

Министерство образования и науки Российской Федерации
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Е.Ю. Петров

АНТЕННЫ В ПЛАЗМЕ

научно-популярные материалы для школьников и школьных учителей

Нижний Новгород 2013

Плазма в природе и технике. Основные свойства плазмы

Термин "плазма" в 1927 г. ввел американский физик Ирвинг Ленгмюр. Плазмой называют ионизированный газ, в котором атомы "потеряли" электроны и превратились в положительно заряженные ионы. Для того, чтобы понять, о чем идет речь, обратимся к школьному опыту, который показывает развитие электрического разряда в так называемой газоразрядной трубке. Для опыта берется стеклянная трубка, с обоих концов которой впаяны электроды. К электродам подводится высокое напряжение. При помощи толстого резинового шланга трубка присоединяется к воздушному насосу и из нее откачивается воздух. Пока давление воздуха в трубке близко к атмосферному давлению, практически ничего не происходит. По мере откачивания воздуха из трубки примерно при давлении 40 мм рт. ст. от одного электрода к другому начинают пробегать светящиеся фиолетовые нити, которые при дальнейшем разрежении воздуха утолщаются в яркие жгутики, затем ленты, пока, наконец, вся трубка не заполняется красивым фиолетовым сиянием.

Попробуем дать объяснение физических процессов, происходящих в газоразрядной трубке. В воздухе, заполняющем трубку, всегда найдется хотя бы один положительный ион (например, как следствие космической радиации). Под действием электрического поля он устремляется к катоду и выбивает из него электрон. Последний, ускоряясь электрическим полем, приобретает большую энергию, и при столкновении электрона с нейтральной молекулой образуется новый электрон и положительный ион. Образующиеся таким образом электроны при достаточном разрежении газа в трубке могут развить во время свободного пробега достаточно большую скорость и будут в состоянии разбить новые молекулы. Число ионов и электронов лавинообразно нарастает. Трубка наполняется разреженным ионизированным газом, состоящим из ионов, свободных электронов и нейтральных частиц. Ударяясь о нейтральные, еще не ионизированные, молекулы и атомы, свободные электроны приводят их в возбужденное состояние. Это значит, что электроны атомов перескакивают на более удаленные от ядра орбиты, запасая в себе дополнительную потенциальную энергию. При возвращении на основную орбиту электроны отдают эту энергию в виде энергии излучения (свечение).

Плазма по физическим свойствам отличается от газа. Она обладает хорошей электропроводностью и теплопроводностью. Однако если сравнить электропроводность плазмы с электропроводностью металлов, то обнаружится их существенное различие. Как известно, для металлов зависимость силы тока от напряжения выражается законом Ома. Сила тока в металлическом проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению. С повышением температуры сопротивление металлов увеличивается, так как колебания ионов в узлах кристаллической решетки затрудняют движение электронов. Для плазмы закон Ома в обычном виде большей частью неприменим. С ростом температуры и при увеличении

силы тока увеличивается число электронов в плазме, а поэтому напряжение, необходимое для разряда, уменьшается.

Плазма может образоваться не только при электрическом разряде в газе. Она образуется и при сильном нагревании газа (в пламени горящих веществ), при разрядах молнии. Солнце и другие звезды представляют из себя гигантские плазменные шары. Сильно разреженный газ космического пространства также находится в ионизованном состоянии. Газы атмосферы Земли на высотах более 60 км ионизованы ультрафиолетовым излучением Солнца и соударениями с быстрыми частицами космического происхождения. Область атмосферы Земли на высотах от 60 до примерно 500 км, в которой наблюдается заметная концентрация заряженных частиц, получила название ионосферы. Как оказывается, плазма является наиболее распространенным состоянием вещества в природе. Более 99% вещества во Вселенной находится в плазменном состоянии. Например, все планеты нашей Солнечной системы имеют общую массу, меньшую 0,002 части массы Солнца. Следовательно, на долю плазмы приходится более 99% массы всей Солнечной системы. Любое вещество нагреванием можно перевести в плазменное состояние. Поскольку, кроме того, свойства плазмы существенно отличается от свойств твердых тел, жидкостей и газов, состоящих из нейтральных атомов и молекул, плазму также называют четвертым агрегатным состоянием вещества.

Свойства плазмы существенно зависят от её температуры, концентрации нейтральных частиц и концентраций электронов и ионов. Взаимодействие заряженных частиц плазмы между собой характеризуется кулоновскими силами отталкивания и притяжения, убывающими с расстоянием гораздо медленнее короткодействующих межатомных и межмолекулярных сил. Поэтому взаимодействие частиц в плазме является "коллективным" - одновременно взаимодействуют друг с другом большое число частиц. Специфические особенности плазмы проявляются тогда, когда распределение частиц в ней становится неоднородным, что может быть вызвано, например, электромагнитным полем. Так как частицы плазмы заряжены, то неоднородность их распределения приводит к возникновению индуцированных зарядов и токов. Последние, в свою очередь, создают электромагнитное поле, которое снова влияет на движение заряженных частиц. В результате, возникает сложная, как говорят, "самосогласованная" картина взаимодействия плазмы с электромагнитным полем.

В состоянии равновесия (если на плазму не оказывать никакого внешнего воздействия и предоставить её самой себе), пространственные заряды электронов и ионов плазмы должны компенсировать друг друга так, чтобы в среднем полное поле внутри плазмы было равно нулю. Отсюда вытекает основное свойство плазмы - необходимость практически точного равенства плотностей электронов и ионов в равновесном состоянии - *квазинейтральность* плазмы. Действительно, допустим, например, что в некотором месте возник избыток ионов (нарушение

квазинейтральности). Это приведет к появлению электрического поля, притягивающего электроны к данной области. В итоге, заряженные частицы приходят в движение, и этот процесс не остановится, пока не будет восстановлена квазинейтральность.

Как известно из курса физики, потенциал точечного заряда q в вакууме записывается в виде

$$\varphi = \frac{q}{r}, \quad (1)$$

где r - расстояние от заряда до точки наблюдения. Поместим теперь тот же самый заряд в плазму. Оказывается, что его потенциал можно описать формулой

$$\varphi = \frac{q}{r} 2,7^{-\frac{r}{r_D}}. \quad (2)$$

Величина r_D называется дебаевским радиусом, или радиусом Дебая в честь голландского физика Петера Дебая. Дебаевский радиус зависит от параметров плазмы:

$$r_D = \sqrt{\frac{\kappa T}{8\pi e^2 N}}, \quad (3)$$

где T - температура плазмы, N - её концентрация (число электронов или ионов в кубическом сантиметре), а κ - постоянная Больцмана. Как следует из формул (1) и (2), для того, чтобы найти потенциал заряда в плазме, кулоновскую зависимость (1) необходимо домножить на быстро спадающую показательную функцию.

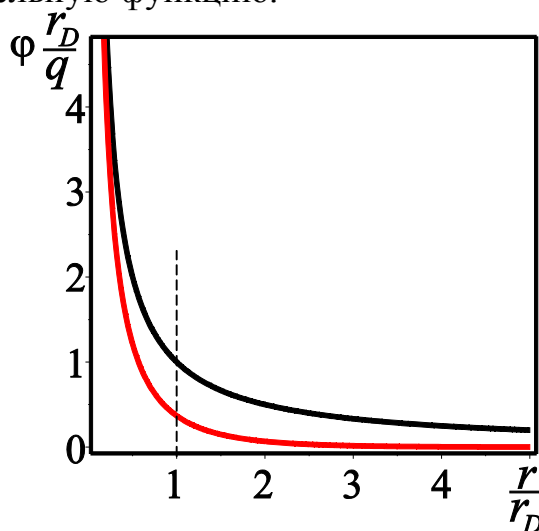


Рис. 1. Потенциал точечного заряда в вакууме (черная кривая) и в плазме (красная кривая).

Графики зависимости потенциала точечного заряда от расстояния r показаны на рис. 1. Черная кривая построена по формуле (1), а красная - по формуле (2) и отвечает потенциалу в плазме. Как видно из данного

рисунка, на расстояниях много меньше дебаевского радиуса ($r/r_D \ll 1$) функции (1) и (2) практически совпадают, в то время как на расстояниях больше r_D потенциал заряда в плазме очень быстро уменьшается и оказывается на много порядков меньше, чем потенциал (1). Аналогичным образом ведет себя и зависимость напряженности электрического поля от расстояния, которую можно найти как производную от потенциала:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}. \quad (4)$$

Таким образом, потенциал и поле точечного заряда в плазме быстро спадают (как говорят, "экранируются") на расстояниях больше радиуса Дебая. Причину этого явления очень легко понять, исходя из рис. 2.

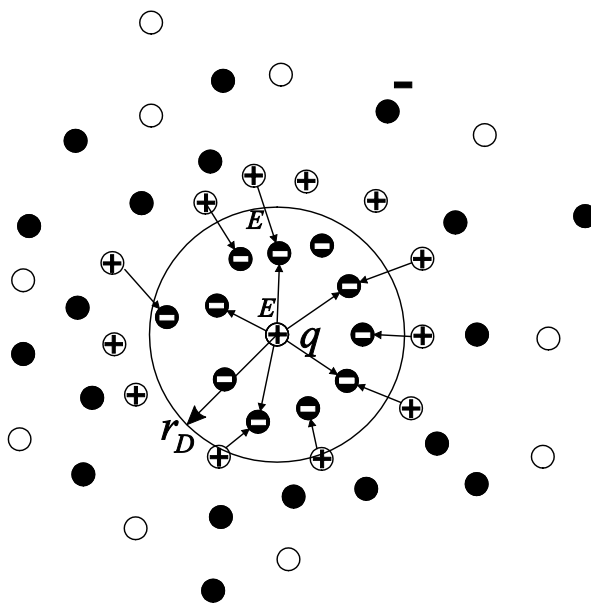


Рис. 2. Перераспределение зарядов плазмы в поле точечного заряда q . Белыми кружками показаны ионы, а черными - электроны.

Положительный заряд q притягивает к себе отрицательно заряженные электроны плазмы. В результате вокруг него образуется сферический слой из зарядов противоположного знака, имеющий радиус примерно равный радиусу Дебая. К внешней стороне этого слоя притягиваются положительно заряженные ионы. На большом расстоянии всё это перераспределение зарядов уменьшается и плазма является в среднем квазинейтральной. На рис. 2 показаны силовые линии электрического поля в дебаевской сфере. Вблизи заряда q потенциал и поле слабо отличаются от случая заряда в вакууме. Однако снаружи электронного слоя расположены ионы, и силовые линии электрического поля на данном расстоянии направлены от них внутрь дебаевской сферы. Поле на больших расстояниях будет являться суммой поля точечного заряда в вакууме и поля зарядов плазмы. Поскольку векторы этих полей направлены в противоположные стороны, в сумме мы имеем сильное ослабление суммарной напряженности, описываемое формулами (2) и (4). Заметим теперь, что в роли заряда q мы можем рассматривать любой из

электронов или ионов плазмы. Иными словами, поле каждой из заряженных частиц плазмы, как говорят, "экранируется" на расстоянии r_D .

Итак, мы познакомились с одним из основных понятий физики плазмы - дебаевским радиусом. Это понятие позволяет дать более строгое количественное определение плазмы. Действительно, мы говорили о плазме как о ионизированном газе - совокупности свободно движущихся заряженных частиц. Но ведь и в окружающем нас воздухе содержится небольшое количество электронов и ионов. Однако вследствие малости их концентраций о плазме здесь речь идти не может. Под плазмой понимают среду, обладающую, как мы уже говорили, качественно новыми свойствами по сравнению с обычным газом. И существование дебаевской экранировки как раз и служит признаком отличия плазмы от других сред. *Ионизированный газ называют плазмой, если характерные размеры занятой им области много больше дебаевского радиуса, а в сфере радиусом r_D содержится много частиц.* Поскольку дебаевский радиус зависит от концентрации (формула (3)), эти требования налагают существенные ограничения на величину концентрации заряженных частиц N .

Каково же значение плазмы в повседневной жизни? Где она используется? Очень широкое распространение получили лампы дневного света. Такие лампы используются для освещения лабораторий, цехов фабрик и заводов, внутренних помещений магазинов, станций метро и жилых домов. Их свет приближается к дневному, а КПД достигает 20—30%, что в 8 раз превышает КПД ламп накаливания. Лампа дневного света представляет собой стеклянную газоразрядную трубку, стенки которой изнутри покрыты люминофорами — светящимися веществами. Огромное значение в электротехнике имеют ртутные выпрямители тока. Электрифицированные железные дороги, трамвай, метрополитен получают постоянный ток с подстанций, на которых установлены мощные ртутные выпрямители. В этих устройствах также используются свойства плазмы.

Важнейшей проблемой современной физики является проблема управления плазмой, удержания плазмы в устойчивом состоянии и осуществления управляемой термоядерной реакции.

Наконец, поскольку разреженная межзвездная среда и окружающие Землю верхние слои атмосферы находятся в ионизированном состоянии, огромное значение для освоения космоса (космической радиосвязи) имеют вопросы генерации и распространения электромагнитных волн в плазме, работы антенн в плазме.

Принципы работы антенн. Основные виды и параметры антенн

Антенной называется устройство, предназначенное для приема или излучения электромагнитных волн. Как устроена антенна? Будем вначале говорить о передающих антеннах в вакууме. Рассмотрим, как можно обеспечить возможность излучения электромагнитных волн. Как известно из школьного курса физики, если электромагнитные колебания возникают в контуре из катушки индуктивности и конденсатора, то переменное магнитное поле оказывается связанным с катушкой, а переменное электрическое поле - сосредоточенным в пространстве между пластинами конденсатора. В области между пластинами периодически меняется напряженность электрического поля, вследствие чего создается переменное во времени магнитное поле. Такой контур называется закрытым. Закрытый колебательный контур практически не излучает электромагнитные волны в окружающее пространство. Чтобы распространение электромагнитных волн играло заметную роль, или, как говорят, чтобы система заметно излучает, необходимо увеличить размер области пространства, в которой создаются переменные поля. Если контур состоит из катушки и двух пластин конденсатора, не параллельных друг другу, то чем под большим углом развернуты эти пластины, тем более свободно выходит электромагнитное поле в окружающее пространство. Предельным случаем раскрытого колебательного контура являются два проводника, разделенных узким зазором, которые подключаются к генератору электромагнитных колебаний. Такая колебательная система и представляет собой простейшую антенну - электрический диполь или вибратор Герца. В диполе при колебаниях протекает переменный ток, который на концах диполя отражается и меняет направление на обратное; происходит интерференция бегущей и отраженной волн тока, в результате чего в нем устанавливаются стоячие волны. Это значит, что амплитуда тока имеет в разных местах диполя разное значение. На концах диполя сила тока обращается в нуль, а в середине имеет максимум. При периодическом процессе амплитуда заряда наибольшая в тех местах, где ток равен нулю.

Схематически диполь можно представить как два равных и разноименных заряда. Электрическое поле неизменного диполя характеризуется линиями напряженности, которые начинаются на одном заряде и кончаются на другом. Не так, вообще говоря, обстоит дело, если заряды, образующие диполь меняются. Это происходит из-за того, что поле распространяется в пространстве с конечной скоростью и значение напряженности E в какой-либо точке, удаленной от диполя, в определенный момент времени соответствует зарядам диполя не в тот же, а в более ранний момент времени. На рис. 3 приведена картина последовательного формирования замкнутых линий напряженности электрического поля переменного диполя. Силовые линии магнитного поля перпендикулярны силовым линиям электрического поля (рис 3, б,

отвечающий виду на диполь "сверху"). Переменное вихревое электрическое поле, имеющее замкнутые силовые линии, создает переменное вихревое магнитное поле. В свою очередь, переменное вихревое магнитное поле создает вихревое электрическое. Вокруг колеблющегося диполя образуется электромагнитная волна.

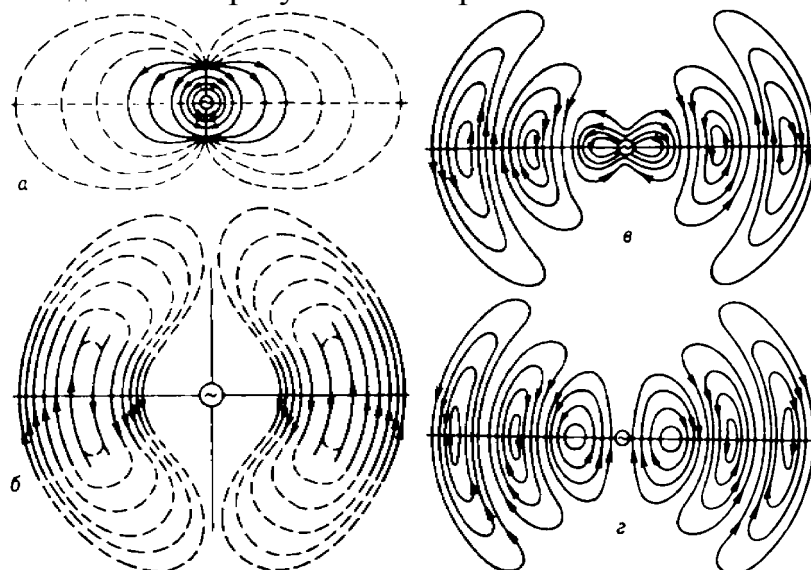


Рис. 3. Силовые линии поля переменного диполя и формирование электромагнитной волны.

Вблизи диполя поле носит сложный характер, но на расстояниях, больших по сравнению с его размерами, в области, которая носит название *волновой зоны*, поле имеет сравнительно простой вид. Примем направление диполя за ось сферической поверхности (рис. 4) и проведем по отношению к этой оси на сфере параллели и меридианы.

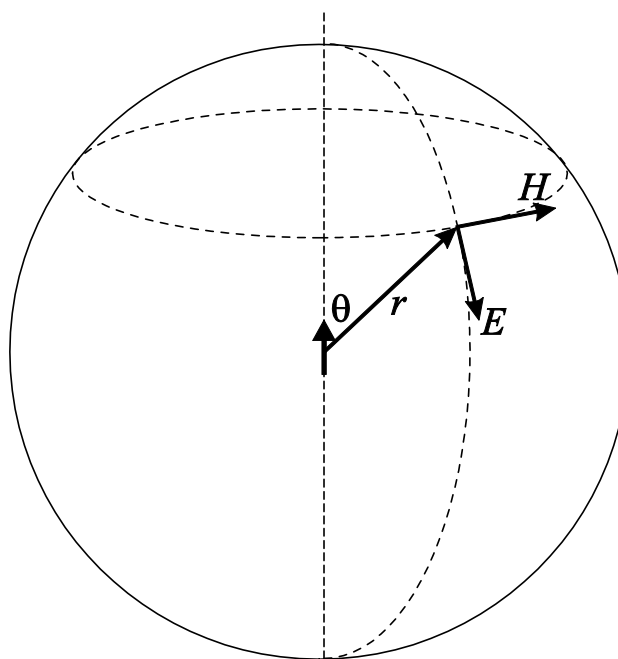


Рис. 4. Направление векторов \vec{E} и \vec{H} в волновой зоне диполя.

Тогда напряженность электрического поля \vec{E} в любой точке направлена по касательной к меридиану, а напряженность магнитного поля \vec{H} направлена по касательной к параллели. Существенно, что вектор \vec{E} в данной точке перпендикулярен вектору \vec{H} в той же точке, и оба вектора перпендикулярны к радиусу сферы, т.е. к направлению распространения волны. Величина напряженностей магнитного и электрического полей уменьшается от экватора к полюсу: для точек, расположенных на продолжении оси диполя, обе напряженности равны нулю; для точек, лежащих в экваториальной области, напряженности имеют наибольшее значение. В соответствии с этим и *плотность потока излучаемой энергии* зависит от угла θ , который составляет направление излучения с осью диполя. Плотность потока энергии является важнейшей характеристикой излучения. Она равна количеству энергии, переносимому электромагнитной волной за одну секунду через единичную площадку (площадью 1 м^2 в системе СИ), лежащую в плоскости векторов \vec{E} и \vec{H} в данной точке. Зависимость плотности потока энергии от угла θ удобно изображать векторной диаграммой (см. рис. 5), которая называется *диаграммой направленности* и является основной характеристикой антенны.

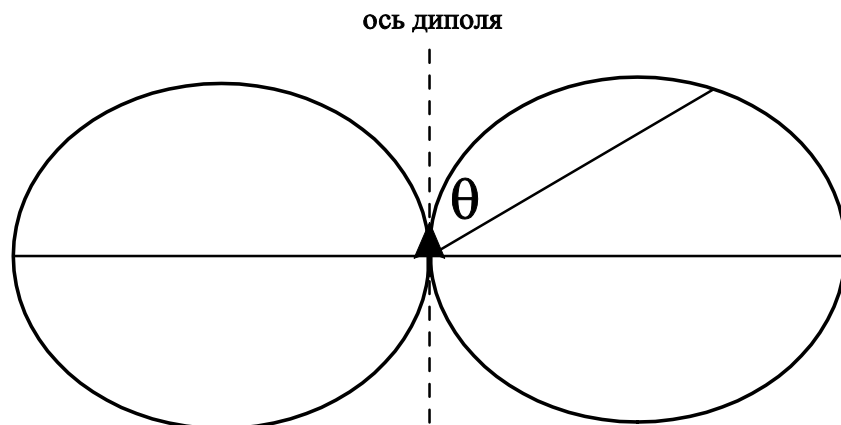


Рис. 5. Диаграмма направленности электрического диполя.

Для каждого направления θ откладываются отрезки, длина которых пропорциональна величине плотности потока энергии под данным углом.

Если напряжение в диполе меняется по закону

$$V = V_0 \sin \omega t, \quad (5)$$

где ω - циклическая частота колебаний, то и напряженность поля E в каждой точке пространства меняется периодически с той же частотой ω , но с запозданием по фазе. Запоздание по фазе тем больше, чем дальше от диполя расположена точка наблюдения. Это запоздание вызвано тем, что электромагнитное поле распространяется с конечной скоростью c . Таким образом, вокруг диполя возникает *сферическая электромагнитная волна*. Если через r обозначить расстояние от диполя до точки наблюдения, то напряженность поля E в волновой зоне можно записать как

$$E = \frac{E_0 \sin \theta}{r} \sin \left[\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \right]. \quad (6)$$

Аналогичным образом ведет себя и магнитное поле в волновой зоне. Амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей в сферической волне уменьшаются обратно пропорционально расстоянию r .

Как мы уже отмечали, электромагнитные волны переносят энергию. Среднюю за период колебания мощность (т.е. полную энергию, излучаемую антенной за единицу времени) можно представить как мощность, поглощаемую в некотором активном сопротивлении R . Это сопротивление называется *сопротивлением излучения*. Кроме того, как и любая электрическая цепь, в которой протекает переменный ток, антенна не обладает только активным сопротивлением. *Реактивная часть* (или *реактанс*) входного сопротивления антенны показывает, насколько колебания напряжения на входе антенны (в месте подключения генератора) опережают (или отстают) по фазе от колебаний силы тока. Можно также сказать, что реактивная часть характеризует величину электромагнитной энергии, которой антенна периодически обменивается с генератором. Электрический диполь в вакууме обладает емкостным сопротивлением, подобно конденсатору в цепи переменного тока. Колебания напряжения здесь отстают по фазе от колебаний силы тока.

Не менее часто, чем электрический диполь, используется антенна магнитного типа - *магнитный диполь* или *рамочная антенна*. В простейшем случае магнитный диполь представляет собой виток провода, подключенный к генератору электромагнитных колебаний (см. рис. 6).

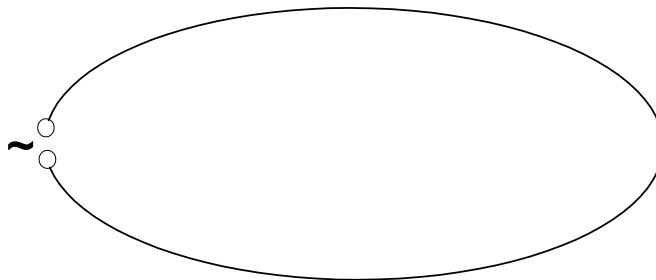


Рис. 6. Магнитный диполь.

В случае магнитного диполя картина формирования полей такая же, как и для электрического с заменой \vec{E} на \vec{H} и \vec{H} на $-\vec{E}$. Диаграмма направленности электрического и магнитного диполей одинакова (рис. 5). Вполне понятно, однако, что магнитный диполь представляет из себя предельный случай катушки с током и обладает индуктивным сопротивлением. Колебания напряжения на входе опережают по фазе колебания силы тока.

Электрический и магнитный диполи являются основными структурными элементами антенных систем в широком диапазоне длин волн. Большое число типов и конструкций антенн представляют из себя

различные комбинации этих простейших излучателей. Важнейшая функция антенн состоит в формировании излучения с заданной диаграммой направленности. Кроме того, для повышения эффективности излучения (увеличения амплитуд полей в волновой зоне) необходимо уметь рассчитывать входное сопротивление антенны.

Особенности работы антенн в плазме

Антенны, расположенные на искусственных спутниках Земли и других космических аппаратах окружены плазмой ионосферы или межзвездного космического пространства. Свойства плазмы существенно меняют структуру электромагнитного поля и входное сопротивление антенн по сравнению с вакуумными. Для обеспечения надежной радиосвязи с космическими аппаратами нужно уметь прогнозировать характеристики антенн в плазме. Несмотря на то, что литература, посвященная теоретическому расчету этих характеристик, не говоря уже о многочисленных экспериментальных приложениях, очень обширна, природа многих физических явлений, сопровождающих работу антенн в плазме, остается невыясненной. Мы остановимся здесь лишь на некоторых интересных особенностях.

Будем рассматривать электрический диполь, помещенный в плазму. Диполь подключается к генератору синусоидальных колебаний (см. формулу (5)). Оказывается, что на частотах меньше некоторой характерной частоты (называемой *плазменной частотой*) отсутствует излучение электромагнитных волн. Это явление связано с тем, что плазма, как мы знаем, является хорошо проводящей средой. Такая среда может полностью отражать электромагнитные волны (подобно металлической оболочке). В результате электромагнитная энергия не уходит в виде волн, а остается запасенной в области вблизи антенны (так называемом *ближнем поле*). Сопротивление излучения в этом случае равно нулю, а реактанс электрического диполя имеет индуктивный характер(!). То есть, электрический диполь в плазме на этих частотах подобен катушке с током. При увеличении частоты генератора (или при изменении параметров плазмы) антенна начинает излучать электромагнитные волны. Сопротивление излучения уже не равно нулю, а реактивная часть входного сопротивления меняет свой характер от индуктивного к емкостному. Схожие особенности имеет и излучение магнитного диполя в плазме.

Заметим теперь, что антенны, расположенные на борту космических аппаратов, на самом деле не просто помещены в плазму, а еще и движутся относительно нее с большой скоростью. Оказывается, что при учете этого движения амплитуда колебаний тока на проводнике, обтекаемом плазмой, может нарастать во времени. Или, как говорят, система антенна-плазма становится неустойчивой. В антенне (даже не подключенной к генератору) могут возникать электромагнитные колебания. При этом сопротивление

излучения становится отрицательным. Происходит переход кинетической энергии движения заряженных частиц плазмы в электромагнитную энергию. Данное явление может служить одним из источников шумов, регистрируемых антеннами космических аппаратов.

Наконец, благодаря высокой проводимости плазма сама может играть роль антенного провода. В последнее время большой интерес вызывает создание *плазменных антенн* - искусственных плазменных структур с регулируемыми свойствами. Столбы плазмы, получаемой в диэлектрических газоразрядных трубках, могут играть роль металлических проводников электрического диполя. Такая плазменная антенна обладает преимуществами маскировки в радиолокационном диапазоне, быстрого включения и быстрого изменения своих параметров. В ионосферной и космической плазме вытянутые управляемые плазменные образования, играющие роль плазменных антенн, могут формироваться полем "обычных" металлических излучателей (например, рамочного типа).

Приведенные примеры наглядно демонстрируют многообразие интересных физических явлений, сопутствующих работе антенн в плазме. Эта область физики активно развивается, что приводит к появлению новых технических решений, постепенно меняющих нашу жизнь.