

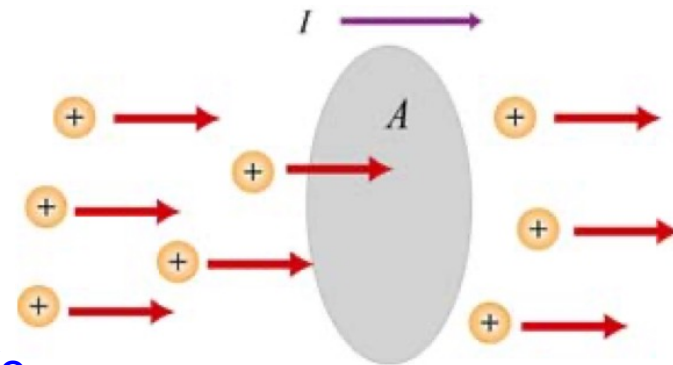
# Ρεύμα και Αντίσταση

# Ηλεκτρικό ρεύμα

Ηλεκτρικό ρεύμα είναι η ροή ηλεκτρικών φορτίων.

Υποθέτουμε ότι έχουμε μια επιφάνεια  $A$ .

Φορτία κινούνται κάθετα στην επιφάνεια .



- Ορίζουμε ως ηλεκτρικό ρεύμα, το ρυθμό με τον οποίο φορτία ρέουν από μια εγκάρσια επιφάνεια
- Αν μια ποσότητα φορτίου,  $\Delta Q$ , διαπερνά μια επιφάνεια  $A$  σε ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$  το μέσο ρεύμα είναι:  $I_{ave} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
- Μονάδες μέτρησης ρεύματος στο SI είναι το **amper**:  $1 \text{ Ampere} = 1 \text{ C/1sec}$
- Οι τιμές των ρευμάτων που συναντούμε σε καθημερινή μορφή είναι  $1 \text{ MA}$  ( $10^6$  Αμπέρ που εμφανίζεται σε αστραπές ή  $1 \text{ nA}$  που εμφανίζεται στους νευρώνες )
- Στο όριο που το χρονικό διάστημα  $\Delta t \rightarrow 0$  τότε η ποσότητα φορτίου που περνά στο διάστημα αυτό την επιφάνεια  $A$  ορίζει το ηλεκτρικό ρεύμα:  $I = \frac{dq}{dt}$
- Η ροή έχει κατεύθυνση και επομένως το ρεύμα έχει κατεύθυνση. **Κατά σύμβαση** θεωρούμε ότι η κατεύθυνση του ρεύματος είναι αυτή προς την οποία κινούνται τα θετικά φορτία. Σε έναν αγωγό κινούνται ηλεκτρόνια, ωστόσο το ρεύμα ορίζεται από την κίνηση των θετικών φορτίων

# Πυκνότητα ρεύματος

Μπορούμε να συσχετίσουμε το ρεύμα που είναι μια μακροσκοπική ποσότητα με την μικροσκοπική θεώρηση της κίνησης των φορτίων.

Για τον σκοπό αυτό θεωρούμε έναν αγωγό εγκάρσιας επιφάνειας  $A$  όπως στο σχήμα.

Γράφουμε το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό με την μορφή:

$$I = \iint \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

όπου  $\vec{J}$  είναι η πυκνότητα ρεύματος.

Μονάδα πυκνότητας ρεύματος στο SI είναι  $A/m^2$

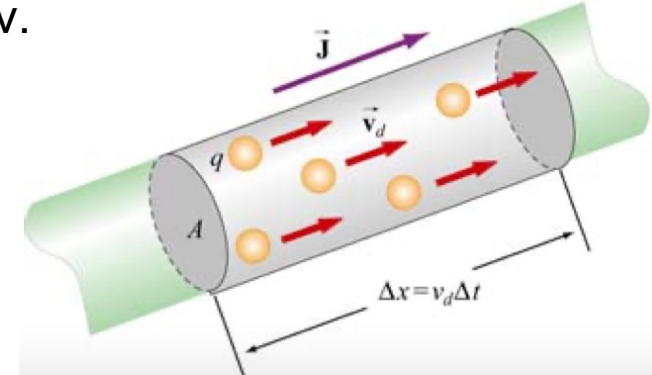
Θεωρούμε τον στοιχειώδη όγκο του αγωγού στον οποίο περιέχονται  $n$  φορείς φορτίου ανά μονάδα όγκου. Θεωρούμε ότι κάθε φορέας έχει φορτίο  $q$ .

Το φορτίο το οποίο περιέχεται στον όγκο αυτό του αγωγού είναι:

$$\Delta Q = q(nV_{\text{όγκος}}) = q(nA\Delta x) = q(nAv_d\Delta t)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση και τον ορισμό του ρεύματος έχουμε:  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqAv_d$

Η ταχύτητα  $v_d$  είναι αυτή με την οποία κινούνται οι φορείς φορτίου και ονομάζεται **ταχύτητα ολίσθησης**.



# Ταχύτητα ολίσθησης

Η ταχύτητα ολίσθησης είναι η μέση διανυσματική ταχύτητα των φορέων φορτίου μέσα στον αγωγό όταν εφαρμοστεί εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

Το ηλεκτρόνιο στο εσωτερικό του αγωγού, δεν εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση.

Η διαδρομή του είναι άτακτη όπως φαίνεται στο σχήμα

Με βάση τα προηγούμενα, γράφουμε την πυκνότητα ρεύματος,  $\vec{J}$ , με την μορφή:

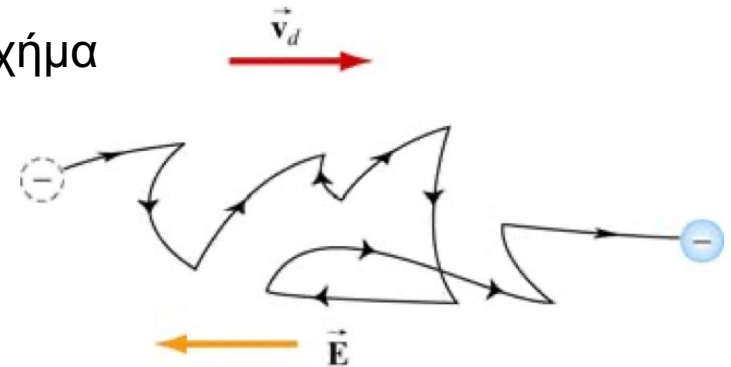
$$\vec{J} = nq\vec{v}_d$$

Για θετικούς φορείς φορτίου,  $\vec{J}$  και  $\vec{v}_d$  έχουν την ίδια κατεύθυνση ενώ για αρνητικούς φορείς φορτίου έχουν αντίθετη κατεύθυνση

Μέσα στον αγωγό ένα ηλεκτρόνιο δέχεται μια ηλεκτρική δύναμη  $\vec{F}_e = -e\vec{E}$

Εξαιτίας της δύναμης αυτής και από τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Newton, κινείται με επιτάχυνση:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_e}{m_e} = -\frac{e\vec{E}}{m_e}$$



## Ταχύτητα ολίσθησης

Καθώς το ηλεκτρόνιο κινείται μέσα στον αγωγό συγκρούεται με τα άτομα του υλικού και η διεύθυνση της κίνησής του αλλάζει με κάθε σύγκρουση:

Έστω ότι η ταχύτητα του ηλεκτρονίου μετά από μια σύγκρουση είναι  $\vec{v}_i$

Εξαιτίας της επιτάχυνσης από την δύναμη  $\vec{F}_e$ , η ταχύτητα με την οποία κινείται ακριβώς πριν την επόμενη σύγκρουσή του θα είναι:

$$\vec{v}_f = \vec{v}_i + \vec{a}\Delta t = \vec{v}_i - \frac{e\vec{E}}{m_e}\Delta t$$

όπου  $\Delta t$  ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση διανυσματική ταχύτητα των ηλεκτρονίων παίρνοντας τη μέση τιμή της  $\vec{v}_f$  ως προς όλα τα χρονικά διαστήματα.

Η μέση αυτή διανυσματική ταχύτητα αποτελεί την ταχύτητα ολίσθησης,  $\vec{v}_d$  των ηλεκτρικών φορέων:

$$\langle \vec{v}_f \rangle = \vec{v}_d = \langle \vec{v}_i \rangle + \vec{a}\langle \Delta t \rangle = \langle \vec{v}_i \rangle - \frac{e\vec{E}}{m_e}\langle \Delta t \rangle = \langle \vec{v}_i \rangle - \frac{e\vec{E}}{m_e}\tau$$

μέσος ελεύθερος χρόνος  
μεταξύ συγκρούσεων

Απουσία εξωτερικού πεδίου,  $\vec{E} = \vec{0}$  και  $\vec{v}_d = \langle \vec{v}_i \rangle = 0$  εφόσον η ταχύτητα είναι τελείως τυχαία. Η συνολική μετατόπισή του είναι 0 και επομένως  $\vec{v}_d = 0$

## Ταχύτητα ολίσθησης

Επομένως η ταχύτητα ολίσθησης παρουσία εξωτερικού πεδίου γράφεται:

$$\vec{v}_d = -\frac{e\vec{E}}{m_e} \tau$$

Χρησιμοποιώντας την ταχύτητα ολίσθησης και από τον ορισμό της πυκνότητας ρεύματος μπορούμε να γράψουμε: ( $q = e$ )

$$\vec{J} = -ne\vec{v}_d \Rightarrow \vec{J} = -ne\left(-\frac{e\vec{E}}{m_e}\tau\right) \Rightarrow \vec{J} = ne^2\left(\frac{\vec{E}}{m_e}\tau\right)$$

Παρατηρούμε ότι η πυκνότητα ρεύματος,  $\vec{J}$ , και το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  έχουν την ίδια φορά ανεξάρτητα από το είδος των φορέων φορτίου που εξετάζεται

Η ταχύτητα των ηλεκτρονίων μέσα σε έναν αγωγό είναι πάρα πολύ μεγάλη.

Αν θεωρήσουμε τα ηλεκτρόνια μέσα στον αγωγό σαν ιδανικό αέριο τότε η μέση ταχύτητά τους θα είναι:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3KT}{m}} = \sqrt{\frac{3\left(1.38 \times \frac{10^{-23}J}{K}\right)(293K)}{9.11 \times 10^{-31}kg}} \Rightarrow \langle v \rangle = 1.2 \times 10^5 m/s$$

Η ταχύτητά τους στην διεύθυνση του πεδίου, η ταχύτητα ολίσθησης δηλαδή είναι πάρα πολύ μικρή:  $\vec{v}_d \approx 0.05 mm/s$  απαιτούνται 5.5h για να διανύσει 1m

# Αντίσταση και ο Νόμος του Ohm

## Νόμος του Ohm

Σε πολλά υλικά, η πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται γραμμικά από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$

Η σχέση ανάμεσα στο πεδίο  $\vec{E}$  και την πυκνότητα ρεύματος γράφεται:  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

Η σταθερά αναλογίας,  $\sigma$ , ονομάζεται **ειδική αγωγιμότητα** του υλικού.

Η προηγούμενη σχέση αποτελεί την «ατομική» έκφραση του νόμου του Ohm

Βρήκαμε προηγουμένως ότι:  $\vec{J} = ne^2 \left( \frac{\vec{E}}{m_e} \tau \right)$  }  $\Rightarrow \sigma = \frac{ne^2}{m_e} \tau$   
 και ορίσαμε επίσης ότι:  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

Ο νόμος του Ohm δεν είναι θεμελιώδης φυσική αρχή. Είναι ένα εμπειρικός νόμος που ισχύει για ορισμένα υλικά

Υλικά που ακολουθούν την σχέση αυτή ονομάζονται Ωμικά σε αντίθεση με αυτά που δεν την ακολουθούν και ονομάζονται μη Ωμικά



# Νόμος του Ohm

Θεωρούμε ένα τμήμα αγωγού μήκους  $l$  και διατομής  $A$ :

Στα άκρα του αγωγού εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού:

$$\Delta V = V_b - V_a$$

Σαν αποτέλεσμα δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  και ρεύμα  $I$

Θεωρώντας ότι το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  είναι ομοιόμορφο έχουμε:

$$\Delta V = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} = El$$

Γράφουμε επομένως την πυκνότητα ρεύματος ως:  $J = \sigma E$

$$J = \frac{\sigma \Delta V}{l} \Rightarrow \sigma = l \frac{J}{\Delta V}$$

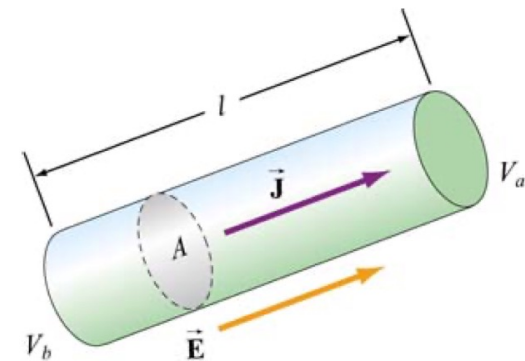
Αλλά από τον ορισμό της πυκνότητας ρεύματος έχουμε:  $J = \frac{I}{A}$

Η τελευταία σχέση γράφεται ως:  $\Delta V = \frac{l}{A\sigma} I$

Ορίζουμε  $R = \frac{l}{A\sigma}$  αντίσταση του αγωγού

$$\Delta V = RI$$

μακροσκοπική  
έκφραση για τον  
νόμο του Ohm

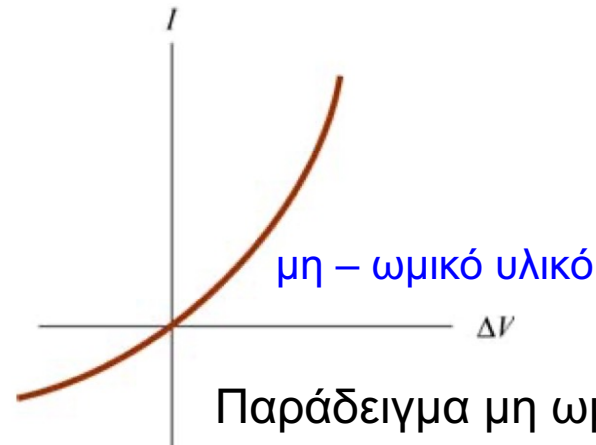
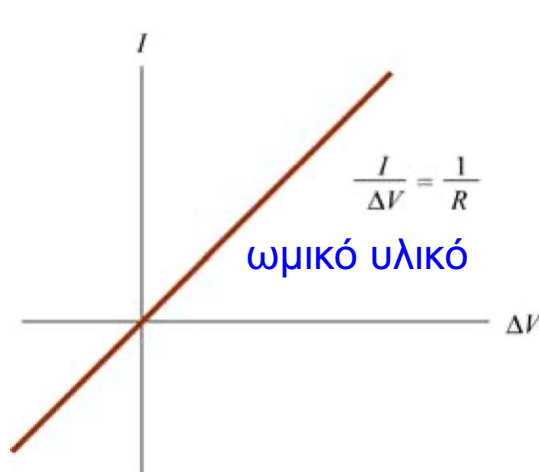


Μονάδα μέτρησης της αντίστασης στο σύστημα SI είναι το Ohm ( $\Omega$ ):  $1\Omega = \frac{1V}{1A}$

# Νόμος του Ohm

Υλικά που ακολουθούν την σχέση:  $\Delta V = RI$  ονομάζονται ωμικά υλικά και αυτά που δεν την ακολουθούν μη-ωμικά.

Τα περισσότερα μέταλλα, με καλή αγωγιμότητα και χαμηλή αντίσταση είναι ωμικά υλικά.



Παράδειγμα μη ωμικού υλικού αποτελεί η δίοδος ημιαγωγού

Ορίζουμε σαν **ειδική αντίσταση**,  $\rho$ , το αντίστροφο της ειδικής αγωγιμότητας:  $\rho = \frac{1}{\sigma}$

Μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο σύστημα SI είναι το  $\Omega \cdot m$

## Ειδική αντίσταση διαφόρων υλικών

Υλικό	Ειδική Αντίσταση ( $\Omega \cdot m$ )	Θερμοκρασιακός συντελεστής ( $T_0=20C$ )
Αργυρός	$1.59 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-3}$
Χαλκός	$1.7 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Χρυσός	$2.44 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-3}$
Αργίλιο	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Βολφράμιο	$5.6 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-3}$
Σίδηρος	$10.0 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-3}$
Λευκόχρυσος	$11.0 \times 10^{-8}$	$3.92 \times 10^{-3}$
Άνθρακας	$3.5 \times 10^{-5}$	$-0.5 \times 10^{-3}$
Γερμάνιο	0.46	$-48 \times 10^{-3}$
Πυρίτιο	$2.3 \times 10^3$	$-75 \times 10^{-3}$
Γυαλί	$10^{10}$ έως $10^{14}$	
Καουτσούκ	$10^{13}$	
Χαλαζίας	$75 \times 10^{16}$	

# Αντιστάτες

Για τον έλεγχο του ρεύματος στα διάφορα μέρη ενός κυκλώματος χρησιμοποιούνται οι αντιστάτες που είναι στοιχεία με συγκεκριμένη αντίσταση. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη.

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αντιστάτη σημειώνεται με έγχρωμες λωρίδες

- Οι πρώτες δύο λωρίδες δίνουν τα δύο πρώτα ψηφία της αντίστασης
- Η τρίτη λωρίδα αντιστοιχεί στη δεκαδική δύναμη του πολλαπλασιαστή της αντίστασης
- Η τελευταία λωρίδα αντιστοιχεί στην ανοχή της αντίστασης

## Παράδειγμα



- ✓ Το κόκκινο χρώμα (=2) και το μπλε χρώμα (=6) δίνουν τα δύο πρώτα ψηφία – Στη συγκεκριμένη περίπτωση 26
- ✓ Το πράσινο χρώμα (=5) δίνει τη δεκαδική δύναμη του πολλαπλασιαστή της αντίστασης:  $10^5$
- ✓ Η αντίσταση του αντιστάτη είναι  $26 \times 10^5 \Omega = 2.6 \text{ M}\Omega$
- ✓ Η ανοχή της αντίστασης είναι 10% (ασημί χρώμα) ή  $2.6 \times 10^5 \Omega$

## Χρωματική κωδικοποίηση αντιστάσεων

Χρώμα	Αριθμός	Πολλαπλασιαστής	Ανοχή
Μαύρο	0	1	
Καφέ	1	$10^1$	
Κόκκινο	2	$10^2$	
Πορτοκαλί	3	$10^3$	
Κίτρινο	4	$10^4$	
Πράσινο	5	$10^5$	
Μπλε	6	$10^6$	
Μωβ	7	$10^7$	
Γκρι	8	$10^8$	
Λευκό	9	$10^9$	
Χρυσό		$10^{2\ 1}$	5%
Ασημένιο		$10^{2\ 2}$	10%
Χωρίς χρώμα			20%

## Νόμος του Ohm – Εξάρτηση από θερμοκρασία

Από τον ορισμό της ειδικής αντίστασης και τις εξισώσεις της αντίστασης και ειδικής αγωγιμότητας, έχουμε:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{ne^2\tau}$$

$$\text{Αλλά: } \rho = \frac{E}{J} = \frac{\Delta V/l}{I/A} = \frac{RA}{l}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{ne^2\tau} \\ \rho = \frac{RA}{l} \end{array} \right\} \Rightarrow R = \rho \frac{l}{A}$$

Η ειδική αντίσταση ενός υλικού μεταβάλλεται με την θερμοκρασία  $T$ .

Για μέταλλα, η μεταβολή είναι γραμμική για αρκετά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

όπου  $\rho_0$  είναι η ειδική αντίσταση σε κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία (συνήθως λαμβάνεται ως  $T_0$  η θερμοκρασία 20°C).

Ο συντελεστής  $\alpha$  ονομάζεται **θερμοκρασιακός συντελεστής** της ειδικής αντίστασης με μονάδα μέτρησης στο SI 1/C

Εφόσον η αντίσταση ενός αγωγού συγκεκριμένης διατομής είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης τότε η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από την θερμοκρασία

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

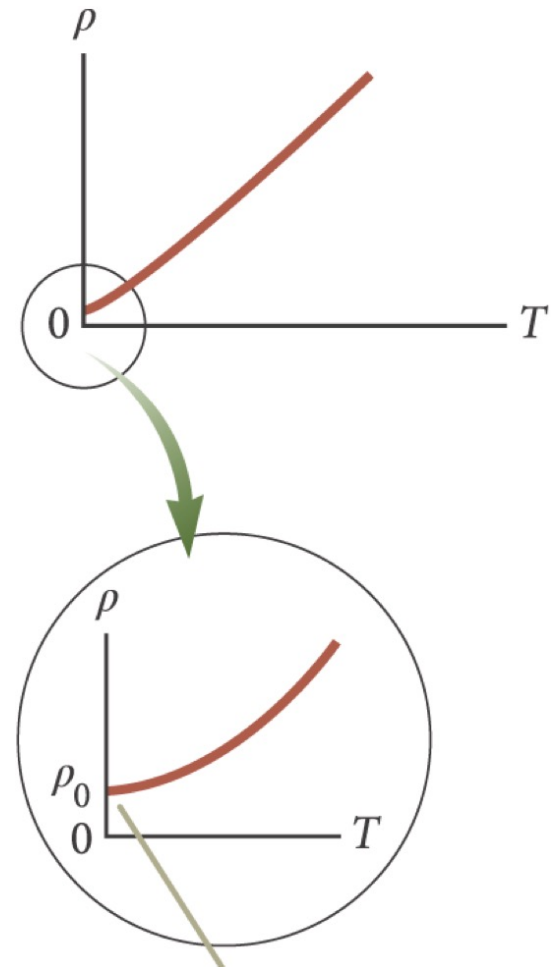
Μετρώντας την  $R$  ενός αγωγού κάποιου υλικού μπορούμε να πάρουμε πολύ ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας

## Αντίσταση και θερμοκρασία

Η ειδική αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες οφείλεται κυρίως στις συγκρούσεις μεταξύ των ηλεκτρονίων και των ατόμων του μετάλλου. Αυτό αντιστοιχεί στη γραμμική περιοχή του γραφήματος

Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, υπάρχει πάντοτε μια μη-γραμμική περιοχή στο γράφημα

Η υπολειμματική ειδική αντίσταση κοντά στο απόλυτο μηδέν είναι αποτέλεσμα των συγκρούσεων των ηλεκτρονίων με προσμίξεις και ατέλειες του μετάλλου



Καθώς η  $T$  πλησιάζει στο απόλυτο 0, η ειδική αντίσταση πλησιάζει μια πεπερασμένη τιμή

# Χαρακτηριστικά υλικά

**Ημιαγωγοί** είναι υλικά των οποίων η **αντίσταση μειώνεται** όσο αυξάνεται η θερμοκρασία (ο θερμοκρασιακός συντελεστής  $\alpha < 0$ ).

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η πυκνότητα των φορέων φορτίου

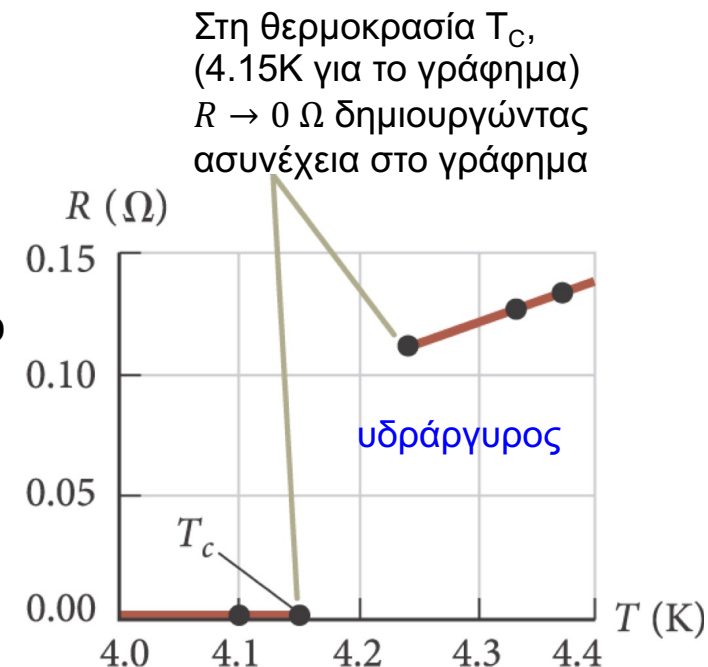
**Υπεραγωγοί** (superconductors) είναι μια κατηγορία μετάλλων και ενώσεων των οποίων η αντίσταση μειώνεται στο μηδέν όταν η θερμοκρασία του πέσει κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία που ονομάζεται **κρίσιμη θερμοκρασία ( $T_C$ )**.

Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της  $T_C$  το γράφημα μοιάζει με εκείνο ενός απλού μετάλλου, αλλά στη θερμοκρασία  $T_C$  μηδενίζεται απότομα.

Η τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας  $T_C$  εξαρτάται από

- τη χημική σύσταση
- τη πίεση
- τη μοριακή δομή

Όταν δημιουργηθεί ρεύμα σε έναν υπεραγωγό, αυτό διατηρείται χωρίς εξωτερική τάση γιατί  $R=0$





# Ηλεκτρική Ενέργεια και Ισχύς

Θεωρούμε ένα κύκλωμα όπως του σχήματος. Αποτελείται από μία μπαταρία, και έναν αντιστάτη με αντίσταση  $R$ .

Όταν φορτίο  $\Delta q$  μετακινηθεί από το  $\alpha$  μέσω της μπαταρίας, η ηλεκτρική δυναμική ενέργειά του αυξάνει κατά  $\Delta U = \Delta q \Delta V$ .

Καθώς το φορτίο κινείται διαμέσω του αντιστάτη, η δυναμική ενέργεια ελαττώνεται εξαιτίας των συγκρούσεων με τα άτομα του αντιστάτη.

Αν αγνοήσουμε την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας και των καλωδίων σύνδεσης, επιστρέφοντας στο σημείο  $\alpha$ , η ενέργεια το φορτίου  $\Delta q$  παραμένει αμετάβλητη.

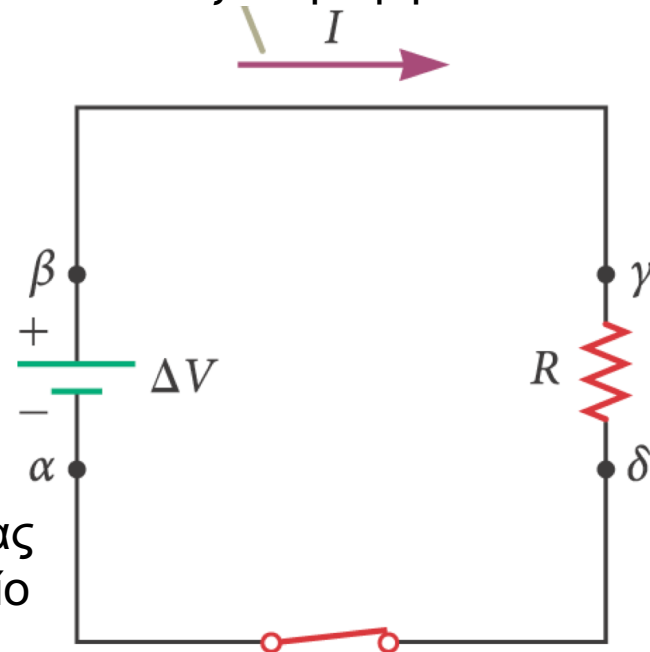
Ο ρυθμός απώλειας ενέργειας μέσω του αντιστάτη θα είναι:

$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \left( \frac{\Delta q}{\Delta t} \right) \Delta V = I \Delta V$$

➤ Αυτή είναι η ισχύς που προσφέρεται από την μπαταρία. Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm,  $\Delta V = IR$ , η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$P = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

Η ροή του θετικού φορτίου είναι δεξιόστροφη



# Κυκλώματα συνεχούς ρεύματος

# Κύκλωμα

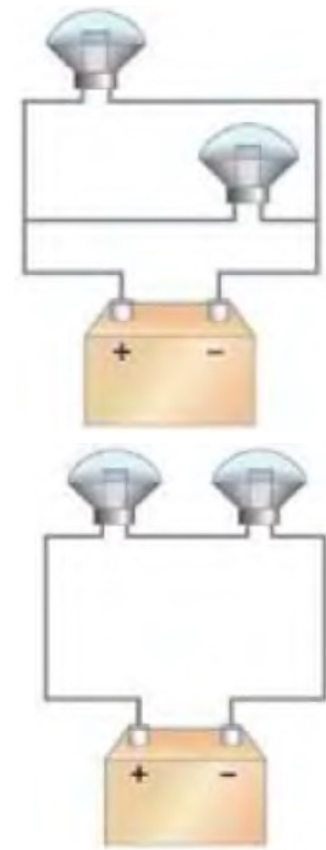
Ηλεκτρικό κύκλωμα είναι η διάταξη που συνδέει τροφοδοτικά ισχύος/δυναμικού με αντιστάτες, κινητήρες, θερμαστές ή λαμπτήρες.

Οι συνδέσεις μεταξύ του τροφοδοτικού και του καταναλωτή γίνεται μέσω συρμάτων ή διακοπών ή ακροδεκτών.

- Ηλεκτρική ενέργεια προσφέρεται από την πηγή στον καταναλωτή μέσω της αλλαγής της κατάστασης ενός διακόπτη.

Τα διάφορα συστατικά ενός κυκλώματος μπορεί να συνδέονται μεταξύ τους είτε σε σειρά ή παράλληλα μεταξύ τους όπως έχουμε δει για την περίπτωση των πυκνωτών.

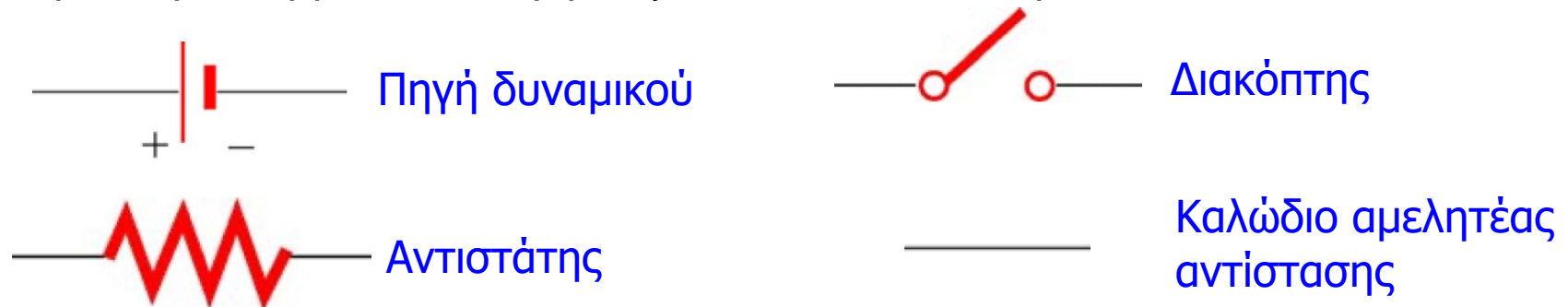
- Τα στοιχεία ενός κυκλώματος λέμε ότι είναι **παράλληλα** συνδεδεμένα όταν είναι βρίσκονται στην ίδια διαφορά δυναμικού.
- Στοιχεία του κυκλώματος είναι συνδεδεμένα σε **σειρά** όταν το ένα είναι μετά το άλλο και το ρεύμα περνά από αυτά χωρίς να διακλαδίζεται



# Στοιχεία κυκλώματος

Τα στοιχεία ενός κυκλώματος αναπαρίστανται γραφικά με διαγράμματα που δηλώνουν καλώδια ή υπάρχουν συμβολικές εικόνες που δηλώνουν το είδος του στοιχείου του κυκλώματος.

Τα συνηθέστερα σύμβολα που εμφανίζονται σε ένα κύκλωμα είναι:



Η κατάσταση ενός διακόπτη στο κύκλωμα δείχνει αν ο διακόπτης είναι κλειστός (υπάρχει σύνδεση των ακροδεκτών του) ή ανοικτός (στο κύκλωμα υπάρχει ασυνέχεια):

Αν καλώδια διαφορετικών τμημάτων του κυκλώματος ακουμπούν κατά λάθος μεταξύ τους, τότε λέμε ότι έχουμε **βραχυκύκλωμα** και όλο το ρεύμα περνά από αυτά και όχι από τα στοιχεία του κυκλώματος συνδέουν

Για αποφυγή καταστροφής στοιχείου του κυκλώματος λόγω υπερβολικά μεγάλου ρεύματος σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, χρησιμοποιούνται ασφάλειες σε σειρά με τα στοιχεία του κυκλώματος. Όταν υπάρξει αύξηση ρεύματος η ασφάλεια δρα ως διακόπτης

# Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Συσκευές (όπως η μπαταρία ή μία γεννήτρια) που προκαλούν διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων ενός κυκλώματος ονομάζονται **πηγές ηλεκτρεγερτικής δύναμης**

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας μπαταρίας,  $\mathcal{E}$ , είναι η μέγιστη δυνατή τάση που μπορεί να παρέχει η μπαταρία μεταξύ των πόλων της.

Ο όρος ΗΕΔ υποδηλώνει την ενέργεια που παρέχει η μπαταρία για την κίνηση φορτίων

Οι μπαταρίες μπορούν να θεωρηθούν ως αντλίες φορτίων που κινούν φορτία από χαμηλότερο σε υψηλότερο δυναμικό.

Μαθηματικά η ΗΕΔ ορίζεται ως:  $\mathcal{E} \equiv \frac{dW}{dq}$

που δηλώνει το έργο το οποίο καταναλώνεται για την κίνηση της μονάδας φορτίου προς υψηλότερο δυναμικό. Μονάδα μέτρησης της ΗΕΔ στο SI είναι το volt (V)

# Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Ένα απλό κύκλωμα αποτελείται από έναν αντιστάτη και μια μπαταρία.

Υποθέτοντας ότι η μπαταρία δεν έχει εσωτερική αντίσταση, η διαφορά δυναμικού  $\Delta V$  μεταξύ του θετικού και αρνητικού πόλου της μπαταρίας είναι ίση με την ΗΕΔ,  $\mathcal{E}$ , της μπαταρίας

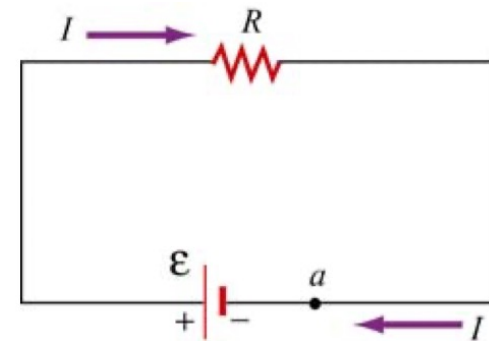
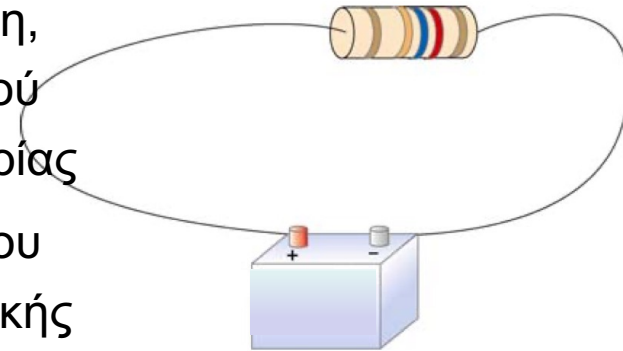
Η μπαταρία για να μεταφέρει φορτίο από το ένα σημείο του κυκλώματος σε άλλο εκφορτίζεται μέσω μετατροπής χημικής ενέργειας σε ΗΕΔ.

Μπορούμε να βρούμε το ρεύμα θεωρώντας ότι για την μετακίνηση φορτίου  $q$  σε κλειστό βρόχο δεν παράγεται έργο από τη στιγμή που η δύναμη είναι ηλεκτροστατικής φύσης.

$$W = -q \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$

Θεωρούμε το σημείο  $a$  ως το αρχικό σημείο για την μεταφορά φορτίου. Όταν μεταφέρεται από τον αρνητικό στο θετικό πόλο της μπαταρίας, το δυναμικό αυξάνει κατά  $\mathcal{E}$ .

Καθώς μεταφέρεται διαμέσω του αντιστάτη υπάρχει πτώση δυναμικού κατά ένα ποσό  $IR$  και η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στον αντιστάτη.



# Ηλεκτρεγερτική δύναμη – Ισχύς

Υποθέτοντας ότι τα καλώδια δεν έχουν αντίσταση, η μεταβολή δυναμικού θα είναι μηδέν

$$\mathcal{E} - IR = 0 \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Αλλά μια πραγματική μπαταρία παρουσιάζει πάντοτε εσωτερική αντίσταση  $r$ .

Σαν αποτέλεσμα η πολική τάση είναι:  $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$

Από τη στιγμή που δεν υπάρχει μεταβολή στη διαφορά δυναμικού κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής:

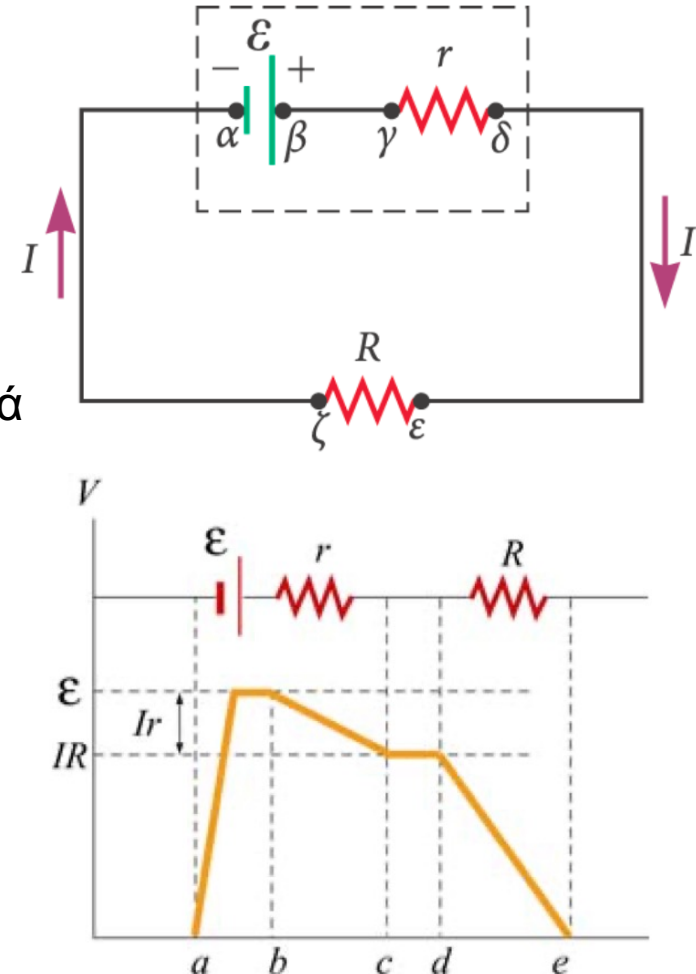
$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir - IR = 0 \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{(r + R)}$$

Η αλλαγή της διαφοράς δυναμικού καθώς κινούμαστε κατά μήκος του κυκλώματος φαίνεται στο διπλανό γράφημα

Για μια πηγή με ΗΕΔ,  $\mathcal{E}$ , η ισχύς θα είναι:

$$P = I\mathcal{E} = I(Ir + IR) = I^2r + I^2R$$

Η ισχύς της ΗΕΔ είναι ίση με το άθροισμα της απώλειας ισχύος στον αντιστάτη και εσωτερική αντίσταση της πηγής όπως αναμένεται από διατήρηση της ενέργειας.



# Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Η ΗΕΔ αντιστοιχεί στην τάση στα άκρα της μπαταρίας όταν το κύκλωμα είναι ανοικτό. Η ΗΕΔ είναι η τάση που αναγράφεται σε κάθε μπαταρία

Η πραγματική διαφορά δυναμικού που επικρατεί μεταξύ των πόλων της μπαταρίας εξαρτάται από το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα.

Με την πάροδο του χρόνου, η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αυξάνει με αποτέλεσμα η ισχύς που παρέχει σε εξωτερικό αντιστάτη να ελαττώνεται.

