

# ЛЕКЦИЯ 4

## Электромагнетизм

### План лекции

1. Ток смещения. Уравнения Максвелла.

## Ток смещения

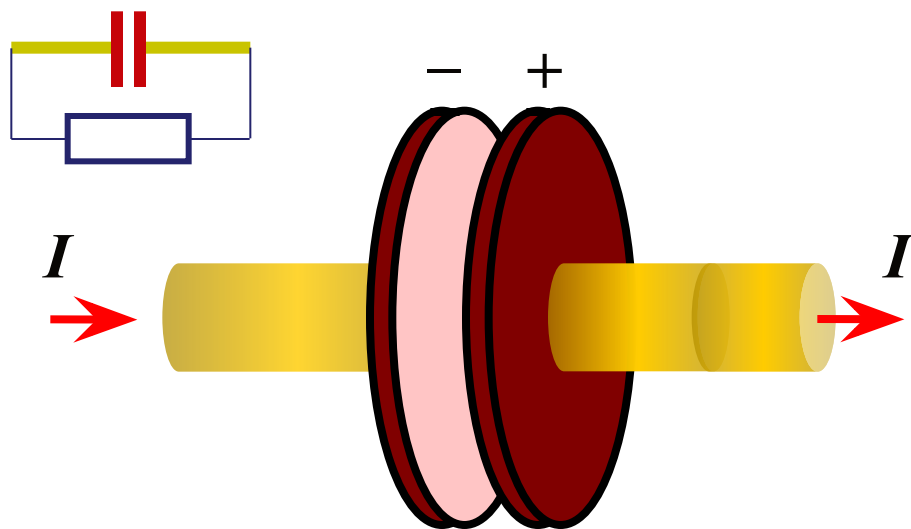
Единая теория электрических и магнитных явлений создана Максвеллом.

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)

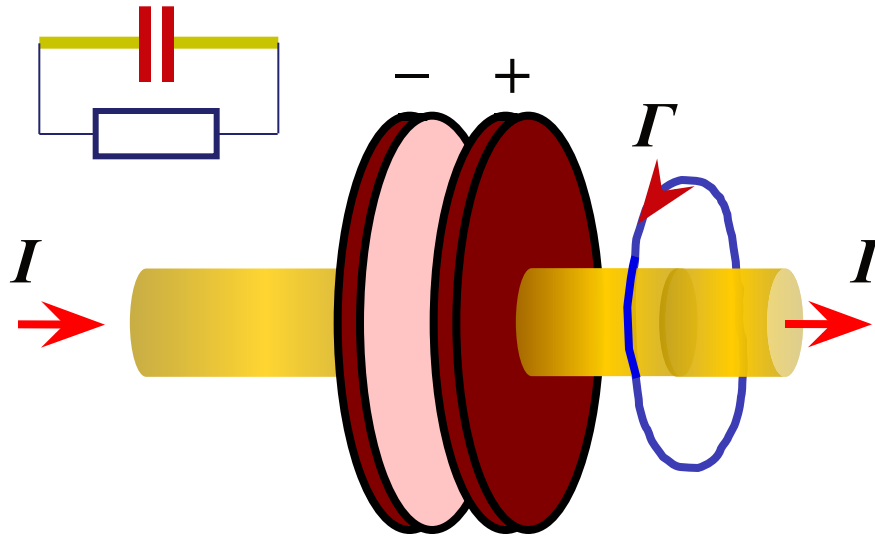
Пусть предварительно заряженный конденсатор разряжается через внешнее сопротивление.

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

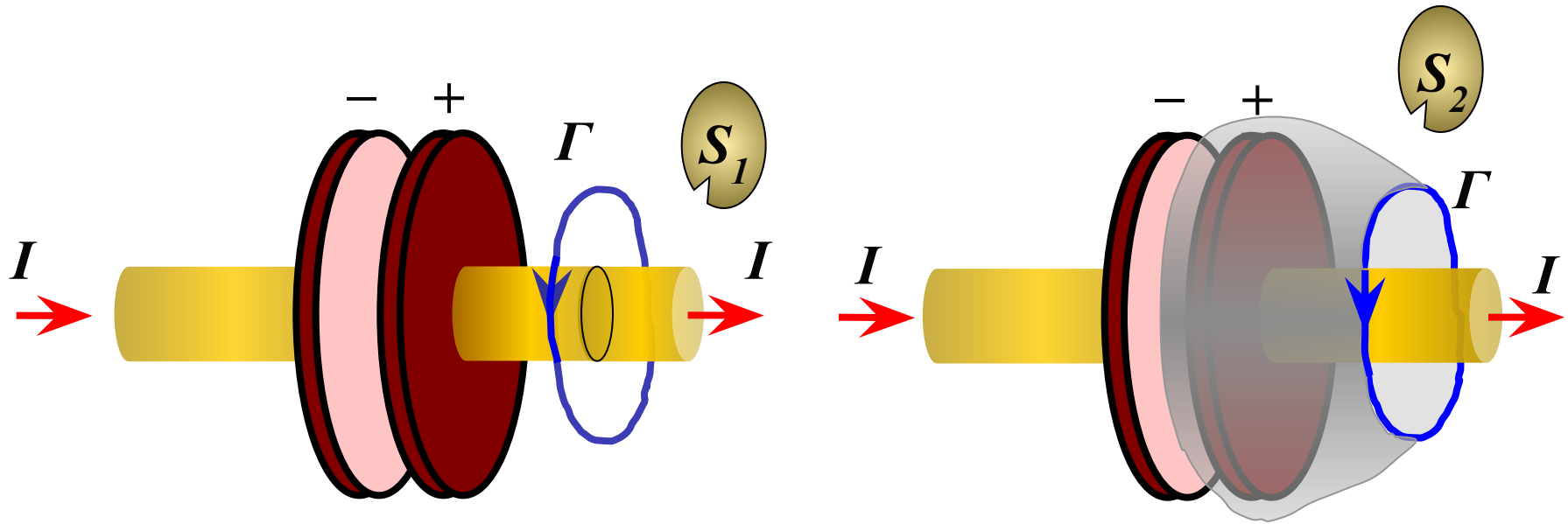


Выберем контур  $\Gamma$ , охватывающий подводящий провод, зададим направление обхода контура.

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

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

## Ток смещения

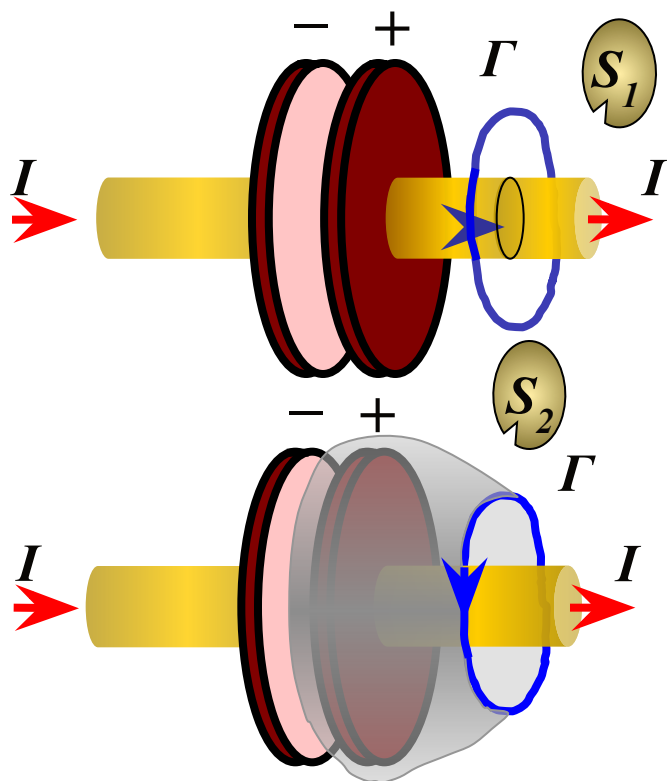


Поверхность  $S_1$  пересекает провод с током.

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  $\Gamma$ , 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:

$$\mathbf{j}_{см} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

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

$$I_{полн} = \int_S \left( \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) dS$$

## 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  $H$ , записанную для постоянных токов.

Для произвольного случая эта теорема будет иметь вид:

$$\oint_L (H, dl) = \int_S \left( j + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dS$$



## *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.

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

*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.

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

*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* ( $E, B = const$ ):

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

## 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).