

Глава 20 Электромагнитные волны

§ 161. Экспериментальное получение электромагнитных волн

Существование электромагнитных волн — переменного электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью, — вытекает из уравнений Максвелла (см. §139). Уравнения Максвелла сформулированы в 1865 г. на основе обобщения эмпирических законов электрических и магнитных явлений. Как уже указывалось, решающую роль для утверждения максвелловской теории сыграли опыты Герца (1888), доказавшие, что электрические и магнитные поля действительно распространяются в виде волн, поведение которых полностью описывается уравнениями Максвелла.

Источником электромагнитных волн в действительности может быть любой электрический колебательный контур или проводник, по которому течет переменный электрический ток, так как для возбуждения электромагнитных волн необходимо создать в пространстве переменное электрическое поле (ток смещения) или соответственно переменное магнитное поле. Однако излучающая способность источника определяется его формой, размерами и частотой колебаний. Чтобы излучение играло заметную роль, необходимо увеличить объем пространства, в котором переменное

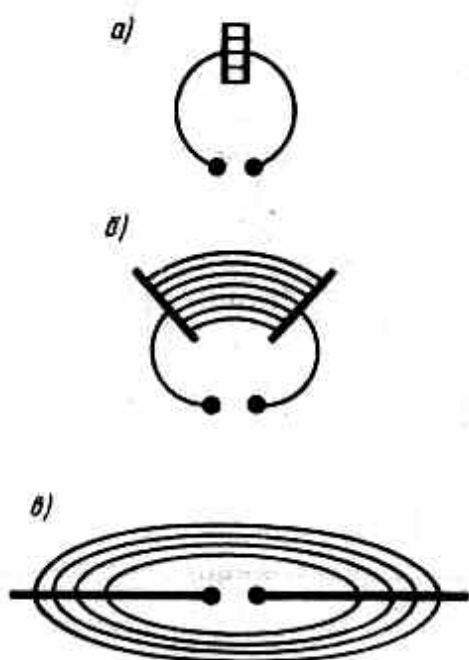


Рис. 225

Поэтому для получения электромагнитных волн непригодны закрытые колебательные контуры, так как в них электрическое поле сосредоточено между обкладками конденсатора, а магнитное — внутри катушки индуктивности.

Герц в своих опытах, уменьшая число витков катушки и площадь пластин конденсатора, а также раздвигая их (рис. 225, а, б), совершил переход от закрытого колебательного контура к **открытому колебательному контуру (вibratorу Герца)**, представляющему собой два стержня, разделенных искровым промежутком (рис. 225, в). Если в закрытом колебательном контуре переменное электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора (рис. 225, а), то в открытом оно заполняет окружающее контур пространство (рис. 225, в), что существенно повышает интенсивность электромагнитного излучения. Колебания в такой системе поддерживаются за счет источника э.д.с.,

подключенного к обкладкам конденсатора, а искровой промежуток применяется для того, чтобы увеличить разность потенциалов, до которой первоначально заряжаются обкладки.

Для возбуждения электромагнитных волн вибратор Герца *B* подключался к индуктору *I* (рис.226). Когда напряжение на искровом промежутке достигало пробивного значения, возникала искра,

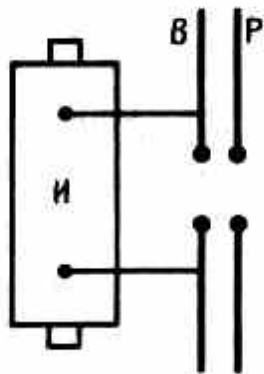


Рис. 226

255

колебания. При исчезновении искры контур размыкался и колебания прекращались. Затем индуктор снова заряжал конденсатор, возникала искра и в контуре опять наблюдались колебания и т. д. Для регистрации электромагнитных волн Герц пользовался вторым вибратором, называемым резонатором *P*, имеющим такую же частоту собственных колебаний, что и излучающий вибратор, т. е. настроенным в резонанс с вибратором. Когда электромагнитные волны достигали резонатора, то в его зазоре проскакивала электрическая искра.

С помощью описанного вибратора Герц достиг частот порядка 100 МГц и получил волны, длина которых составляла примерно 3 м. П. Н. Лебедев, применяя миниатюрный вибратор из тонких платиновых стерженьков, получил миллиметровые электромагнитные волны с $\lambda=6-4$ мм. Дальнейшее развитие методики эксперимента в этом направлении позволило в 1923 г. советскому физику А. А. Глаголевой-Аркадьевой (1884—1945) сконструировать **массовый излучатель**, в котором короткие электромагнитные волны, возбуждаемые колебаниями электрических зарядов в атомах и молекулах, генерировались с помощью искр, проскакиваемых между металлическими опилками, взвешенными в масле. Так были получены

Таблица 5

Вид излучения	Длина волны, м	Частота волны, Гц	Источник излучения
Радиоволны	10^3-10^{-4}	$3 \cdot 10^5-3 \cdot 10^{12}$	Колебательный контур Вибратор Герца Массовый излучатель Ламповый генератор
Световые волны: инфракрасное излучение	$5 \cdot 10^{-4}-8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11}-3,75 \cdot 10^{14}$	Лампы Лазеры
	$8 \cdot 10^{-7}-4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14}-7,5 \cdot 10^{14}$	
видимый свет	$4 \cdot 10^{-7}-10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14}-3 \cdot 10^{17}$	
ультрафиолетовое излучение			
Рентгеновское излучение	$2 \cdot 10^{-9}-6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17}-5 \cdot 10^{19}$	Трубки Рентгена
γ -Излучение	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	Радиоактивный распад Ядерные процессы Космические процессы

волны от 50 мм до 80 мкм. Тем самым было доказано существование волн, перекрывающих интервал между радиоволнами и инфракрасным излучением.

Недостатком вибраторов Герца и Лебедева и массового излучателя Глаголевой-Аркадьевой являлось то, что свободные колебания в них быстро затухали и обладали малой мощностью. Для получения незатухающих колебаний необходимо создать автоколебательную систему (см. § 146), которая обеспечивала бы подачу энергии с частотой, равной частоте собственных колебаний контура. Поэтому в 20-х годах нашего столетия перешли к генерированию электромагнитных волн с помощью электронных ламп. Ламповые генераторы позволяют получать колебания заданной (практически любой) мощности и синусоидальной формы.

Электромагнитные волны, обладая широким диапазоном частот (или длин волн $\lambda=c/v$, где c — скорость электромагнитных волн в вакууме), отличаются друг от друга по способам их генерации и регистрации, а также по своим свойствам. Поэтому электромагнитные волны делятся на несколько видов: радиоволны, световые волны, рентгеновское и γ -излучения (табл.5). Следует отметить, что границы между различными видами электромагнитных волн довольно условны.

256

§ 162. Дифференциальное уравнение электромагнитной волны

Как уже указывалось (см. §161), одним из важнейших следствий уравнений Максвелла (см. § 139) является существование электромагнитных волн. Можно показать, что для *однородной* и *изотропной* среды *вдали от зарядов и токов*, создающих электромагнитное поле, из уравнений Максвелла следует, что векторы напряженностей \mathbf{E} и \mathbf{H} переменного электромагнитного поля удовлетворяют

$$\Delta \mathbf{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad (162.1)$$

$$\Delta \mathbf{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}, \quad (162.2)$$

где
$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

— оператор Лапласа, v — фазовая скорость.

Всякая функция, удовлетворяющая уравнениям (162.1) и (162.2), описывает некоторую волну. Следовательно, электромагнитные поля действительно могут существовать в виде электромагнитных

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (162.3)$$

где $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, ϵ_0 и μ_0 — соответственно

электрическая и магнитная постоянные, ϵ и μ — соответственно электрическая и магнитная проницаемости среды.

В вакууме (при $\epsilon=1$ и $\mu=1$) скорость распространения электромагнитных волн совпадает со скоростью c . Так как $\epsilon\mu > 1$, то скорость распространения электромагнитных волн в веществе всегда меньше, чем в вакууме.

При вычислении скорости распространения электромагнитного поля по формуле (162.3) получается результат, достаточно хорошо совпадающий с экспериментальными данными, если учитывать зависимость ϵ и μ , от частоты. Совпадение же размерного коэффициента в (162.3) со

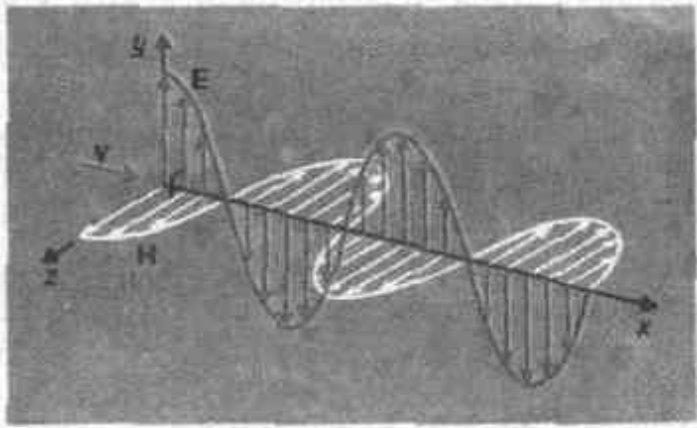


Рис. 227

скоростью распространения света в вакууме указывает на глубокую связь между электромагнитными и оптическими явлениями, позволившую Максвеллу создать электромагнитную теорию света, согласно которой свет представляет собой электромагнитные волны.

Следствием теории Максвелла является поперечность электромагнитных волн: векторы **E** и **H** напряженностей электрического и магнитного полей волны взаимно перпендикулярны (на рис. 227 показана моментальная «фотография» плоской электромагнитной волны) и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору **v** скорости распространения волны, причем векторы **E**, **H** и **v** образуют правовинтовую систему. Из уравнений Максвелла следует также, что в электромагнитной волне векторы **E** и **H** всегда колеблются *в одинаковых фазах* (см. рис. 227), причем мгновенные значения \mathcal{E} и \mathcal{H} в любой точке связаны соотношением

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} \mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 \mu} \mathcal{H}. \quad (162.4)$$

Следовательно, **E** и **H** одновременно достигают максимума, одновременно обращаются в нуль и т. д. От волновых уравнений (162.1) и (162.2) можно перейти к уравнениям

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}, \quad (162.5)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}, \quad (162.6)$$

где соответственно индексы *y* и *z* при **E** и **H** подчеркивают лишь то, что векторы

257

E и **H** направлены вдоль взаимно перпендикулярных осей *y* и *z*.

Уравнениям (162.5) и (162.6) удовлетворяют, в частности, плоские **монохроматические электромагнитные волны** (электромагнитные волны одной строго определенной частоты), описываемые уравнениями

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi), \quad (162.7)$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi), \quad (162.8)$$

где E_0 и H_0 — соответственно амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волны, ω — круговая частота волны, $k = \omega/v$ — волновое число, φ — начальные фазы колебаний в точках с координатой $x=0$. В уравнениях (162.7) и (162.8) φ одинаково, так как колебания электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне происходят с одинаковой фазой.

§ 163. Энергия электромагнитных волн. Импульс электромагнитного поля

Возможность обнаружения электромагнитных волн указывает на то, что они переносят энергию. Объемная плотность w энергии электромагнитной волны складывается из объемных плотностей $w_{эл}$ (см. (95.8)) и w_M (см. (130.3)) электрического и магнитного полей:

$$w = w_{эл} + w_M = \epsilon_0 \epsilon E^2 / 2 + \mu_0 \mu H^2 / 2.$$

Учитывая выражение (162.4), получим, что плотность энергии электрического и магнитного полей в каждый момент времени одинакова, т. е. $w_{эл} = w_M$. Поэтому

$$w = 2w_{эл} = \epsilon_0 \epsilon E^2 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu} E H.$$

Умножив плотность энергии w на скорость v распространения волны в среде (см. (162.3)), получим модуль плотности потока энергии:

$$S = wv = EH.$$

Так как векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} взаимно перпендикулярны и образуют с направлением распространения волны правовинтовую

систему, то направление вектора $[\mathbf{EH}]$ совпадает с направлением переноса энергии, а модуль этого вектора равен EH . **Вектор плотности потока электромагнитной энергии называется вектором Умова—Пойнтинга:**

$$\mathbf{S} = [\mathbf{EH}].$$

Вектор \mathbf{S} направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Если электромагнитные волны поглощаются или отражаются телами (эти явления подтверждены опытами Г. Герца), то из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны должны оказывать на тела давление. Давление электромагнитных волн объясняется тем, что под действием электрического поля волны заряженные частицы вещества начинают упорядоченно двигаться и подвергаются со стороны магнитного поля волны действию сил Лоренца. Однако значение этого давления ничтожно. Можно оценить, что при средней мощности солнечного излучения, приходящего на Землю, давление для абсолютно поглощающей поверхности составляет примерно 5 мкПа. В исключительно тонких экспериментах, ставших классическими, П. Н. Лебедев в 1899 г. доказал существование светового давления на твердые тела, а в 1910 г. — на газы. Опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения выводов теории Максвелла о том, что свет представляет собой электромагнитные волны.

Существование давления электромагнитных волн приводит к выводу о том, что электромагнитному полю присущ механический импульс. Импульс электромагнитного поля

$$p = W/c,$$

где W — энергия электромагнитного поля. Выражая импульс как $p = mc$ (поле в вакууме распространяется со скоростью c), получим $p = mc = W/c$, откуда

$$W = mc^2. \quad (163.1)$$

258

Это соотношение между массой и энергией свободного электромагнитного поля является *универсальным законом* природы (см. также §40). Согласно специальной теории относительности, выражение (163.1) имеет общее значение и справедливо для любых тел независимо от их внутреннего строения.

Таким образом, рассмотренные свойства электромагнитных волн, определяемые теорией Максвелла, полностью подтверждаются опытами Герца, Лебедева и выводами специальной теории относительности, сыгравшими решающую роль для подтверждения и быстрого признания этой теории.

§ 164. Излучение диполя. Применение электромагнитных волн

Простейшим излучателем электромагнитных волн является электрический диполь, электрический момент которого изменяется во времени по гармоническому закону

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 \cos \omega t,$$

где \mathbf{p}_0 — амплитуда вектора \mathbf{p} . Примером подобного диполя может служить система, состоящая из покоящегося положительного заряда $+Q$ и отрицательного заряда $-Q$, гармонически колеблющегося вдоль направления \mathbf{p} с частотой ω .

Задача об излучении диполя имеет в теории излучающих систем важное значение, так как всякую реальную излучающую систему (например, антенну) можно рассчитывать рассматривая излучение диполя. Кроме того, многие вопросы взаимодействия излучения с веществом можно объяснить на основе классической теории, рассматривая атомы как системы зарядов, в которых электроны совершают гармонические колебания около их положений равновесия.

Характер электромагнитного поля диполя зависит от выбора рассматриваемой точки. Особый интерес представляет так называемая **волновая зона диполя** — точки пространства, отстоящие от диполя на расстояниях r , значительно превышающих длину волны ($r \gg \lambda$), — так как в ней картина электромагнитного поля диполя сильно упрощается. Это связано с тем, что в волновой зоне диполя практически остаются только «отпочковавшиеся» от диполя, свободно распространяющиеся поля, в то время как поля, колеблющиеся вместе с диполем и имеющие более сложную структуру, сосредоточены в области расстояний $r \leq \lambda$.

Если волна распространяется в однородной изотропной среде, то время прохождения волны до точек, удаленных от диполя на расстояние r , одинаково. Поэтому во всех точках сферы, центр которой совпадает с диполем, фаза колебаний одинакова, т. е. в волновой зоне волновой фронт будет сферическим и, следовательно, волна, излучаемая диполем, есть сферическая волна.

В каждой точке векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} колеблются по закону $\cos(\omega t - kr)$, амплитуды этих векторов пропорциональны $1/r \sin \theta$

(для вакуума), т. е. зависят от расстояния r до излучателя и угла θ между направлением радиус-вектора и осью диполя. Отсюда следует, что интенсивность излучения диполя в волновой зоне $I \sim \sin^2 \theta / r^2$. (164.1)

Зависимость (164.1) I от θ при заданном значении r , приводимая в полярных координатах (рис.228), называется **диаграммой направленности излучения диполя**. Как видно из выражения (164.1) и приведенной диаграммы, диполь сильнее всего излучает в направлениях, перпендикулярных его оси ($\theta = \pi/2$). Вдоль своей оси ($\theta = 0$ и $\theta = \pi$) диполь не излучает вообще. Диаграмма направленности излу-

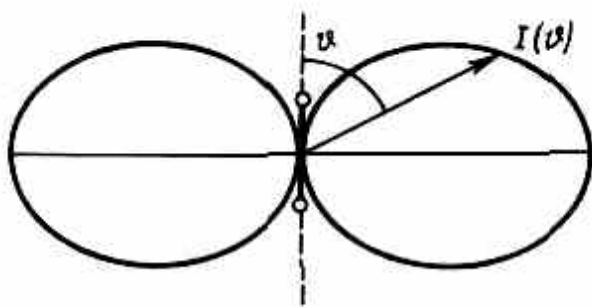


Рис. 228

ми и используется при конструировании антенн.

Впервые электромагнитные волны были использованы через семь лет после опытов Герца. 7 мая 1895 г. преподаватель физики офицерских минных классов А.С.Попов (1859—1906) на заседании Русского физико-химического общества продемонстрировал первый в мире радиоприемник, открывший возможность практического использования электромагнитных волн для беспроводной связи, преобразившей жизнь человечества. Первая переданная в мире радиограмма содержала лишь

два слова: «Генрих Герц». Изобретение радио Поповым сыграло огромную роль в деле распространения и развития теории Максвелла.

Электромагнитные волны сантиметрового и миллиметрового диапазонов, встречая на своем пути преграды, отражаются от них. Это явление лежит в основе радиолокации — обнаружения предметов (например, самолетов, кораблей и т. д.) на больших расстояниях и точного определения их положения. Помимо этого, методы

радиолокации используются для наблюдения прохождения и образования облаков, движения метеоритов в верхних слоях атмосферы и т. д.

Для электромагнитных волн характерно явление дифракции — огибания волнами различных препятствий. Именно благодаря дифракции радиоволн возможна устойчивая радиосвязь между удаленными пунктами, разделенными между собой выпуклостью Земли. Длинные волны (сотни и тысячи метров) применяются в фототелеграфии, короткие волны (несколько метров и меньше) применяются в телевидении для передачи изображений на небольшие расстояния (немного больше пределов прямой видимости). Электромагнитные волны используются также в радиогеодезии для очень точного определения расстояний с помощью радиосигналов, в радиоастрономии для исследования радиоизлучения небесных тел и т. д. Полное описание применения электромагнитных волн дать практически невозможно, так как нет областей науки и техники, где бы они не использовались.