Токи смещения

Теорема о циркуляции

$$\oint_l \vec{H}\,d\vec{l} = \int_S \vec{j}\,d\vec{S}$$

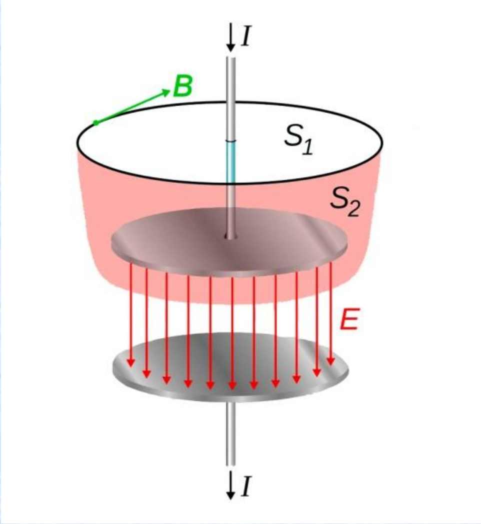
Теорема Гаусса

$$\oint \vec{D}d\vec{S} = q_{\text{своб}}$$

$$\oint \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S} = \frac{\partial q_{\text{своб}}}{\partial t}$$

Уравнение непрерывности

$$\oint \vec{j}\,d\vec{S} = -\frac{\partial q_{\text{своб}}}{\partial t}$$



$$\int_{S_1} \vec{j}\,d\vec{S} \neq 0$$

$$\int_{S_2} \vec{j}\,d\vec{S} = 0$$

???

$$\oint_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} = 0$$

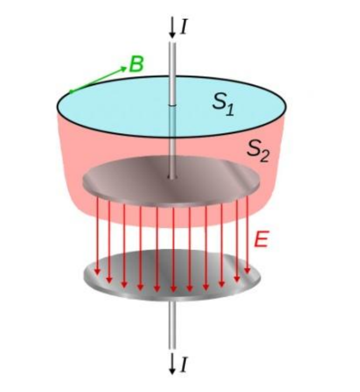
Токи смещения

$$\oint_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} = 0$$

Ток проводимости, обусловлен переносом зарядов

Ток смещения, обусловлен переменным электрическим полем

Токи проводимости замыкаются токами смещения



$$\oint_S \vec{j}_{\text{полн}} d\vec{S} = 0$$

Ток смещения эквивалентен току проводимости по способности создавать магнитное поле

Ток смещения существует только там, где есть изменяющееся во времени электрическое поле

Токи смещения

Теорема о циркуляции

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

В дифференциальной форме

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ток поляризации, обусловлен смещением связанных зарядов

Составляющая тока смещения, не связанная со смещением зарядов

Уравнения Максвелла

Дж. Максвелл, 1855-1873: обобщение экспериментальных законов и создание единой теории электромагнитных явлений.

Г. Герц, О. Хевисайд, Дж. Гиббс, 1880-е годы: современная форма записи уравнений Максвелла

Уравнения Максвелла в интегральной форме

$$\oint_l \vec{E}\,d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\,d\vec{S}$$

Циркуляция вектора *E* по замкнутому контуру равна минус скорости изменения магнитного потока через ***любую*** поверхность, ограниченную этим контуром

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

Циркуляция вектора *H* по замкнутому контуру равна ***полному*** току через ***любую*** поверхность, ограниченную этим контуром

$$\oint_S \vec{D}\,d\vec{S} = \int_V \rho\,dV$$

Поток вектора *D* через замкнутую поверхность равен сумме ***сторонних*** зарядов, охватываемых этой поверхностью

$$\oint_S \vec{B}\,d\vec{S} = 0$$

Поток вектора *B* через замкнутую поверхность всегда равен нулю

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме

$$\oint_l \vec{E}\,d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Вихревое электрическое поле создается изменяющимся магнитным полем (э/м индукция)

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

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Вихревое магнитное поле создается токами проводимости и изменяющимся электрическим полем

$$\oint_S \vec{D}\,d\vec{S} = \int_V \rho\, dV$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

Электрическое поле создается зарядами

$$\oint_S \vec{B}\,d\vec{S} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Магнитных зарядов не существует

Уравнения Максвелла

Граничные условия

$$E_{1\tau} = E_{2\tau} \qquad H_{1\tau} = H_{2\tau}$$

$$D_{1n} = D_{2n} \qquad B_{1n} = B_{2n}$$

Материальные уравнения

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \qquad \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P} \qquad \vec{B} = \mu_0 \; \vec{H} + \vec{J}$$

$$\vec{j} = \sigma \; \vec{E} + \vec{E}^*$$

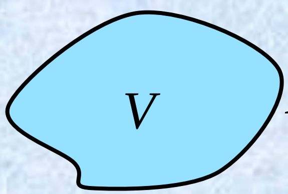
Поток энергии э/м поля. Вектор Пойнтинга

$$\begin{array}{c|l} \vec{H} & \operatorname{rot}\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ - & \\ \vec{E} & \operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{array}$$

$$\underbrace{\vec{H}\cdot\operatorname{rot}\vec{E} - \vec{E}\cdot\operatorname{rot}\vec{H}}_{\operatorname{div}\left[\vec{E}\times\vec{H}\right]} = \underbrace{-\vec{H}\cdot\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{E}\cdot\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}_{\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\vec{D}\vec{E}}{2}+\frac{\vec{B}\vec{H}}{2}\right)} - \vec{E}\cdot\vec{j}$$

Вектор Пойнтинга $\vec{S} = \left[\vec{E}\times\vec{H}\right]$

Плотность энергии w



A

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V w\,dV = -\int_V \vec{E}\vec{j}\,dV - \underbrace{\int_V \operatorname{div}\vec{S}\,dV}_{\oint_A \vec{S}\,d\vec{A}}$$

Поток энергии э/м поля. Вектор Пойнтинга

$$\frac{\partial}{\partial t}\int\limits_V w\,dV = -\int\limits_V \vec{E}\vec{j}\,dV - \oint\limits_A \vec{S}\,d\vec{A}$$

Изменение энергии э/м поля в выделенном объеме

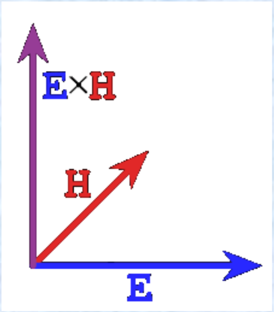
Переход энергии в тепловую форму (джоулево тепло)

Вытекание э/м энергии из объема

Образование джоулева тепла происходит только за счет токов проводимости, токи смещения тепла не выделяют

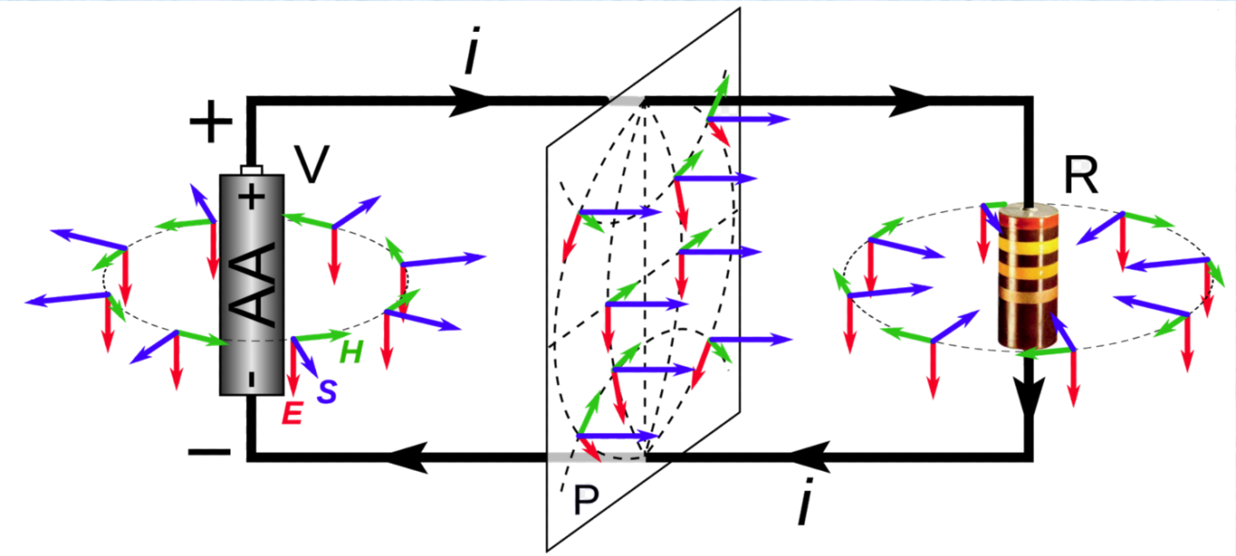
Вектор Пойнтинга $\vec{S} = \left[\vec{E} \times \vec{H}\right]$

это вектор плотности потока энергии



???

Поток вектора Пойнтинга через любую плоскость P между батареей и резистором направлен от батареи к резистору



Вокруг батареи вектор Пойнтинга направлен от батареи (энергия переносится из батареи)

Вокруг резистора вектор Пойнтинга направлен к резистору (энергия переносится в резистор)

Вопрос: Энергия передается в резистор не по проводам, а по воздуху?