

**Eðlisfræði II:**

# **Straumur, viðnám og íspenna**

**Kaflí 5**

**Jón Tómas Guðmundsson**

**tumi@hi.is**

**4. vika vor 2016**

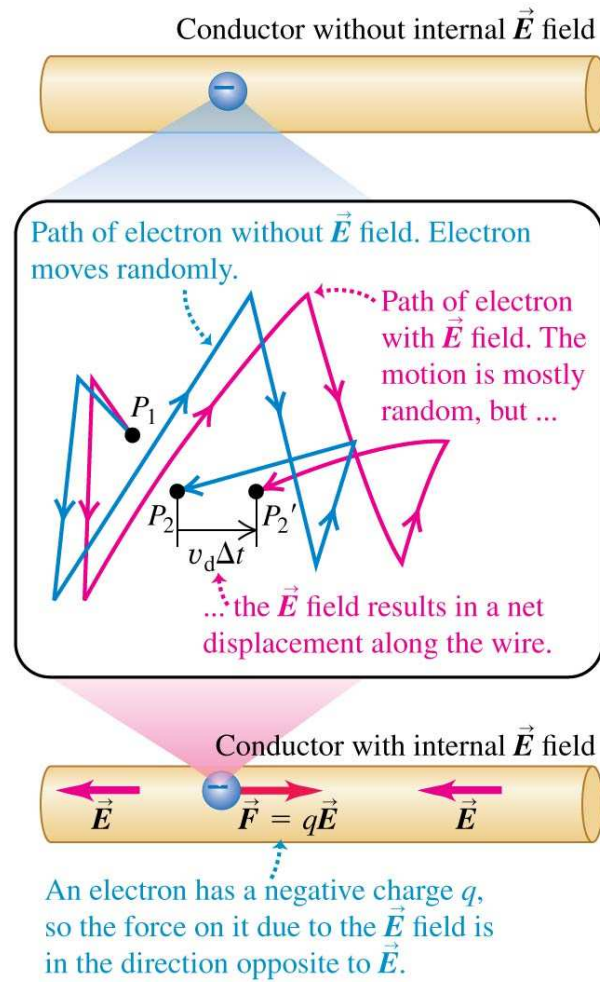
## Inngangur

- Fram til þessa höfum við verið að skoða hleðslur í kyrrstöðu
- Nú skoðum við hleðslur á hreyfingu
- **Rafstraumur** samanstendur af hleðslum sem hreyfast frá einu svæði til annars
- Ef þessar hleðslur fylgja leiðandi braut sem myndar lokaða lykkju þá er brautin kölluð **rafrás**

## Straumur

- **Straumur** er sérhver hreyfing hleðslu frá einu svæði til annars
- Í rafstöðufræðum, sem við höfum verið að skoða fram að þessu, er rafsviðið núll alls staðar innan leiðara, og það er enginn straumur
- Þetta þýðir samt ekki að allar hleðslur innan leiðarans séu í hvíld
- Í venjulegum málmum eru sumar rafeindirnar frjálssar til að hreyfa sig innan leiðarans
- Þessar frjálssu rafeindir ferðast tilviljanakennt í allar áttir og hraðinn er um  $10^6$  m/s

# Straumur



© 2016 Pearson Education, Inc.

## Straumur

- Þessar rafeindir sleppa hins vegar ekki frá leiðaranum, þar sem að þær dragast að jákvæðum jónum í efninu, og engin tilfærsla á hleðslu á sér stað
- Skoðum nú hvað gerist ef myndað er æstætt rafsvið  $\mathbf{E}$  innan leiðarans
- Hlaðin ögn innan þessa leiðar finnur þá fyrir kraftinum

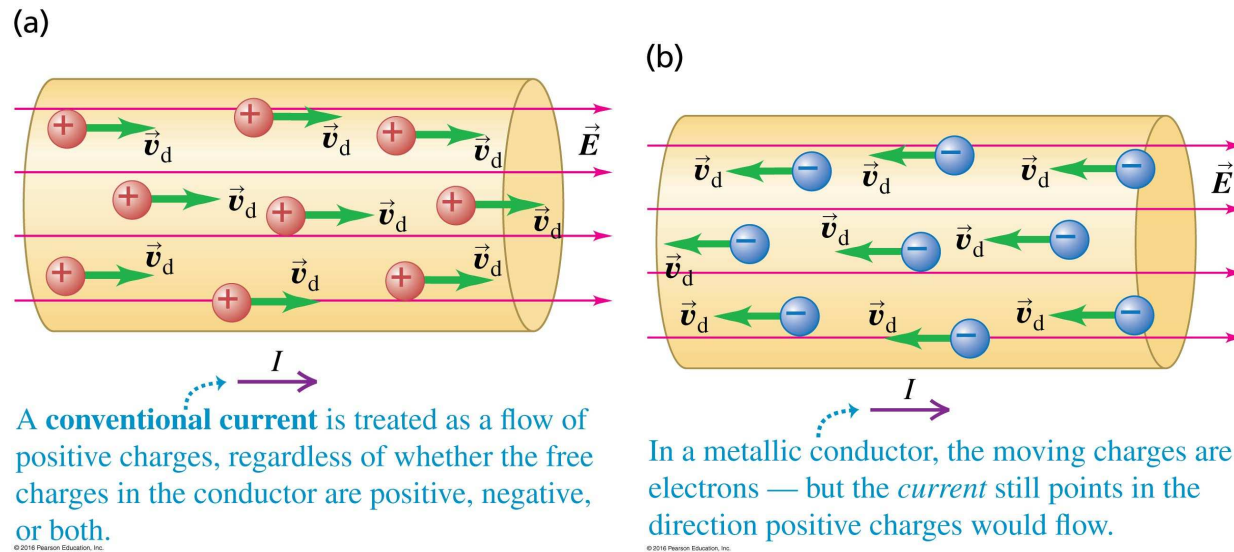
$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

- Ef þetta væri í lofttæmi leiddi þetta til stöðugrar hröðunar agnarainnar í stefnu  $\mathbf{F}$

## Straumur

- Ögn í leiðara verður hins vegar stöðugt fyrir árekstrum við jónirnar í efninu
- Þessir árekstrar breyta stefnu agnarinnar og hún verður tilviljanakennd
- Þetta veldur því að það er tiltölulega hæg færsla á safni hlaðinna agna sem er nefnd **rek** í stefnu kraftsins **F**
- Þessari hreyfingu er lýst sem **rekhraða** agnanna  $v_d$
- Niðurstaðan er að straumur rennur um leiðarann

# Straumur



- Á myndinni til vinstri er ögnin jákvætt hlaðin og rafkrafturinn í sömu stefnu og rafsviðið  $\mathbf{E}$ , og rekhraðinn  $\mathbf{v}_d$  er frá vinstri til hægri
- Á myndinni til hægri er ögnin neikvætt hlaðin og rafkrafturinn í andstæða stefnu við rafsviðið  $\mathbf{E}$ , og rekhraðinn  $\mathbf{v}_d$  er frá hægri til vinstri

## Straumur

- Við skilgreinum straum um þverskurðarflatarmáið  $A$  sem heildar flæði hleðslna um flöt á tímaeiningu
- Það er ef heildarhleðslan  $dq$  flæðir um flöt á tímaeiningu  $dt$  þá er straumurinn

$$I = \frac{dq}{dt}$$

- SI einingin fyrir straum er ampere og er skilgreind sem 1 coulomb á sekúndu ( $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ ) og er nefnd í höfðið á franska vísindamanninum André Marie Ampère



## Eðlisviðnám

- **Straumþéttleikinn  $J$**  í leiðara er háður rafsviðinu  $E$  og efniseiginleikum leiðarans
- Almennt séð geta þessi tengsl verið all flókin
- Fyrir sumt þéttefni, sér í lagi málma, við tiltekið hitastig, þá er  $J$  í réttu hlutfalli við  $E$  og hlutfall stærða  $E$  og  $J$  er fasti nefnt **eðlisviðnám**
- Við skilgreinum eðlisviðnám efnis sem

$$\rho = \frac{E}{J}$$

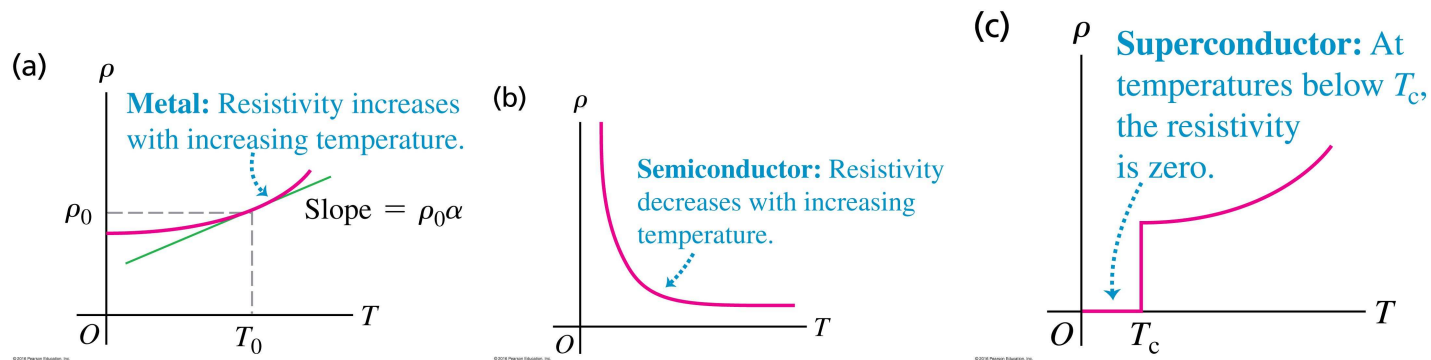
- Þetta samband er nefnt **lögmál Ohms**

## Eðlisviðnám

- Einingin á eðlisviðnámi  $\rho$  er  $[\text{V/m}]/[\text{A/m}^2] = [\text{V m/A}]$  en við vitum að 1 V/A er nefnt ohm (1  $[\Omega]$ ) svo SI einingin fyrir eðlisviðnám er  $\Omega\text{m}$
- Andhverfa eðlisviðnáms er **eðlisleiðni**,  $\sigma$  sem er mæld í  $[\Omega^{-1}\text{m}^{-1}]$

	Efni	$\rho$ [ $\Omega$ m]
Málamar	Silfur	$1.47 \times 10^{-8}$
	Kopar	$1.56 \times 10^{-8}$
	Gull	$2.44 \times 10^{-8}$
Melmi	Nichrome	$100 \times 10^{-8}$
	Constantan (60 % Cu, 40 % Ni)	$49 \times 10^{-8}$

# Eðlisviðnám



- Eðlisviðnám málmleiðara hækkar yfirleitt með hækkandi hitastigi
- Eðlisviðnám hálfleiðara lækkar með hækkandi hitastigi
- Fyrir ofurleiðara er eðlisviðnámið núll upp að tilteknu markhitastigi þar sem eðlisviðnámið hækkar skarpt

⇒ Dæmi 5.1.

⇒ Dæmi 5.2.

## Viðnám

- Fyrir leiðara með eðlisviðnám  $\rho$  sem um fer straumpéttleikinn  $\mathbf{J}$  þá er rafsviðið  $\mathbf{E}$  gefið með

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$$

- Þegar lögmál Ohms er uppfyllt er  $\rho$  fasti og óháð styrk rafsviðsins  $\mathbf{E}$  svo að það er í réttu hlutfalli við straumpéttleikann  $\mathbf{J}$
- Ef fyrir tiltekinn leiðara af lengd  $L$  og þverskurðarflatarmáli  $A$  er stærð straumpéttleikans  $\mathbf{J}$  og rafsviðsins  $\mathbf{E}$ , þá er heildarstraumurinn  $I = JA$  og mættismunurinn á milli enda hans  $V = EL$

## Viðnám

- Þar með er

$$\frac{V}{L} = \frac{\rho I}{A}$$

eða

$$V = \frac{\rho L}{A} I$$

sem segir að ef  $\rho$  er fasti, þá er heildar straumurinn í réttu hlutfalli við mættismuninn  $V$

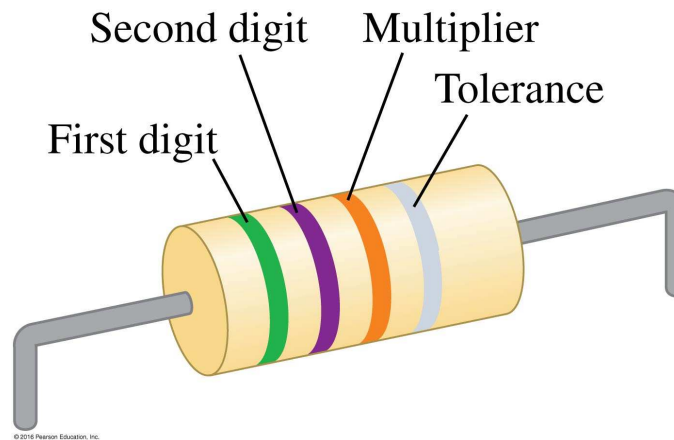
- Hlutfall  $V$  og  $I$  fyrir tiltekinn leiðara er nefnt **viðnám** leiðarans

$$R = \frac{V}{I}$$

- Við sjáum að þá er

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

# Viðnám



- Jafnan

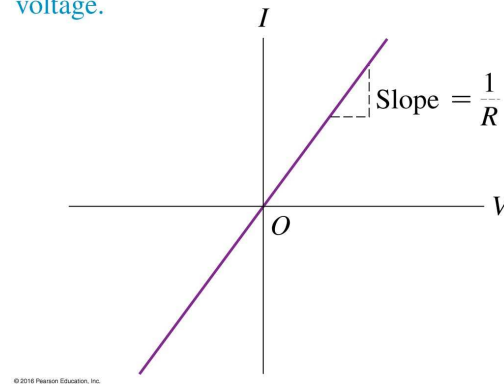
$$V = IR$$

er oft nefnd lögmál Ohms

# Viðnám

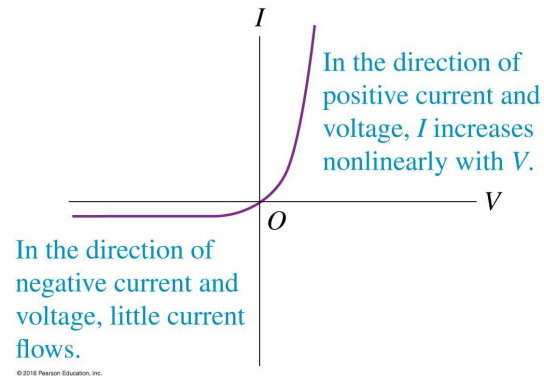
(a)

**Ohmic resistor** (e.g., typical metal wire): At a given temperature, current is proportional to voltage.



(b)

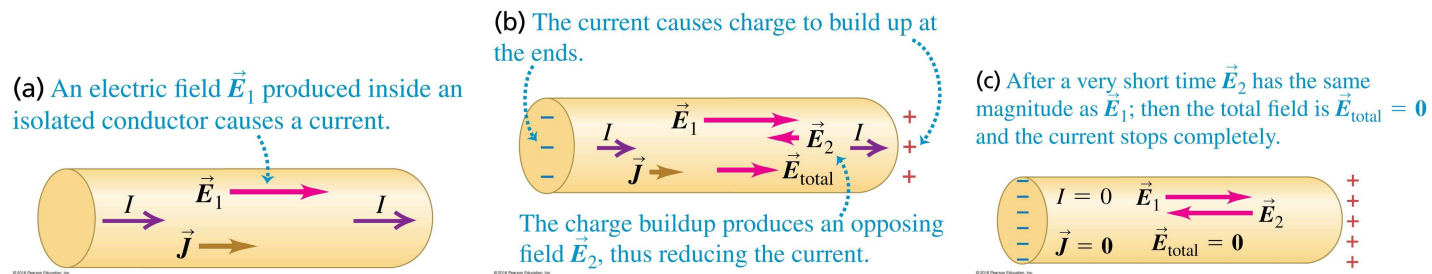
**Semiconductor diode: a nonohmic resistor**



- Fyrir viðnám sem uppfyllir lögmál Ohms er graf sem sýnir straum sem fall af mættismun (spennu) bein lína
- Hallatala þessarar línu er  $1/R$
- Myndin til vinstri er dæmi um rásaeiningu sem ekki uppfyllir lögmál Ohms – tvístur

# Íspenna og rafhlöður

- Rafrás þarf að vera lokuð til þess að æstæður straumur geti runnið í rásinni



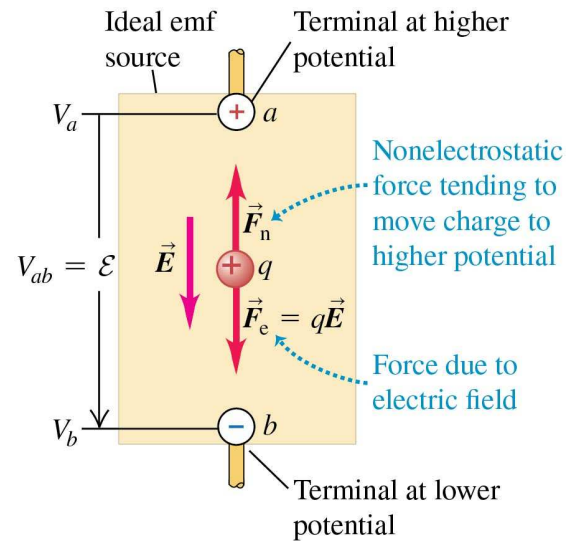
- Ef rafsvið er lagt yfir leiðara sem ekki er í lokaðri rás þá verður strumurinn nær strax núll
- Eftir stutta stund taka hleðslur að hlaðast upp á endum leiðarans og þær skapa rafsvið  $E_2$  sem er gagnstæða stefnu við álagt rafsvið  $E_1$



## Íspenna og rafhlöður

- Í sérhverri rafrás er einhver eining sem umbreytir ytri orku í rafstöðuorku – við köllum þessar einingar almennt **spennugjafa**
- Spennugjafi skilar spennu sem við köllum **íspennu** (e. electromotive force eða emf)
- Íspenna er eiginleiki rafhlöðu

# Íspenna og rafhlöður



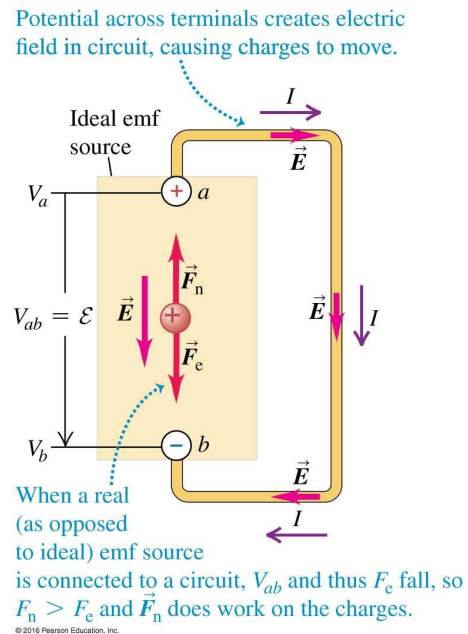
When the emf source is not part of a closed circuit,  $F_n = F_e$  and there is no net motion of charge between the terminals.

© 2016 Pearson Education, Inc.

- Kjörmynd sem viðheldur mættismuninum milli pólanna a og b

$$V_{ab} = \mathcal{E}$$

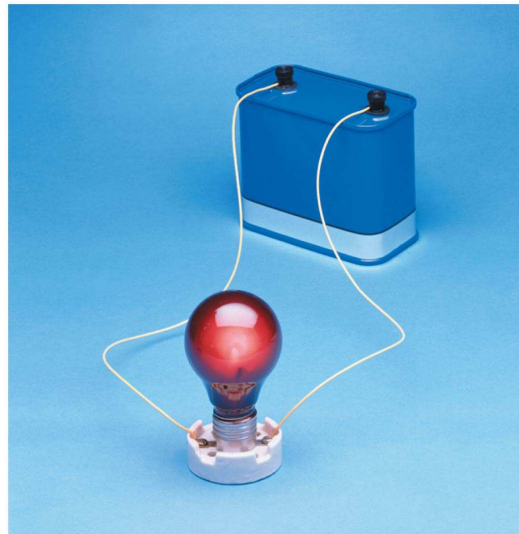
# Íspenna og rafhlöður



- Þegar mættismunurinn milli enda leiðarans er gefinn með  $V_{ab} = IR$  þá er

$$\mathcal{E} = V_{ab} = IR$$

# Íspenna og rafhlöður



- Raunverulegar spennulindir eru ekki fullkomnar
- Mættismunurinn milli póla raunverulegs spennugjafa getur verið lægri en íspennan

## Íspenna og rafhlöður

- Þetta stafar af því að hleðsla sem ferðast um efni finnur fyrir viðnámi – þetta viðnám köllum við **innra viðnám** og táknum oft með  $r$
- Spennan á milli ytri póla spennugjafans er þá

$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir$$

- Mættismunurinn  $V_{ab}$  er nefndur **pólspenna** og er lægri en íspennan
- Ef viðnám  $R$  er tengt á milli pólanna a og b þá er pólspennan

$$V_{ab} = \mathcal{E} - Ir = IR$$

## Íspenna og rafhlöður

- Straumurinn er þá

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

- Ef að straumurinn  $I$  rennur um rásaeininguna viðnám er mættismunurinn  $V_{ab} = IR$  og aflið sem eyðist í viðnáminu

$$P = V_{ab}I = IR^2 = \frac{V_{ab}^2}{R}$$

- Þetta segir að orkan sem er veitt er til ytri rásaeiningarinnar á tímæiningu er

$$P = V_{ab}I$$

## Íspenna og rafhlöður

- Fyrir lind sem lýst er með íspennu og innra viðnámi er aflið

$$P = V_{\text{ab}}I = \mathcal{E}I - I^2r$$

og  $I^2r$  er orka sú er tapast vegna innra viðnámsins á tímaeiningu, eða afltap

⇒ Dæmi 5.3.

⇒ Dæmi 5.4.

## Málmleiðni

- Eðlisviðnám efnis er gefið með

$$\rho = \frac{E}{J}$$

þar sem  $E$  og  $J$  eru stærðir rafsviðs og straumþéttleika

- Straumþéttleikann má rita

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_d$$

þar sem  $n$  er fjöldi frjálsra rafeinda á rúmmálseiningu

- Sviðið veldur krafti á hverja hleðslu  $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$  og þar með hröðun

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} = \frac{q\mathbf{E}}{m}$$

þar sem  $m$  er massi rafeindar



## Málmleiðni

- Meðaltími milli árekstra er  $\tau$  þannig að rafeind með upphafshraða  $\mathbf{v}_0$  hefur við  $t = \tau$  hraðann

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_\tau$$

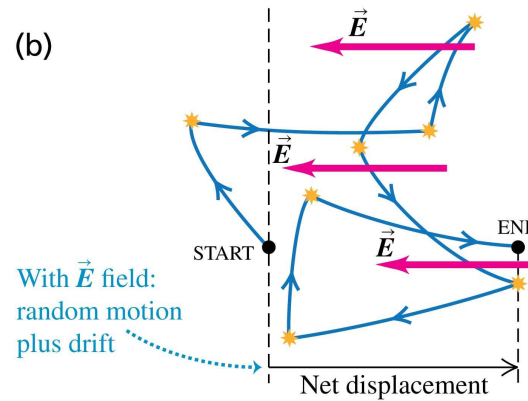
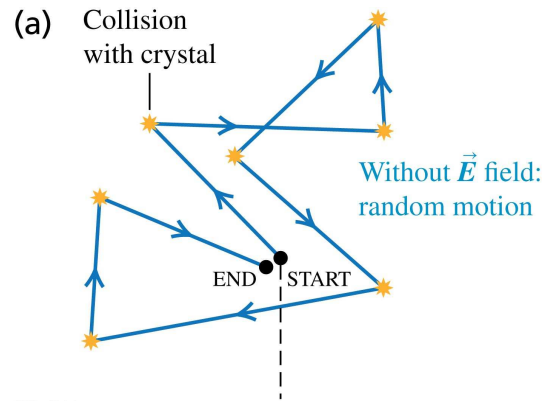
- Hraði meðal rafeindar er þá

$$\mathbf{v}_{av} = \mathbf{a}\tau = \frac{q\tau}{m}\mathbf{E}$$

- Eftir tímann  $t = \tau$  næst janfvægi milli þess að árekstrar hægi á rafeindum og að rafsviðið leitist við að hraða þeim og hraði meðal rafeindar er rekhraðinn

$$\mathbf{v}_d = \frac{q\tau}{m}\mathbf{E}$$

# Málmleiðni



- Þar með er straumbéttleikinn

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_d = \frac{nq^2\tau}{m}\mathbf{E}$$

- Við sjáum þar með að

$$\rho = \frac{nq^2\tau}{m}$$

⇒ Dæmi 5.5.

## Frekari upplýsingar

- Þessi kafli er að mestu byggður á kafla 25 hjá Young and Freedman (2015).

## Heimildir

Young, H. D. and R. A. Freedman (2015). *University Physics with Modern Physics* (14 ed.). Harlow, England: Pearson Education.