениях. В таком случае ср. энергия заряженных частиц может значительно отличаться от тепловой энергии нейтральных частиц. Особенно это относится к электронам, которые из-за малой массы неэффективно обмениваются энергией при упругом столкновении с нейтральными частицами газа. При этом не только ср. энергия электронов, но и вид их распределения по энергиям может существенно отличаться от равновесного. Неравновесной является плазма [тлеющего](#)

разряда и плазма дугового разряда низкого давления.

Равновесная плазма обычно реализуется в газе при высоком давлении, где столкновения частиц происходят часто и скорость установления равновесия относительно велика. Примерами такой плазмы являются плазма дугового разряда при атмосферном давлении, плазма искрового разряда или молнии в атмосфере.

Плазма считается идеальной, если ср. кинетич. энергия заряженных частиц  $(3/2)kT$  много больше ср. энергии взаимодействия частицы с окружающими частицами:

$$(3/2)kT \gg e^2/r_D, \text{ где}$$

$e$  – заряд электрона,

$T$  – темп-ра электронов и ионов,

$k$  – постоянная Больцмана,

$$r_D = (kT/4\pi n_e e^2)^{1/2} - \text{дебаевский радиус экранирования (}$$

$n_e$  – плотность электронов). Идеальную плазму можно определить также как плазму, в которой число заряженных частиц в сфере с дебаевским радиусом велико.

Критерием идеальности плазмы является условие

$$\mu = 1/(n_e r_D^3) \ll 1, \text{ где}$$

$\mu$  – параметр идеальности.

В неидеальной плазме, в которой энергия взаимодействия частиц сопоставима с их кинетич. энергией или превышает её (полностью ионизованная плазма), с большой скоростью происходит рекомбинация ионов и электронов. Плотность заряженных частиц существенно падает, их темп-ра повышается, и плазма перестаёт быть неидеальной.

## **Способы создания низкотемпературной плазмы**

По способам получения и использования Н. п. можно разделить на газоразрядную, пучковую, фоторезонансную, лазерную, ионосферную, солнечную, космическую. В Н. п. потери заряженных частиц связаны с рекомбинацией электронов и ионов и с уходом заряженных частиц на стенки камеры или за пределы занимаемого объёма. Для поддержания существования плазмы необходимы процессы ионизации.

Наиболее известный и простой способ получения Н. п. – газоразрядный. Плазма создаётся в результате протекания в газе электрич. тока между электродами, к которым приложена постоянно поддерживаемая разность потенциалов. Могут быть реализованы разл. типы газового разряда (см. [Электрические разряды в газах](#)) в зависимости от конструкции газоразрядной камеры и используемых для создания разряда электрич. или электромагнитных полей.

Газоразрядному способу создания Н. п. подобно получение её при электрич. пробое газа под действием разности потенциалов, приложенной к электродам. В этом случае получают импульсную плазму, которая распадается, как только конденсатор разрядится. Подобное явление имеет место в приземной атмосфере: молния – пробой газа между облаками или между облаком и землёй во время грозы.

Под действием резонансного излучения образуется т. н. [фоторезонансная плазма](#). Энергия фотонов резонансного излучения совпадает с энергией возбуждения атомов или молекул газа. Образующиеся при поглощении резонансных фотонов возбуждённые атомы или молекулы при дальнейших столкновениях ионизируются. В качестве источника резонансного излучения используется разрядная лампа или перестраиваемый по частоте лазер. Этот способ генерации плазмы позволяет легко регулировать её параметры, поэтому фоторезонансная плазма применяется при создании плазменных нелинейных оптич. элементов для преобразования и стабилизации частоты лазерного излучения, а также для создания источников ионов разного сорта, акустич. источников и т. д.

[Лазерная плазма](#) образуется при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью, газом или кластерным пучком. В зависимости от условий возникают разл. типы лазерной плазмы. В частности, фемтосекундная лазерная плазма создаётся при облучении поверхности или пучка кластеров сфокусированным мощным лазерным импульсом, напряжённость электрич. поля которого значительно превышает внутриатомное поле. Образующаяся короткоживущая плазма состоит из электронов и многозарядных ионов и является источником рентгеновского излучения. Фемтосекундная лазерная плазма с участием кластеров дейтерия используется для генерации нейтронов.

Пучковая плазма возникает при прохождении через газ пучка электронов с энергией в неск. сотен кэВ. Такие быстрые электроны из электронной пушки направляются в лабораторную установку, содержащую газ при более высоких давлениях.

Возникающие при ионизации атомов или ионов вторичные электроны имеют энергию, в неск. раз превышающую потенциал их ионизации. Далее используется энергия этих вторичных электронов, поэтому КПД устройств, возбуждаемых электронным пучком, достаточно велик. Напр., КПД молекулярных, химич. и эксимерных лазеров, возбуждаемых электронным пучком, превышает 10%. Однако осн. достоинство возбуждения плазмы электронным пучком – возможность быстрого подвода энергии.

Характерные времена возбуждения плазмы электронным пучком порядка  $10^{-9}$  с.

Н. п. может быть получена под действием жёсткого электромагнитного излучения, ионизирующего газ (ионосфера Земли и др. планет), в результате прохождения пучка ионов или нейтронов через газ. Н. п. можно создать с использованием радиоактивных источников; в пламенах заряженные частицы образуются в результате процессов хемионизации.

## Процессы в низкотемпературной плазме

В Н. п. происходят элементарные процессы возбуждения, ионизации, рекомбинации заряженных частиц, химич. процессы с участием этих частиц, возбуждённых атомов и молекул, процессы переноса заряженных и возбуждённых частиц, процессы переноса энергии за счёт теплопроводности, конвекции, а также волновые процессы.

Последние могут привести к неустойчивостям, образованию плазменных структур (страты, домены), контракции газоразрядной плазмы и т. д.

Разнообразие элементарных процессов в плазме можно видеть на примере процессов ионизации, которые приводят к образованию свободных электронов в плазме. Это могут быть: прямая ионизация атомов газа при столкновении с электроном (



$e$  – электрон,

$A$  – атом,

$A^+$  – ион), ступенчатая ионизация с участием возбуждённых атомов

$A^* (e + A^* \rightarrow 2e + A^+)$ , процесс Пеннинга при столкновении метастабильного атома с энергией возбуждения, превышающей потенциал ионизации партнёра по столкновению

$(A^* + B \rightarrow e + A + B^+)$ , ассоциативная ионизация с образованием молекулярного иона

$(A^* + B \rightarrow e + AB^+)$ , фотоионизация

$(\gamma + A \rightarrow 3e + A^+)$  и т. д. Многообразие процессов создания и эволюции плазмы зависит от условий её существования.

Волновые свойства Н. п., определяемые электронами и ионами, не зависят от присутствия атомов или молекул в силу дальнедействующего характера взаимодействия заряженных частиц. В однородной Н. п. имеются две ветви колебаний: плазменные колебания, определяемые движением электронов и плазменной частотой

$$\omega_p = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2} ($$

$m_e$  – масса электрона), и ионно-звуковые колебания, определяемые перемещением ионов. Эти типы колебаний различаются из-за разной массы электронов и ионов. В неоднородной Н. п., а также и в однородной при наличии внешних полей возникают новые типы осцилляций. Напр., в однородной Н. п., находящейся в постоянном магнитном поле, возникают магнитозвуковые волны и магнитогидродинамич. волны (альвеновские волны), распространяющиеся соответственно поперёк и вдоль магнитных силовых линий. К ним следует добавить циклотронные волны, соответствующие вращению электронов или ионов в магнитном поле (см. Волны в плазме). Из-за смешивания разных типов колебаний их число увеличивается. Напр., в атмосфере наблюдаются свистящие атмосферерики, которые являются смесью электромагнитной и циклотронной волн и распространяются вдоль магнитных силовых линий.

Коллективные явления влияют на свойства Н. п., а неустойчивости колебаний плазмы приводят к возникновению плазменных структур и раскачке определённых типов волн. Когда амплитуда этих волн становится заметной, эволюция плазмы определяется нелинейными процессами. Одним из примеров этого является возникновение солитона – уединённой волны, представляющей собой не гармонич. распределение частиц в пространстве, а высокую плотность частиц, сосредоточенную

в узкой области пространства.

## Применение низкотемпературной плазмы

Разнообразное использование Н. п. определяется простотой её создания.

Газоразрядная плазма применяется в источниках света, газовых лазерах, в плазмохимич. процессах и процессах очистки газов, для обработки поверхностей, в разл. технологич. и металлургич. процессах. Н. п. как рабочее тело используется для преобразования тепловой энергии в электрическую в [магнитогидродинамических генераторах](#) и [термоэмиссионном преобразователе энергии](#). В [плазмотроне](#) Н. п. выполняет роль теплоносителя. Вводимая в плазму электрич. энергия передаётся электронам, а от них – атомам и/или молекулам газа и нагревает плазму.

Широкое технологич. применение плазмы обеспечивается двумя её качествами. Во-первых, плазма является отличным теплоносителем, т. к. в ней достигаются более высокие темп-ры, чем в горелках на химич. топливе. Во-вторых, в плазме образуется много ионов, радикалов и разл. химически активных частиц, поэтому с её помощью можно провести химич. процессы в объёме или на поверхности. Поскольку макс. темп-ра в химич. горелках не превышает 3000 К, их применение для сварки и резки металлов ограничено. Дуговой разряд позволяет создать плазму с темп-рой в 3–4 раза выше, которая при соприкосновении с металлом расплавляет его. Плазменные методы сварки и резки металлов обеспечивают более высокие производительность и качество продукта, дают меньше отходов, но требуют больших затрат энергии и более дорогого оборудования.

Плазма как хороший теплоноситель позволяет производить термич. обработку поверхности и её закалку. При одном способе обработки поверхности активные частицы плазмы вступают в химич. реакцию с материалом поверхности, образуя, напр., нитриды или карбиды металлов, что упрочняет поверхность. При др. способе обработки плазма не вступает с поверхностью в химич. реакцию, но образует на ней свои химич. соединения в виде плёнок, улучшающих физич. параметры поверхности. Толщина плёнки, напыляемой на поверхность, пропорциональна времени плазменного процесса. Меняя состав плазмы, можно создавать многослойную структуру.

Обработка отд. слоёв сфокусированным излучением ртутной лампы или лазера позволяет получать профилированные плёнки с миним. размером отд. элементов в неск. микрометров. Н. п. применяется для создания полимеров и полимерных мембран, при произ-ве порошков керамич. соединений ( SiC, Si N<sub>3 4</sub> ), металлов и их оксидов (см. [Плазмохимия](#)).

Н. п. используется для анализа элементного состава вещества, осуществляемого двумя способами. В первом из них исследуемое вещество вводится в плазменную горелку (дуговой разряд с проточной плазмой) в микроколичествах либо в виде порошка, либо в виде капель. В плазме вещество диссоциирует на атомы, которые частично возбуждаются и излучают. По спектральному составу излучения определяется элементный состав вещества. Этот метод, называемый эмиссионным [спектральным анализом](#), позволяет надёжно определять содержание примесей в количестве  $\geq 10^{-3}$ – $10^{-2}\%$ . В др. способе элементного анализа исследуемое вещество также вводится в пламя или в проточную плазму газового разряда, которые находятся между двумя электродами. Пламя или плазма облучаются излучением перестраиваемого лазера, и ток через плазму измеряется как функция длины волны излучения. Когда излучение попадает в резонанс с переходами атомов, находящихся в плазме, условия ионизации атомов и разрядный ток изменяются. Чувствительность методов, использующих этот эффект (называемый оптогальваническим), на неск. порядков выше эмиссионного.

Ряд идей применения Н. п. осуществляется лишь через много лет. Так, конструкция плазменных панелей (плазменных дисплеев) для телевидения была описана в 1936, а первые пром. образцы созданы через 30 лет. Плазменный дисплей представляет собой систему двух наборов параллельных проволок, расположенных перпендикулярно, так что в зоне пересечения двух проволок зажигается газовый разряд, управляемый внешним источником, который может менять интенсивность и цвет каждого отд. разряда.

В кон. 20 – нач. 21 вв. свойства Н. п. стали использоваться для решения разл. мед. задач. Мощная равновесная плазма позволяет уничтожать опасные мед. отходы, менее мощная плазма применяется для стерилизации мед. инструментов, т. н.

плазменный нож (узкий поток плазмы) используется для разрезания живой ткани в хирургии. Активные частицы Н. п. (электроны, ионы, метастабильные атомы и молекулы) оказывают антисептич. действие при заживлении ран. Плазменные технологии позволяют создавать спец. мед. материалы.

## Литература

Лит.: Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М., 1983; Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 2-е изд. М., 1992; Smirnov B. M. Physics of ionized gases. N. Y.; Chichester, 2001; Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharge and materials processing. Hoboken; Chichester, 2005; Fridman A. A. Plasma chemistry. Camb., 2008; Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. 2-е изд. М., 2010.