

Κεφάλαιο 24: Ηλεκτρικό ρεύμα

Τι μαθαίνετε

- Να περιγράφετε το ηλεκτρικό ρεύμα σε όρους ροής ηλεκτρικού φορτίου
- Να περιγράφετε τη σχέση μεταξύ ηλεκτρικού ρεύματος, **τάσης** και αντίστασης χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm
- Για την ηλεκτρική αγωγιμότητα σε διάφορα υλικά, ιδίως στα μέταλλα
- Πώς να υπολογίζετε την ηλεκτρική ισχύ
- Για την ασφάλεια των ηλεκτρολογικών εργασιών



Ηλεκτρικό ρεύμα

- **Ηλεκτρικό ρεύμα** είναι ο ρυθμός του συνολικού φορτίου
 - Ποσοτικά, το ρεύμα είναι ο ρυθμός με τον οποίο το φορτίο διασχίζει μια συγκεκριμένη επιφάνεια

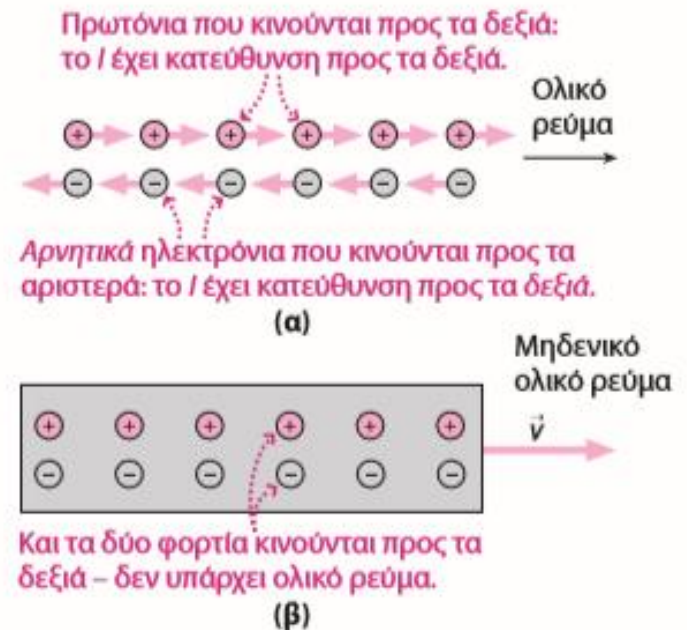
- Για σταθερό ρεύμα,

$$I = \frac{DQ}{Dt}$$

- Όταν το ρεύμα μεταβάλλεται με τον χρόνο, η στιγμιαία τιμή του δίνεται από

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

- Το ρεύμα έχει τη φορά κατά την οποία ρέει το θετικό φορτίο
- Η μονάδα για το ρεύμα στο σύστημα SI είναι το ampere (A), ίσο με 1 C/s

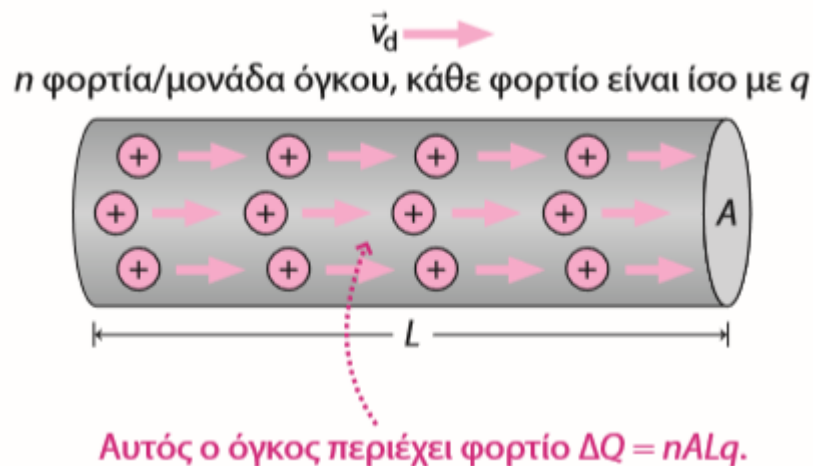


Ταχύτητα ολίσθησης

- Όσον αφορά τις μικροσκοπικές του ιδιότητες, το ρεύμα σε έναν αγωγό με διατομή A είναι

$$I = nAqv_d$$

- n είναι ο αριθμός φορτίων ανά μονάδα όγκου, το καθένα με φορτίο q
- v_d είναι η **ταχύτητα ολίσθησης** ή η μέση ταχύτητα των φορέων του φορτίου στην κατεύθυνση του ρεύματος
- Οι φορείς του φορτίου μπορεί να είναι θετικοί ή αρνητικοί, οπότε η ταχύτητα ολίσθησης είναι παράλληλη ή αντιπαράλληλη στο ρεύμα, αντίστοιχα



Πυκνότητα ρεύματος

- Πυκνότητα ρεύματος, \vec{J} , είναι το ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας
 - Σε αντίθεση με το ρεύμα, η πυκνότητα ρεύματος είναι μια διανυσματική ποσότητα
 - Η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να μεταβάλλεται με τη θέση, τόσο ως προς την κατεύθυνση όσο και ως προς το μέτρο της
 - Γενικά, το ρεύμα διαμέσου μιας επιφάνειας είναι η ροή της πυκνότητας ρεύματος σε αυτή την επιφάνεια:

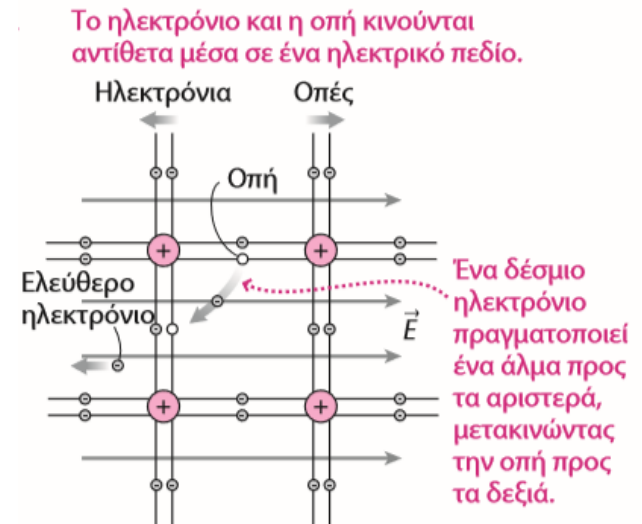
$$\vec{J} = nq\vec{v}_d$$

- Όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι ομοιόμορφη και κάθετη σε μια επίπεδη επιφάνεια, το ρεύμα γίνεται το γινόμενο της πυκνότητας ρεύματος με την επιφάνεια:

$$I = JA$$

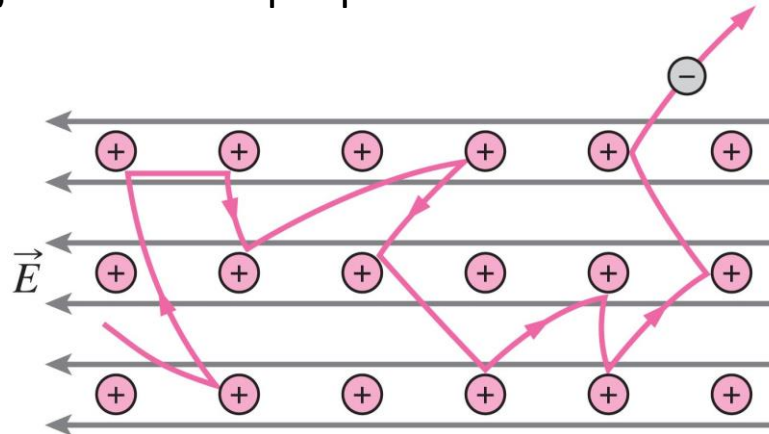
Μηχανισμοί αγωγιμότητας

- Η αγωγιμότητα διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του υλικού:
 - Στους **μεταλλικούς αγωγούς**, το ρεύμα μεταφέρεται από ελεύθερα ηλεκτρόνια
 - Στα **ιοντικά διαλύματα**, το ρεύμα μεταφέρεται από θετικά και αρνητικά ιόντα
 - Το **πλάσμα** είναι ένα ιονισμένο αέριο, στο οποίο το ρεύμα μεταφέρεται από ηλεκτρόνια και ιόντα
 - Στους **ημιαγωγούς** το ρεύμα μεταφέρεται από ηλεκτρόνια και από «οπές»
 - απουσία ηλεκτρονίων σε μια κρυσταλλική δομή
 - Οι ημιαγωγοί βρίσκονται στον πυρήνα της σύγχρονης ηλεκτρονικής
 - Οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες μπορούν να μεταβληθούν με την ελεγχόμενη προσθήκη προσμείξεων
 - Οι **υπεραγωγοί** παρέχουν μηδενική αντίσταση στη ροή ρεύματος, με αποτέλεσμα τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς απώλειες
 - Όλα τα γνωστά υπεραγώγιμα υλικά απαιτούν θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από τις μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος



Αγωγιμότητα στα μέταλλα

- Ένα μέταλλο περιλαμβάνει μια «θάλασσα» ηλεκτρονίων:
 - Αυτά περιορίζονται στο μέταλλο, αλλά δεν είναι συνδεδεμένα με συγκεκριμένα άτομα
 - Τα ηλεκτρόνια κινούνται σε τυχαίες κατευθύνσεις με μεγάλες θερμικές ταχύτητες
 - Κατά μέσο όρο δεν υπάρχει ρεύμα που να συνδέεται με τη θερμική κίνηση
 - Η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου προσδίδει μια μικρή ταχύτητα ολίσθησης στην κίνηση των ηλεκτρονίων
 - Όλα τα ηλεκτρόνια μοιράζονται την κοινή ταχύτητα ολίσθησης, οπότε η κίνησή τους συνιστά ένα ρεύμα



Νόμος του Ohm: Μια μικροσκοπική άποψη

- Τα ηλεκτρόνια συχνά συγκρούονται με τα ιόντα την κρυσταλλική δομή του μετάλλου, αποδίδοντας ενέργεια
 - Το αποτέλεσμα είναι μια μέση ταχύτητα ολίσθησης η οποία είναι ανάλογη στο ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται
 - Επομένως η πυκνότητα ρεύματος είναι ανάλογη στο πεδίο:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

- Αυτή η έκφραση είναι η μικροσκοπική εκδοχή του **νόμου του Ohm**
- Εδώ σ είναι η **αγωγιμότητα** του υλικού
- Το αντίστροφο της αγωγιμότητας είναι η **ειδική αντίσταση**: $\rho = 1/\sigma$
- Η μονάδες της ρ στο σύστημα SI είναι $\Omega \cdot m$

Πίνακας 24.1 Ειδικές αντιστάσεις

Υλικό	Ειδική αντίσταση ($\Omega \cdot m$)
Μεταλλικοί αγωγοί (20°C)	
Αλουμίνιο	$2,65 \times 10^{-8}$
Χαλκός	$1,68 \times 10^{-8}$
Χρυσός	$2,24 \times 10^{-8}$
Σιδηρός	$9,71 \times 10^{-8}$
Υδράργυρος	$9,84 \times 10^{-7}$
Ασήμι	$1,59 \times 10^{-8}$
Ιοντικά διαλύματα (στο νερό, 18°C)	
1-molar $CuSO_4$	$3,9 \times 10^{-4}$
1-molar HCl	$1,7 \times 10^{-2}$
1-molar NaCl	$1,4 \times 10^{-4}$
H_2O	$2,6 \times 10^8$
Αίμα ανθρώπου	0,70
Νερό θαλάσσης (σάνθηλα)	0,22
Ημιαγωγοί	
Γερμάνιο	0,5
Πυρίτιο	3×10^3
Μονωτές	
Κεραμικά	$10^{11} - 10^{16}$
Γυαλί	$10^{10} - 10^{14}$
Πολυστυρένιο	$10^{15} - 10^{17}$
Καουτσούκ	$10^{13} - 10^{16}$
Ξύλο (ξηρό)	$10^8 - 10^{14}$

Νόμος του Ohm

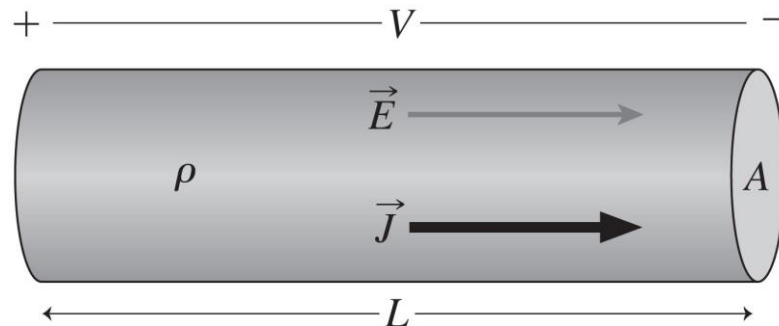
- Η μικροσκοπική εκδοχή του νόμου του Ohm συσχετίζει την πυκνότητα ρεύματος σε ένα σημείο σε κάποιον αγωγό με το ηλεκτρικό πεδίο στο συγκεκριμένο σημείο:

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

- Η εφαρμογή του νόμου του Ohm σε ένα κομμάτι αγώγιμου υλικού δίνει τη μακροσκοπική εκδοχή:

$$I = JA = \frac{EA}{r} = \frac{VA}{Lr} = \frac{V}{rL/A} = \frac{V}{R}$$

– όπου έχουμε θέσει $R = rL / A$.



Νόμος του Ohm (συνέχεια)

- Η μακροσκοπική εκδοχή του νόμου του Ohm, $V = IR$, συνδέει το ρεύμα I σε ένα τμήμα υλικού με την τάση V και την **αντίστασή** του R
- Για ένα τμήμα υλικού σταθερής διατομής, η αντίσταση προκύπτει από την ειδική αντίσταση, το μήκος και το εμβαδόν του συγκεκριμένου τμήματος: $R = \rho L/A$
- Τόσο η μικροσκοπική όσο και η μακροσκοπική εκδοχή του νόμου του Ohm αποτελούν εμπειρική σχέση που ισχύει κατά προσέγγιση σε ορισμένα υλικά
 - Δεν αποτελούν θεμελιώδεις νόμους της φύσης, όπως ο νόμος του Gauss

Νόμος του Ohm: Σύγκριση μικροσκοπικής και μακροσκοπικής εκδοχής

Πίνακας 24.2 Μικροσκοπικά και μακροσκοπικά μεγέθη και ο νόμος του Ohm

Μικροσκοπικό	Μακροσκοπικό	Σχέση
Ηλεκτρικό πεδίο, \vec{E}	Τάση, V	Το \vec{E} ορίζεται σε κάθε σημείο ενός υλικού. Το V είναι το ολοκλήρωμα του \vec{E} κατά μήκος μιας διαδρομής. Σε ένα ομοιογενές πεδίο, $V = EL$.
Πυκνότητα ρεύματος, \vec{J}	Ρεύμα, I	Το \vec{J} ορίζεται σε κάθε σημείο ενός υλικού. Το I είναι η ροή –επιφανειακό ολοκλήρωμα– του \vec{J} σε μια επιφάνεια. Για ομοιόμορφη πυκνότητα ρεύματος, $I = JA$.
Ειδική αντίσταση, ρ	Αντίσταση, R	Το ρ είναι ιδιότητα ενός συγκεκριμένου υλικού. Το R είναι ιδιότητα ενός συγκεκριμένου τμήματος του υλικού. Σε ένα τμήμα με σταθερή διατομή, $R = \rho L/A$.
Νόμος του Ohm, $\vec{J} = \frac{\vec{E}}{\rho}$	Νόμος του Ohm, $I = \frac{V}{R}$	Η μικροσκοπική εκδοχή συνδέει την πυκνότητα ρεύματος με το ηλεκτρικό πεδίο σε ένα σημείο κάποιου υλικού. Η μακροσκοπική εκδοχή συνδέει το ρεύμα και την τάση στα άκρα ενός συγκεκριμένου τμήματος του υλικού.

Το κατανοήσατε;

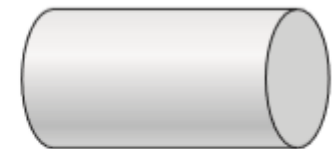
- Το σχήμα δείχνει τρία κομμάτια καλωδίου. Τα (α) και (β) είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό, ενώ το (γ) είναι κατασκευασμένο από ένα υλικό που έχει διπλάσια ειδική αντίσταση. Τα (α) και (γ) έχουν διάμετρο διπλάσια από του (β), ενώ το μήκος του (β) είναι διπλάσιο σε σχέση με τα άλλα. (1) Ποιο έχει τη μεγαλύτερη αντίσταση; (2) Αν εφαρμοστεί η ίδια τάση στα άκρα του καθενός, από ποιο κομμάτι θα περάσει η μεγαλύτερη ένταση ρεύματος;



(α)



(β)



(γ)

Ηλεκτρική ισχύς

- Τάση V είναι η ενέργεια ανά μονάδα φορτίου
- Το ρεύμα I είναι το φορτίο ανά μονάδα χρόνου
- Επομένως, το γινόμενο τους IV είναι ενέργεια ανά μονάδα χρόνου ή **ισχύς**:

$$P = IV$$

- Για τα υλικά που υπακούουν στον νόμο του Ohm, $V = IR$, αυτό μπορεί να εκφραστεί με δύο ισοδύναμους τρόπους

$$P = I^2 R \qquad P = \frac{V^2}{R}$$

- Η ισχύς σε έναν αντιστάτη καταναλώνεται ως θερμότητα
- Σε άλλες περιπτώσεις, το $P = IV$ μπορεί να αντιπροσωπεύει ηλεκτρική ενέργεια που μετατρέπεται σε μηχανική ή σε άλλες μορφές ενέργειας

Ασφάλεια για ηλεκτρολογικές εργασίες

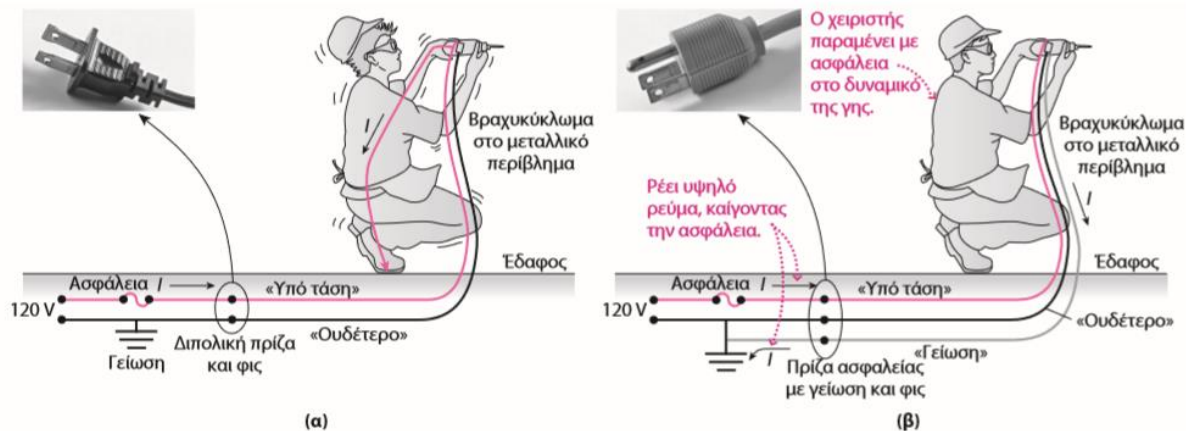
- Η ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα είναι επικίνδυνη
 - Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις επιπτώσεις του ηλεκτρικού ρεύματος
 - Με την εφαρμογή ηλεκτρικών σημάτων εσωτερικά στο σώμα, πολύ χαμηλότερα ρεύματα μπορούν να είναι θανατηφόρα
 - Χρειάζεται τάση για να οδηγηθεί το ρεύμα στο σώμα
 - Έτσι, ο συνδυασμός υψηλής τάσης και δυνατότητας παροχής τουλάχιστον δεκάδων milliampere (mA) είναι ο πιο επικίνδυνος

Πίνακας 24.3 Επιδράσεις του ρεύματος που εφαρμόζεται εξωτερικά στους ανθρώπους

Περιοχή ρεύματος	Επίδραση
0,5-2mA	Κατώφλι αίσθησης
10-15 mA	Ανεπιθύμητες μυϊκές συσπάσεις – η παλάμη σφίγγει και μένει εκεί
15-100 mA	Ισχυρό σοκ – χάνεται ο μυϊκός έλεγχος – δυσκολία στην αναπνοή
100-200 mA	Μαρμαρυγή της καρδιάς – θάνατος μέσα σε λίγα λεπτά
>200 mA	Καρδιακή ανακοπή – διακοπή αναπνοής – σοβαρά εγκαύματα

Γείωση για ασφάλεια απέναντι στο ηλεκτρικό ρεύμα

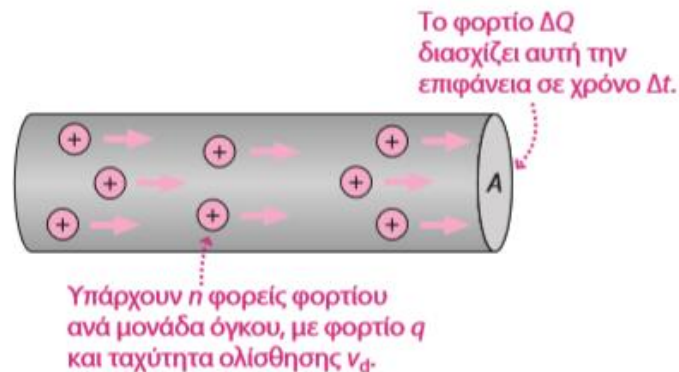
- Στα συμβατικά συστήματα ισχύος, ένα από τα δύο καλώδια συνδέεται άμεσα με το έδαφος
 - Αυτή η γείωση εμποδίζει την καλωδίωση να φτάσει σε τυχαία υψηλά δυναμικά
 - Αλλά σε περίπτωση που ένα άτομο έρθει σε επαφή με την πλευρά του κυκλώματος που βρίσκεται «υπό τάση», υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας
 - Οι γειωμένες συσκευές και εργαλεία μειώνουν αυτόν τον κίνδυνο
 - Το ίδιο κάνουν και οι διακόπτες κυκλώματος σφάλματος γείωσης



Σύνοψη

- **Ηλεκτρικό ρεύμα** είναι η ροή του ηλεκτρικού φορτίου
 - Ποσοτικά, η ροή ρεύματος σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια είναι $I = dQ/dt$
 - Η μονάδα του ηλεκτρικού ρεύματος στο σύστημα SI είναι το ampere (A), ίσο με 1 C/s
 - Το ηλεκτρικό ρεύμα εξαρτάται από την πυκνότητα n των φορέων φορτίου, το φορτίο τους q και την ταχύτητα ολίσθησης: $I = nqAv_d$.
 - Πυκνότητα ρεύματος είναι το ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας:

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



Σύνοψη (συνέχεια)

- Οι ωμικοί αγωγοί, στους οποίους περιλαμβάνονται τα περισσότερα μέταλλα, υπακούουν στον **νόμο του Ohm**:
 - Μικροσκοπικά, $\vec{J} = \sigma \vec{E}$
 - Μακροσκοπικά, $V = IR$
- Ηλεκτρική ισχύς είναι το γινόμενο του ρεύματος και της τάσης: $P = IV$
- Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, αυτό μπορεί επίσης να γραφεί ως

$$P = I^2 R = V^2 / R$$

