

оговорками

$$B = \frac{3(\dot{\mathfrak{M}}r)}{vr^3} r - \frac{\dot{\mathfrak{M}}}{vr^2}, \quad E = -\frac{1}{cr^3} [\dot{\mathfrak{M}}r]. \quad (141.18)$$

Теперь разобьем весь бесконечный соленоид на бесконечно короткие цилиндрики с высотой dx . Каждый из них представляет собой точечный магнитный диполь с дипольным моментом $d\mathfrak{M} = \frac{Si}{c} dx$, где S — площадь поперечного сечения соленоида. Вычислив по предыдущим формулам магнитное и электрическое поле каждого такого кольцевого тока и проинтегрировав по длине бесконечного соленоида, получим

$$B = \frac{\pi S}{2vcR} \frac{di}{dt}, \quad E = -\frac{2S}{Rc^2} \frac{di}{dt}$$

(предполагается, что $\mu = 1$). Магнитное поле направлено параллельно оси соленоида. Электрические силовые линии имеют форму коаксиальных окружностей, центры которых расположены на оси соленоида. При интегрировании по длине бесконечного соленоида статические члены, входящие в выражение для электромагнитного поля точечного магнитного диполя, дают нуль. Поэтому они и опущены в (141.18).

§ 142. Демонстрационные опыты с электромагнитными волнами

1. Электромагнитные волны впервые были получены и исследованы на опыте Генрихом Герцем в 1887—1888 гг. *Вибратор Герца*, с помощью которого он возбуждал электромагнитные волны, состоял из двух одинаковых металлических стержней V, V , разделенных искровым промежутком (рис. 359, слева). Обе половины вибратора соединялись с индуктором I . Когда напряжение на искровом промежутке достигало пробойного значения, искровой промежуток пробивался электрической искрой, замыкавшей обе половины вибратора. В вибраторе возникали затухающие собственные электрические колебания высокой частоты с узлами тока на его концах. Наиболее интенсивным было

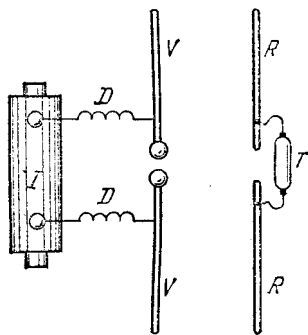


Рис. 359.

основное собственное колебание с пучностью тока посередине вибратора и с длиной волны, равной приблизительно удвоенному расстоянию между его концами. Собственные колебания с высшими частотами были слабы и практически не играли роли. Для предотвращения ухода быстропеременных токов из вибратора в катушку индуктора последний присоединялся к вибратору через дроссели D . Такой вибратор, как уже указывалось в начале предыдущего параграфа, можно рассматривать как систему точечных диполей

Герца, излучения которых складываются друг с другом и дают поле излучения всего вибратора.

Для обнаружения электромагнитных волн Герц пользовался *резонаторами* различной формы. Наиболее простым и удобным является *прямой открытый резонатор* (рис. 359, справа). По форме и размерам он должен быть тождествен с излучающим вибратором, чтобы совпадали их собственные частоты. Когда электромагнитная волна достигает резонатора, в нем возбуждаются вынужденные высокочастотные электрические токи. Они наиболее интенсивны при совпадении собственных частот вибратора и резонатора (резонанс). О появлении таких токов Герц судил по проскакиванию слабой электрической искорки в малом зазоре в середине резонатора или по свечению миниатюрной газоразрядной трубки T , включенной между обеими половинами резонатора.

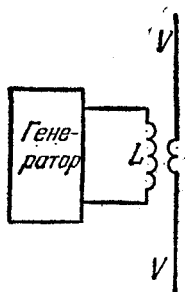


Рис. 360.

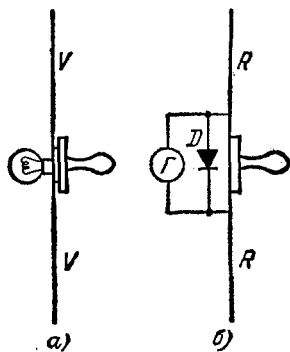


Рис. 361.

2. Недостаток аппаратуры Герца состоит в том, что свободные колебания в его вибраторе *быстро затухают* и обладают малой мощностью. От этого недостатка свободны *ламповые генераторы*, позволяющие получать колебания *практически любой мощности* и притом *правильной синусоидальной формы*. Они могут быть использованы вместо индуктора I для возбуждения незатухающих колебаний в вибраторе. С этой целью можно, например, между половинами вибратора VV ввести один или несколько витков медной проволоки, индуктивно связанных с катушкой самоиндукции L генератора (рис. 360).

Для обнаружения излучения вибратора в промежутке между концами приемного резонатора можно включить маленькую электрическую лампочку (рис. 361, а). Этот способ особенно удобен в демонстрационных опытах, когда расстояния между вибраторами и резонатором невелики и поэтому колебания, возникающие в резонаторе, достаточно сильны. Для обнаружения более слабых коле-

баний в промежуток между половинами резонатора можно ввести *кристаллический детектор* D и к его концам присоединить гальванометр постоянного тока Γ (рис. 361, б). Сопротивление детектора зависит от направления тока. Когда ток через детектор течет в пропускном направлении, то сопротивление детектора мало. Мало и напряжение на детекторе. Если же ток течет в запорном направлении, то напряжение на детекторе сильно возрастает. Поэтому в случае переменного тока на детекторе появляется постоянная составляющая напряжения, а через гальванометр течет ток *постоянного направления*. Этот способ применяется в большинстве опытов, описываемых ниже.

Вместо детектора можно взять *когерер*, т. е. стеклянную трубочку, наполненную оксидированными металлическими опилками. Действие его разъясняется на примере следующей демонстрации.

3. Искровой вибратор, возбуждаемый индуктором (см. рис. 359, слева), помещается в соседней комнате, резонатор с когерером — в аудитории. В цепь когерера K включена батарея с амперметром (рис. 362). В обычном состоянии сопротивление опилок когерера очень велико, и амперметр не обнаруживает тока. При включении индуктора электромагнитные волны, излучаемые вибратором, попадая на когерер, вызывают искорки, проскакивающие между опилками. Происходит *спекание опилок*, и сопротивление их резко уменьшается

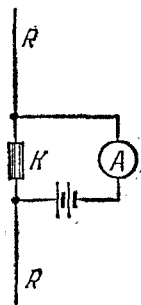


Рис. 362.

(в сотни раз). В результате через амперметр начинает идти ток от батареи, не прекращающийся и при выключении индуктора. Если, однако, слегка постучать по когереру, то спекание опилок исчезает, сопротивление когерера сильно возрастает, и ток через амперметр прекращается. Амперметр снова обнаружит ток, если включить индуктор и тем самым заставить вибратор излучать электромагнитные волны.

4. В следующей демонстрации колебания в вибраторе возбуждаются ламповым генератором с длиной волны $\lambda = 3$ м и частотой $\nu = 10^8$ Гц по схеме рис. 360. Прием осуществляется резонатором с лампочкой (см. рис. 361, а). Длина вибратора и резонатора $\lambda/2 = 1,5$ м. Резонатор и вибратор устанавливаются на некотором расстоянии параллельно друг к другу и перпендикулярно к линии AB , соединяющей их центры, как указано на схематическом рис. 363. В этом случае лампочка горит ярко. Если поворачивать резонатор вокруг оси AB , то накал лампочки уменьшается, совсем пропадая при повороте на 90° . То же происходит, если поворачивать резонатор вокруг оси, перпендикулярной к плоскости рисунка, — накал пропадает, когда резонатор устанавливается параллельно линии AB . Дело в том, что электромагнитные волны,

излучаемые вибратором, *линейно поляризованы*: электрический вектор волны в точке B параллелен оси вибратора. Токи в резонаторе возбуждает только составляющая электрического вектора, направленная *вдоль оси резонатора*. Она, а следовательно, и возбуждаемый ею ток пропорциональны косинусу угла α между осями вибратора и резонатора. Следовательно, джоулево тепло, выделяющееся в лампочке, должно быть пропорционально квадрату того же косинуса. Если приемный резонатор перемещать параллельно самому себе вдоль линии AB , то при удалении от вибратора накал лампочки уменьшается не монотонно, а проходит через максимумы и минимумы. Дело в том, что волны, излучаемые вибратором, отражаются от стен аудитории и в ней устанавливается некоторое подобие стоячей волны с узлами и пучностями. Лампочка горит ярче в пучностях электрического поля и слабее в узлах.

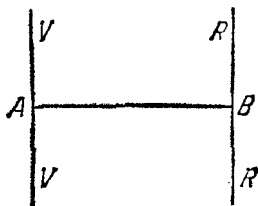


Рис. 363.

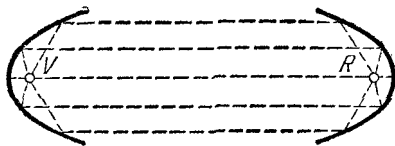


Рис. 364.

5. Используя отражение волн от металлических поверхностей, Герц получал *направленные волны*, подобные параллельным пучкам света. Изгибанием металлических листов изготавливались зеркала, имеющие форму параболических цилиндров. Их размеры в несколько раз превосходили длину электромагнитной волны (чтобы получить правильное отражение, не очень сильно искаженное дифракцией). Вдоль фокальной линии одного зеркала помещался небольшой вибратор, вдоль фокальной линии другого — приемный резонатор. Электромагнитные волны, исходящие от вибратора, после отражения от зеркала распространялись в виде направленного пучка параллельно главной оптической оси этого зеркала. Если зеркала были обращены отражающими поверхностями друг к другу, а их главные оптические оси совпадали, то этот направленный пучок отражался от второго зеркала, собирался в его фокусе и вызывал сильные электрические колебания резонатора (рис. 364, вибратор V и резонатор R установлены перпендикулярно к плоскости рисунка). Если же второе зеркало сместить в сторону, то пучок не попадал на него, и колебания в резонаторе не возникали. Этот опыт доказывает *прямолинейное распространение электромагнитных волн*. Если же поворачивать одно из зеркал (вместе с вибратором или резонатором) вокруг общей глав-

ной оптической оси VR , то интенсивность приема будет убывать и обратится в нуль, когда вибратор и резонатор установятся взаимно перпендикулярно. Толкование этого опыта — такое же, что и опыта, описанного в пункте 4.

6. Помещая между зеркалами на пути распространяющегося пучка (см. рис. 364) лист стекла, эбонита и других диэлектриков, а также металлические листы, можно убедиться, что все диэлектрики хорошо пропускают электромагнитные волны, а металлы не пропускают. Такое поведение металлов объясняется двумя обстоятельствами, тесно связанными между собой. Во-первых, *металлы сильно отражают электромагнитные волны*. Во-вторых, электрическое поле электромагнитной волны, частично проникшей в металл, возбуждает в нем электрические токи, энергия которых переходит в джоулево тепло, так что на протяжении толщи металла электромагнитная волна *полностью поглощается*.

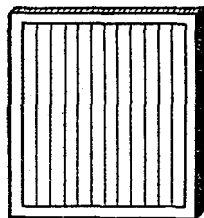


Рис. 365.

7. Вместо сплошного металлического листа можно взять сетку из параллельных медных прямолинейных проводов (рис. 365). Если такую сетку поставить на пути пучка электромагнитных волн и притом так, чтобы проволоки были параллельны вибратору и резонатору, то электромагнитные волны через нее практически не проходят. В этом случае вдоль проволок возбуждаются электрические токи и происходит поглощение электромагнитной энергии с выделением джоулева тепла. Если же проволоки сетки перпендикулярны к вибратору и резонатору, то они будут перпендикулярны и к электрическому вектору E . В этом случае ток в проволоках не возникает и волна проходит через сетку практически так же, как через диэлектрическую пластинку. Описанный опыт дает новое доказательство линейной поляризации волн, излучаемых вибратором (см. пункт 4). Заметим также, что проволочная сетка действует как *сплошная пластинка*, если расстояние между проволоками мало по сравнению с длиной волны. Проволоки делают только такую «пластинку» *анизотропной*. Этот вопрос будет подробно разобран в IV томе нашего курса — в оптике.

Поворотом зеркал вокруг их общей оптической оси установим вибратор и резонатор взаимно перпендикулярно. Приема не будет. Если же между вибратором и резонатором ввести проволочную сетку под некоторым углом к ним, то прием возобновится. Для понимания опыта разложим электрический вектор перед сеткой на две составляющие: параллельно и перпендикулярно к проволокам. Вторая составляющая будет пропущена сеткой. А так как ее электрическое поле имеет составляющую вдоль оси резонатора, то в нем возбуждятся колебания.

8. Направляя электромагнитную волну от параболического зеркала вибратора на плоское зеркало AB (металлический лист, рис. 366), можно наблюдать *отражение волны*. Оказалось, что (как и для световых лучей) угол падения волны равен углу отражения, а нормали к падающей и отраженной волнам лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности зеркала. Кроме того, легко убедиться, что металлы значительно лучше отражают электромагнитные волны, чем диэлектрики.

9. Можно наблюдать и *преломление электромагнитных волн*, изготовив большую призму из диэлектрика (парафин, сера и т. п., рис. 367). Таким путем можно убедиться в справедливости *закона преломления Снеллиуса*: отношение синуса угла падения к синусу

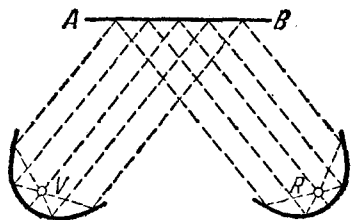


Рис. 366.

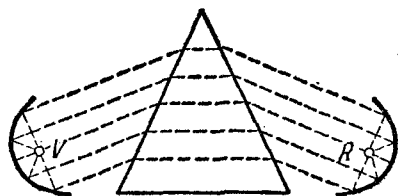


Рис. 367.

угла преломления не зависит от угла падения. Более того, опыт подтвердил соотношение $n = \sqrt{\epsilon}$ между показателем преломления среды n и диэлектрической проницаемостью ϵ . Это соотношение было теоретически установлено Максвеллом. Оно будет подробно рассмотрено в четвертом томе.

10. Можно получить и *стоячие электромагнитные волны*. Для этого волну от параболического зеркала вибратора надо нормально направить на плоское металлическое зеркало. От наложения отраженной волны на падающую образуется система стоячих волн с узлом электрического поля на поверхности зеркала (см. § 145). Положение пучностей и узлов электрического поля в такой волне исследуется с помощью резонатора обычным путем. Расстояние между соседними пучностями (или узлами) равно половине длины волны. Измерив это расстояние, можно найти длину волны λ . В опытах Герца длина волны была 60 см, а высота параболических зеркал 2 м.

11. В анизотропных кристаллах должно наблюдаться *двойное преломление электромагнитных волн*, аналогичное двойному преломлению световых лучей. Этот вывод был сделан Максвеллом. Явление двойного преломления будет подробно изучено нами в четвертом томе. Здесь же заметим, что вывод Максвелла был экспериментально проверен П. Н. Лебедевым (1866—1912) в 1895 г. Для

опытов необходимо было получить очень короткие электромагнитные волны, так как размеры кристаллов обычно не превышают нескольких сантиметров. С помощью миниатюрного искрового вибратора Лебедев получил волны с длиной около 6 мм — в сто раз короче волн Герца. С помощью таких волн он воспроизвел в кристаллах серы все явления двойного преломления, которые обычно наблюдают со световыми лучами. В частности, из кристаллов серы с эбонитовой прокладкой он изготовил прибор, вполне аналогичный *призме Николя*, применяемой в оптике для получения *поляризованного света*.

Опыты Герца сыграли решающую роль для доказательства и быстрого признания электродинамики Максвелла и электромагнитной теории света. Через семь лет после этих опытов (1895) электромагнитные волны нашли применение в *беспроволочной телеграфии и телефонии (радио)*. Пионером в этой области был наш соотечественник А. С. Попов.

§ 143. Волны вдоль проводов

1. Рассмотрим два одинаковых параллельных провода, в которых с помощью генератора могут возбуждаться переменные токи высокой частоты. Такие два провода называются *системой Лехера*. Связь проводов с генератором может быть либо *емкостной*, либо *индуктивной* (рис. 368). Примем, что по отношению к поперечным размерам системы выполнено условие квазистационарности. Это значит, что расстояние между проводами должно быть весьма мало по сравнению с длиной волны. В то же время будем предполагать провода длинными — на их длине должно укладываться по меньшей мере несколько волн. Поэтому электрические токи в проводах *не квазистационарны*, сила тока $\mathcal{I}(x)$, а также линейная плотность электрического заряда $q(x)$ существенно меняются вдоль проводов (ось X направлена параллельно проводам). В силу предполагаемой симметрии ток $\mathcal{I}(x)$, текущий вдоль одного из проводов, равен и противоположно направлен току, текущему напротив него вдоль другого провода. Аналогичное утверждение относится к величинам зарядов на проводах и их знакам. Электрическое напряжение между проводами, измеренное вдоль перпендикуляра к ним, будем обозначать через $V(x)$. Указание «пути», вдоль которого измеряется напряжение, т. е. интеграл $\int E dl$, необходимо потому, что в переменном электромагнитном поле значение этого интеграла *зависит от формы пути*.

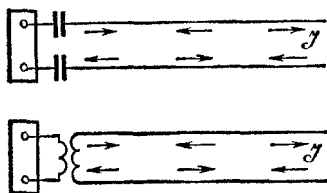


Рис. 368.