

быть всегда стационарным. Его существование требовало бы постоянного нарастания магнитного поля, поэтому строгая стационарность вихревого электрического поля могла бы обеспечиваться только магнитным полем, нарастающим до бесконечности ( $H \rightarrow \infty$ ), что невозможно.

### Теория Максвелла. Ток смещения

В своих уравнениях Максвелл соединил все известные к тому времени свойства электрических и магнитных явлений. Но записал он законы электрического и магнитного воздействия не через силы, действующие на расстоянии между зарядами и токами, а в терминах теории поля. Электрические и магнитные воздействия записывались как локальная связь (связь в малой окрестности произвольной точки пространства) между зарядами и токами и электрической и магнитной напряженностями, пространственные и временные изменения которых и вызывали воздействие на другие заряды и токи.

На языке теории поля все известные электромагнитные явления можно было описать на основе четырех дифференциальных уравнений, математическая формулировка и обсуждение которых приведены в Математическом дополнении, с 224. Отметим здесь только некоторые важные для дальнейшего изложения качественные черты теории Максвелла. Прежде всего, эта теория единообразно описывает и стационарные, и нестационарные электромагнитные явления, причем в случае нестационарных процессов уравнения Максвелла связывают пространственные и временные изменения электрического и магнитного полей. Соображения размерности требуют, чтобы в этом случае в уравнения входил коэффициент с размерностью скорости (см/с). Роль этого коэффициента, равного скорости света, мы обсудим ниже. А сейчас обратим внимание на другую важную модификацию теории нестационарных электромагнитных процессов, сделанную Максвеллом. Этой модификации требовала физическая картина, стоявшая перед его мысленным взором.

Исходя из симметрии между электричеством и магнетизмом, Максвелл предполагал, что должно существовать новое нестационарное явление, подобное явлению электромагнитной индукции. Если изменение со временем магнитной напряженности вызывает цир-

куляцию (о циркуляции см. Математическое дополнение, с. 211) электрической напряженности, то симметрия между электричеством и магнетизмом требует, чтобы изменение со временем электрической напряженности вызывало циркуляцию магнитной напряженности. В правую часть четвертого уравнения Максвелл добавил член, отвечающий этому явлению — добавил так называемый ток смещения — скорость изменения электрической напряженности со временем  $\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$ .

Множитель  $1/c$  также возникает из соображений размерности. В нестационарном случае четвертое уравнение Максвелла принимает вид (см. Математическое дополнение, с. 227)

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}.$$

Какому явлению отвечает ток смещения?

Рассмотрим плоский конденсатор (рис. 4), пластины которого однородно заряжены. Поверхностная плотность заряда (заряд, приходящийся на единицу площади пластины) на левой пластине равна  $+\sigma$ , а на правой  $-\sigma$ . Электрическая напряженность в пространстве между пластинами направлена перпендикулярно пластинам (рис. 4) и равна по абсолютной величине

$$E = 4\pi\sigma.$$

Если мы соединим пластины конденсатора проводом, то конденсатор начнет разряжаться: положительные заряды с левой пластины будут перетекать на правую пластину и компенсировать ее отрицательный заряд. По проводу пройдет ток, равный скорости изменения заряда на пластинах конденсатора. Для его описания следует ввести мгновенную скорость изменения заряда пластин со временем (а это, как мы знаем, описывается производной по времени). Если площадь пла-

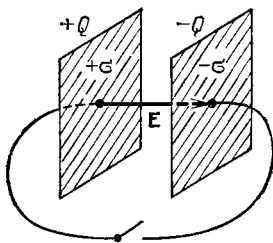


Рис. 4. Плоский конденсатор. На его пластинах равномерно распределены равные по величине и противоположные по знаку электрические заряды  $+Q$  и  $-Q$ , так что на единичной площади пластины содержится, соответственно, заряд  $+\sigma = +Q/S$  и  $-\sigma = -Q/S$ . (Здесь  $S$  — площадь пластины конденсатора.) Электрическое поле между пластинами конденсатора направлено перпендикулярно плоскости пластин и имеет величину  $E = 4\pi\sigma$

стины  $S$ , то заряд левой пластины составляет  $Q = +\sigma S$  (а правой  $-Q = -\sigma S$ ) и ток разряда  $I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(\sigma S)}{dt}$ . Число заряженных частиц должно сохраняться, поэтому-то скорость изменения заряда пластин равна току, текущему по проводу. Ясно, что заряды протекают с одной пластины на другую именно по проводу, и в области между пластинами ток не течет.

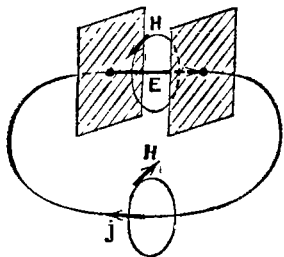


Рис. 5. Сохранение циркуляции магнитного поля  $\mathbf{H}$  по всему контуру требует, чтобы в области между пластинами конденсатора, где плотность тока  $\mathbf{j} = 0$ , циркуляция магнитного поля обеспечивалась плотностью тока смещения, равной  $\frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

Однако рассмотрим теперь циркуляцию магнитного поля по контуру, охватывающему этот провод (рис. 5). Эта циркуляция ( $\text{rot } \mathbf{H}$ ) должна равняться потоку через любую поверхность, опирающуюся на контур. Для поверхностей, пересекающих провод, — это  $\mathbf{j}$ , а для проходящих между пластинами конденсатора —  $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ . В этом смысле можно ввести представление о токе и в области между пластинами. Такой «ток» принято называть *током смещения*. Вектор плотности тока смещения должен

быть направлен перпендикулярно пластинам, а его величина должна составлять

$$j_{\text{см}} = \frac{I}{S} = \frac{1}{S} \frac{d(\sigma S)}{dt} = \frac{1}{4\pi} \frac{d(4\pi\sigma)}{dt} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

Если мы хотим ввести ток, сохраняющийся по всему контуру, то в уравнении следует учитывать наряду с плотностью обычного тока еще и вектор плотности тока смещения  $\mathbf{j}_{\text{см}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ , так что

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j} + \mathbf{j}_{\text{см}}) = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

и мы получаем четвертое уравнение Максвелла.

Исследователи трудов Максвелла отмечают, что гипотеза о токе смещения возникает в работах Максвелла как бы сама собой, без специальных оговорок и раздумий. Может быть, здесь дело в том, что в физической картине, рассматривавшейся Максвеллом, ток смещения отвечал реальному перемещению заря-

дов в особой среде — эфире. В конце XIX в. существование эфира было опровергнуто. Эта интересная глава драмы идей подробно изложена в книге А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики». Исходя из неверного постулата о существовании эфира, Максвелл получил правильные уравнения! Эти уравнения и сейчас составляют основу классической теории взаимодействия электрических зарядов и токов — электродинамики. Мы обсудим только несколько аспектов этих уравнений.

### Ток смещения и сохранение заряда

Гипотеза о токе смещения позволяет вывести из уравнений Максвелла одно важнейшее соотношение — закон сохранения электрического заряда.

Заряд — это количество электричества. Но что такое электричество? Создается ли оно, когда мы заряжаем палочку, натирая ее кусочком меха, или находится в палочке изначально и только перераспределяется между мехом и палочкой при трении, так что они получают равные заряды противоположного знака? Если мы окружим заряд металлической поверхностью, то на ней, как показал Кулон, будут наведены заряды: на внутренней поверхности появится заряд противоположного знака, на внешней — того же самого знака, что и исходный заряд. Поверхность оказывается заряженной — поднесите к ней электроскоп и его лепестки разойдутся. Поэтому, если бы трение порождало электричество, так что в эбонитовой палочке возникал бы заряд, не скомпенсированный равным по величине и противоположным по знаку зарядом кусочка меха, то, окружив лабораторию металлической поверхностью, можно было бы регистрировать появление наведенного на эту поверхность заряда. Фарадей провел внутри большой металлической клетки, окружавшей лабораторию, серию опытов по электризации трением самых разных предметов. Во всех этих опытах окружающая лабораторию металлическая поверхность оставалась незаряженной — никакой некомпенсированный заряд при электризации не возникал. Но эти результаты еще не исключали возможность одновременного рождения в разных точках палочки и меха равных зарядов противоположного знака. Эту возможность исключает формулировка закона сохранения заряда, следующая из уравнений