

ЛЕКЦИЯ 4

Электромагнетизм

План лекции

1. Ток смещения. Уравнения Максвелла.

Ток смещения

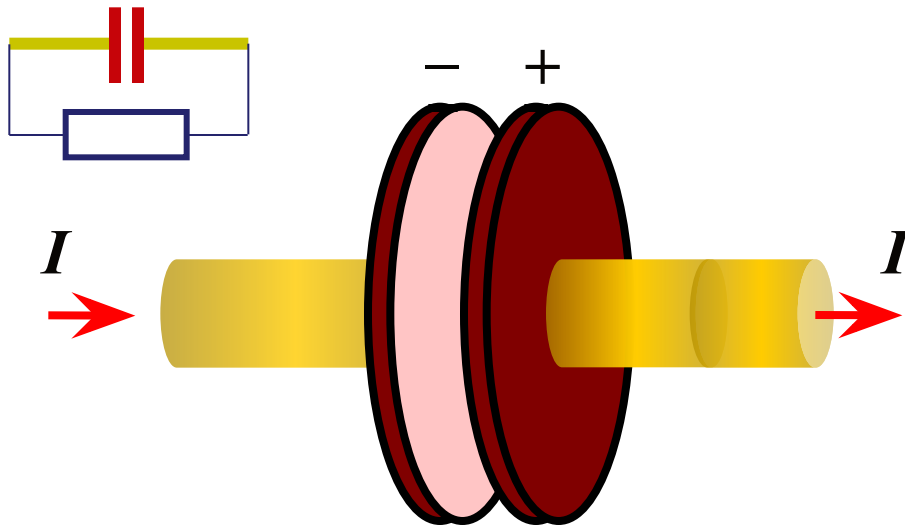
Единая теория электрических и магнитных явлений создана Максвеллом.

Максвелл предположил, что если меняющееся во времени магнитное поле $\partial \mathbf{B} / \partial t$ создает электрическое поле, то переменное электрическое поле $\partial \mathbf{E} / \partial t$ тоже должно создавать магнитное поле.

Для установления количественных соотношений между изменяющимся электрическим полем и вызываемым им магнитным полем Максвелл ввел в рассмотрение так называемый *ток смещения*.

Ток смещения

Рассмотрим цепь переменного тока, содержащую плоский конденсатор.



(Циркуляция вектора $\vec{H}$ по произвольному замкнутому контуру равна сумме токов проводимости, охватываемых этим контуром)

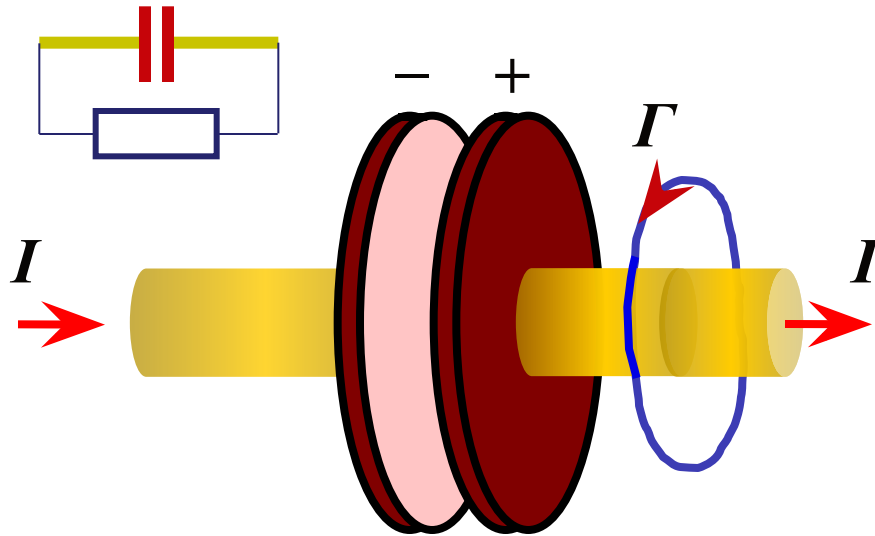
Пусть предварительно заряженный конденсатор разряжается через внешнее сопротивление.

В подводящих проводах потечет ток I .

Применим для этого случая теорему о циркуляции вектора $\vec{H}$:

$$\oint_L (\vec{H}, d\vec{l}) = \int_S (\vec{j}, d\vec{S}) = I$$

Ток смещения

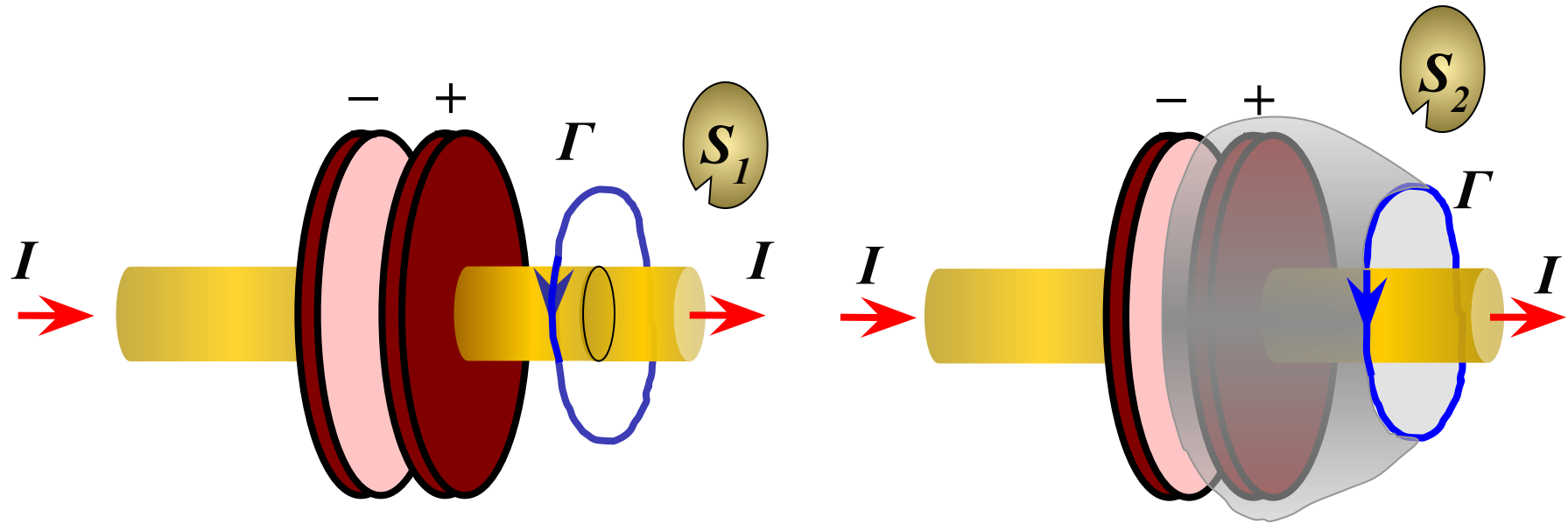


Выберем контур Γ , охватывающий подводящий провод, зададим направление обхода контура.

Для того чтобы применить теорему о циркуляции вектора $\vec{H}$, нужно выбрать поверхность, натянутую на контур Γ .

Поскольку циркуляция вектора $\vec{H}$ от формы этой поверхности не должна зависеть, рассмотрим две поверхности, натянутые на контур.

Ток смещения

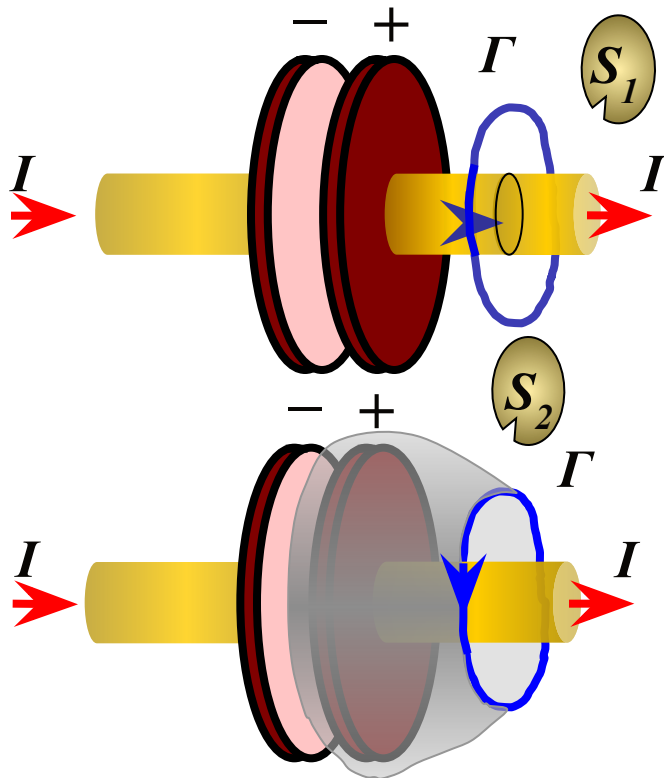


Поверхность S_1 пересекает провод с током.

Поверхность S_2 не пересекает провод с током.

Видим, что через поверхность S_1 течет ток проводимости I , а через поверхность S_2 тока нет. Линии тока проводимости терпят разрыв между обкладками конденсатора.

Ток смещения



Получается, что циркуляция вектора $\mathbf{H}$ зависит от формы поверхности, которую мы натягиваем на контур Γ , чего не может быть.

Вывод: в случае переменных полей примененное уравнение перестает быть справедливым.

~~$$\oint_L (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \int_S (\mathbf{j}, d\mathbf{S}) = I$$~~

Для разрешения противоречия Максвелл ввел в правую часть этого уравнения дополнительное слагаемое, которое назвал **плотностью тока смещения.**

Ток смещения

Выражение для тока смещения:

$$j_{см} = \partial \vec{D} / \partial t$$

Сумму токов проводимости и смещения называют **ПОЛНЫМ ТОКОМ**:

$$I_{полн} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

Ток смещения

$$j_{\text{полн}} = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad - \text{плотность полного тока.}$$

Линии полного тока непрерывны в отличие от линий тока проводимости. Токи проводимости, если они не замкнуты, замыкаются токами смещения.

Введение полного тока позволяет разрешить противоречие, возникшее при попытке применить теорему о циркуляции вектора $\vec{H}$, записанную для постоянных токов.

Для произвольного случая эта теорема будет иметь вид:

$$\oint_L (\vec{H}, d\vec{l}) = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

Ток смещения

Термин «ток смещения» - условный. По существу, это изменяющееся со временем электрическое поле.

Ему присуще только одно свойство тока проводимости – способность создавать магнитное поле. Токи смещения существуют лишь там, где имеется переменное во времени электрическое поле.

Открытие Максвеллом тока смещения – это чисто теоретическое открытие, имевшее чрезвычайно важное значение для построения теории электромагнитного поля.

Открытие тока смещения позволило Максвеллу создать единую теорию электрических и магнитных явлений – ***теорию электромагнитного поля.***

В основе теории - четыре фундаментальных уравнения. В учении об электромагнетизме эти уравнения играют такую же роль, как законы Ньютона в механике или основные законы (начала) в термодинамике.

Решение уравнений Максвелла дает возможность в любой момент времени найти параметры электрических и магнитных полей.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Уравнения Максвелла.

$$\textcircled{1.} \quad \oint_L (\vec{E}, d\vec{l}) = - \int_S \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, d\vec{S} \right)$$

Циркуляция вектора $\vec{E}$ по любому замкнутому контуру равна со знаком минус производной по времени от магнитного потока через произвольную поверхность, ограниченную этим контуром.

Электрическое поле может быть как потенциальным $\vec{E}_q$, так и вихревым $\vec{E}_B$. В уравнении $\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_B$.

Уравнение показывает, что источником электрического поля могут быть не только электрические заряды, но и изменяющиеся во времени магнитные поля.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Уравнения Максвелла.

$$2. \oint_S (\vec{B}, d\vec{S}) = 0$$

Поток вектора индукции магнитного поля через произвольную замкнутую поверхность равен нулю.

Это теорема Гаусса для магнитного поля.

Линии магнитного поля не имеют ни начала ни конца.
Магнитное поле - соленоидальное или вихревое.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Уравнения Максвелла.

$$3. \oint_L (\vec{H}, d\vec{l}) = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, d\vec{S} \right)$$

Циркуляция вектора $\vec{H}$ по любому замкнутому контуру равна полному току через произвольную поверхность, ограниченную этим контуром.

Полный ток это сумма токов проводимости и смещения. Уравнение показывает, что магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Уравнения Максвелла.

$$4. \oint_S (\vec{D}, d\vec{S}) = \int_V \rho dV$$

Поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность в произвольной среде равен стороннему заряду, заключенному внутри поверхности.

Это постулат Максвелла, выражающий закон создания электрических полей действием зарядов в произвольных средах.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Из уравнений Максвелла следует:

- источниками электрического поля являются электрические заряды, либо изменяющиеся во времени магнитные поля.
- источниками магнитного поля являются движущиеся заряды (электрические токи), либо переменные электрические поля.

Уравнения Максвелла не симметричны относительно магнитных и электрических полей. Причина: в природе существуют электрические заряды, но не обнаружены заряды магнитные.

Уравнения Максвелла для *стационарных полей* ($E, B = \text{const}$):

$$\oint_L (\vec{E}, d\vec{l}) = 0; \quad \oint_S (\vec{B}, d\vec{S}) = 0; \quad \oint_L (\vec{H}, d\vec{l}) = I; \quad \oint_S (\vec{D}, d\vec{S}) = q.$$

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Некоторые свойства уравнений Максвелла.

1. **Уравнения Максвелла выполняются во всех инерциальных системах отсчета.** Их вид не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.
2. **Уравнения Максвелла не симметричны относительно электрического и магнитного полей.** Это обусловлено тем, что в природе существуют электрические заряды, но не обнаружены магнитные.
3. **Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное поле способно существовать самостоятельно – без электрических зарядов и токов.** Изменение состояния этого поля имеет волновой характер. Это электромагнитные волны. В вакууме они распространяются со скоростью света. Максвелл - электромагнитная теория света (свет - электромагнитные волны).