

SEARS & ZEMANSKY

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ με Σύγχρονη Φυσική

3Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ
ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ

2. ΡΕΥΜΑΤΑ –
ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

ΕΠΙΛΟΓΗ,
ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:
Ηλίας Κατσούφης

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΚΟ
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ:
Τζένη Πάλμου

Τόμος Β

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ
ΟΠΤΙΚΗ - ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ

YOUNG ΚΑΙ FREEDMAN

Θ.Η. Αλεξόπουλος, ΕΜΠ
Ι.Α. Αρβανιτίδης, ΑΠΘ
Α.Α. Αργυρίου, Π. Πατρών
Ε.Α. Δρης, ΕΜΠ
Η.Σ. Ζουμπούλης, ΕΜΠ
Η.Κ. Κατσούφης, ΕΜΠ
Γ.Α. Κουρούκλης, ΑΠΘ
Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, ΕΜΠ
Μ.Ν. Πιζάνιας, Π. Πατρών
Ι.Π. Ρίζος, Π. Ιωαννίνων
Θ.Ν. Τομαράς, Π. Κρήτης
Κ. Χριστοδουλίδης, ΕΜΠ

Απόδοση βιβλίου στην Ελληνική γλώσσα και Επιμέλεια (αλφαβητικά):

Θ.Η. Αλεξόπουλος, Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Ι.Α. Αρβανιτίδης, Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Α.Α. Αργυρίου, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ε.Α. Δρης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Σ. Ζουμπούλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Κ. Κατσούφης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Γ.Α. Κουρούκλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, τ. Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Μ.Ν. Πιζάνιας, Ομότιμος Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ι.Π. Ρίζος, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Θ.Ν. Τομαράς, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης

Κ. Χριστοδουλίδης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 25

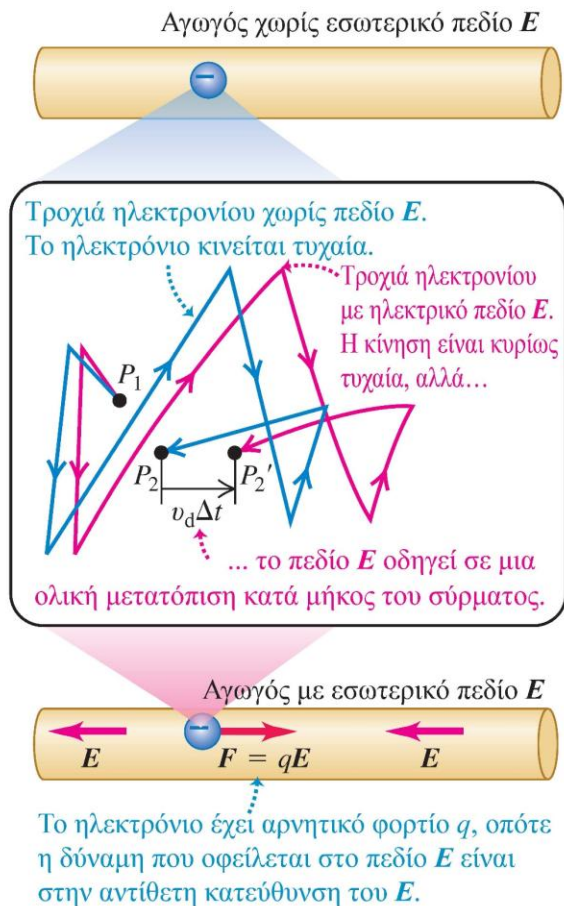
ΡΕΥΜΑ, ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

ΡΕΥΜΑ

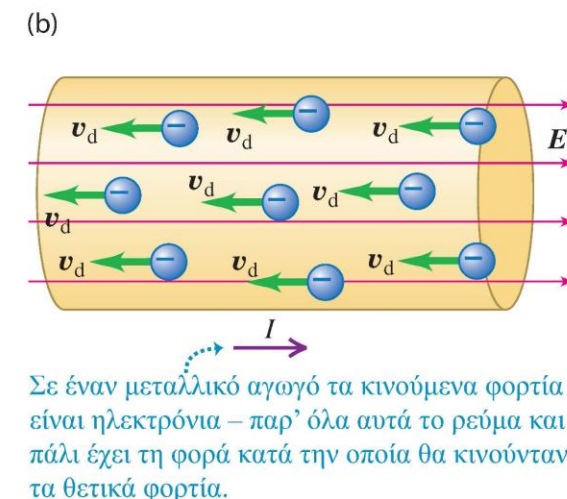
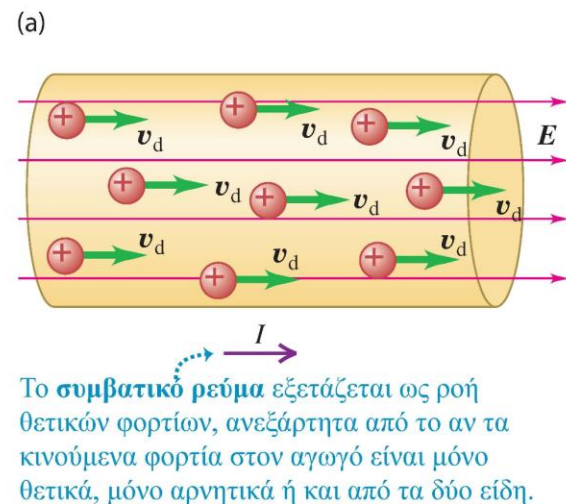
Η κατεύθυνση ροής του ρεύματος

25.1 Αν δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο μέσα στον αγωγό, το ηλεκτρόνιο κινείται τυχαία από το σημείο P_1 στο σημείο P_2 σε χρόνο Δt . Αν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο E , η ηλεκτρική δύναμη $F = qE$ επιβάλλει μια μικρή ολίσθηση (στο σχήμα φαίνεται υπερβολικά μεγάλη) που φέρνει το ηλεκτρόνιο στο σημείο P'_2 σε απόσταση $v_d \Delta t$ από το P_2 κατά την κατεύθυνση της δύναμης.

Η κίνηση αυτή περιγράφεται με την **ταχύτητα ολίσθησης** v_d των σωματιδίων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι να υπάρχει μακροσκοπικό ρεύμα στον αγωγό.

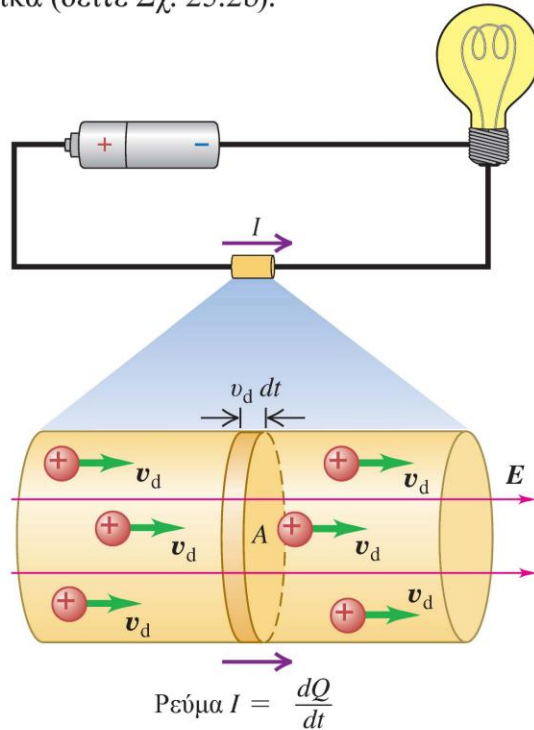


25.2 Το ίδιο ρεύμα παράγεται (a) από θετικά φορτία κινούμενα στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου E , ή (b) από τον ίδιο αριθμό αρνητικών φορτίων, κινούμενων με την ίδια ταχύτητα σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του E .



Ρεύμα, ταχύτητα ολίσθησης και πυκνότητα ρεύματος

25.3 Το ρεύμα I είναι ο ρυθμός μεταφοράς του φορτίου διαμέσου της επιφάνειας διατομής A . Η μέση τιμή της τυχαίας συνιστώσας κίνησης κάθε κινούμενου φορτισμένου σωματιδίου είναι μηδέν. Το ρεύμα έχει την ίδια φορά με το E ανεξάρτητα από το αν τα κινούμενα φορτία είναι θετικά (όπως φαίνεται εδώ) ή αρνητικά (δείτε Σχ. 25.2b).



$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{ορισμός του ρεύματος}) \quad (25.1)$$

Ρυθμός με τον οποίο ρέει φορτίο μέσα από την επιφάνεια
 Ρεύμα μέσα από κάποια επιφάνεια $I = \frac{dQ}{dt} = n|q|v_d A$
 Ταχύτητα ολίσθησης
 Εμβαδόν διατομής
 Φορτίο σωματιδίου
 Συγκέντρωση κινούμενων φορτισμένων σωματιδίων

(25.2)

$$J = \frac{I}{A} = n|q|v_d \quad (\text{πυκνότητα ρεύματος}) \quad (25.3)$$

Διανυσματική πυκνότητα ρεύματος $J = nqv_d$
 Ταχύτητα ολίσθησης
 Φορτίο σωματιδίου
 Συγκέντρωση κινούμενων φορτισμένων σωματιδίων

(25.4)

ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Ορίζουμε την **ειδική αντίσταση** ρ ενός υλικού ως

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (25.5)$$

Ειδική αντίσταση ενός υλικού

Μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου στο υλικό

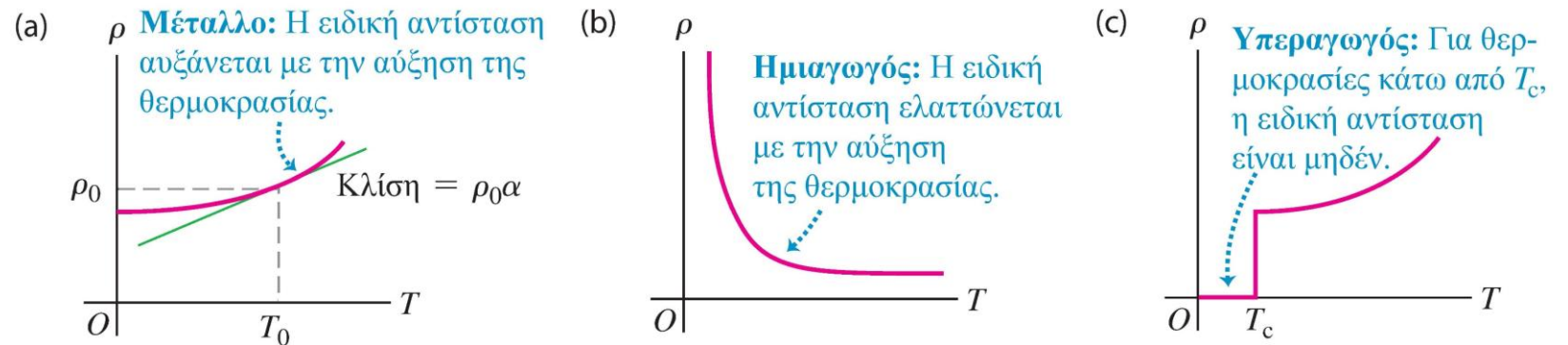
Μέτρο της πυκνότητας ρεύματος που δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο

ΠΙΝΑΚΑΣ 25.1 Ειδικές Αντιστάσεις σε Θερμοκρασία Δωματίου (20 °C)

Υλικό	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	Υλικό	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
Αγωγοί		Ημιαγωγοί	
Μέταλλα		Καθαρός άνθρακας (γραφίτης)	$3,5 \times 10^{-5}$
Άργυρος	$1,47 \times 10^{-8}$	Καθαρό γερμάνιο	0,60
Χαλκός	$1,72 \times 10^{-8}$	Καθαρό πυρίτιο	2300
Χρυσός	$2,44 \times 10^{-8}$	Μονωτές	
Αλουμίνιο	$2,75 \times 10^{-8}$	Κεχριμπάρι (ήλεκτρον)	5×10^{14}
Βολφράμιο	$5,25 \times 10^{-8}$	Γυαλί	$10^{10}-10^{14}$
Χάλυβας	20×10^{-8}	Λουσίτης	$>10^{13}$
Μόλυβδος	22×10^{-8}	Μίκα	$10^{11}-10^{15}$
Υδράργυρος	95×10^{-8}	Χαλαζίας (λιωμένος)	75×10^{16}
Κράματα		Θείον (θειάφι)	10^{15}
Μαγγανίνη (Cu 84 %, Mn 12 %, Ni 4 %)	44×10^{-8}	Τεφλόν	$>10^{13}$
Κονσταντάνη (Cu 60 %, Ni 40 %)	49×10^{-8}	Ξύλο	10^8-10^{11}
Χρωμονικελίνη	100×10^{-8}		

Ειδική αντίσταση και θερμοκρασία

25.6 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης ρ συναρτήσει της απόλυτης (θερμοδυναμικής) θερμοκρασίας T για (a) κανονικό μέταλλο, (b) ημιαγωγό, και (c) υπεραγωγό. Στο (a) η γραμμική προσέγγιση του ρ συναρτήσει της θερμοκρασίας T φαίνεται στο σχήμα με πράσινη γραμμή· η προσέγγιση βρίσκεται σε απόλυτη σύμπτωση για $T = T_0$, όπου $\rho = \rho_0$.



Σε μικρή περιοχή θερμοκρασιών (μέχρι 100°C περίπου), η ειδική αντίσταση ενός μετάλλου μπορεί προσεγγιστικά να παρασταθεί από τη σχέση

Εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από τη θερμοκρασία:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (25.6)$$

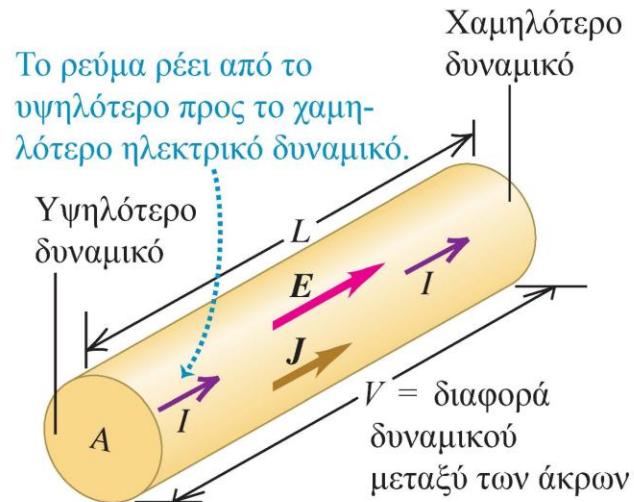
Ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία T (indicated by a dotted arrow from the text to T in the equation)
 Ειδική αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς T_0 (indicated by a dotted arrow from the text to T_0 in the equation)
 Θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης (indicated by a dotted arrow from the text to α in the equation)

Αντίσταση

Για έναν αγωγό, ο οποίος έχει ειδική αντίσταση ρ , η πυκνότητα ρεύματος $\mathbf{J}$ σε κάποιο σημείο στο οποίο το ηλεκτρικό πεδίο είναι $\mathbf{E}$ δίνεται από την Εξ. (25.5), η οποία μπορεί να γραφεί ως

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J} \quad (25.7)$$

25.7 Αγωγός με ομοιόμορφη διατομή.
Η πυκνότητα ρεύματος είναι ομοιόμορφη πάνω σε κάθε διατομή και το ηλεκτρικό πεδίο είναι το ίδιο (σταθερό) κατά μήκος του αγωγού.



Το πηλίκο V προς I για έναν συγκεκριμένο αγωγό καλείται **αντίσταση** του R :

$$R = \frac{V}{I} \quad (25.9)$$

Αντίσταση του αγωγού $\cdots \cdots \cdots R = \frac{\rho L}{A}$

Ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού $\cdots \cdots \cdots \rho$
Μήκος του αγωγού $\cdots \cdots \cdots L$
Εμβαδόν διατομής του αγωγού $\cdots \cdots \cdots A$

(25.10)

Συνήθως η παρακάτω εξίσωση λέγεται νόμος του Ohm:

Σχέση μεταξύ τάσης, ρεύματος και αντίστασης: $V = IR$

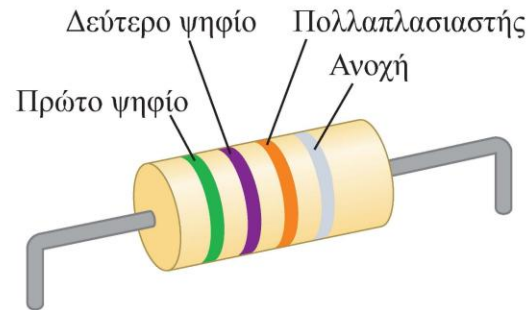
Τάση στα άκρα του αγωγού $\cdots \cdots \cdots V$
Αντίσταση του αγωγού $\cdots \cdots \cdots R$
Ρεύμα του αγωγού $\cdots \cdots \cdots I$

(25.11)

Εντούτοις, είναι σημαντικό να κατανοηθεί πως η πραγματική σημασία του νόμου του Ohm είναι ότι (για μερικά υλικά) το V είναι ευθέως ανάλογο του I και το J του E . Η Εξ. (25.9) ή η Εξ. (25.11) ορίζει την αντίσταση R για κάθε αγωγό, αλλά μόνο αν το R είναι σταθερό είναι σωστό να πούμε ότι αυτή η σχέση είναι ο νόμος του Ohm.

Συμβολισμοί – Μονάδες αντίστασης

25.9 Αυτός ο αντιστάτης έχει αντίσταση 5,7 kΩ με μια ακρίβεια (ανοχή) $\pm 10\%$.



Η μονάδα της αντίστασης στο SI είναι το **ohm (ωμ) (Ω)**, ίσο με ένα volt ανά ampere ($1 \Omega = 1 \text{ V/A}$). Σε κοινή χρήση είναι επίσης το *kilohm* (κιλοώμ) ($1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$) και το *megohm* (μεγγώμ) ($1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$).

Επειδή η ειδική αντίσταση ενός υλικού μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, η αντίσταση ενός συγκεκριμένου αγωγού μεταβάλλεται επίσης με τη θερμοκρασία. Για περιοχές θερμοκρασιών που δεν είναι πολύ μεγάλες, αυτή η μεταβολή είναι κατά προσέγγιση γραμμική, ανάλογη με την Εξ. (25.6):

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (25.12)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 25.3 Χρωματικός Κώδικας για Αντιστάτες

Χρώμα	Τιμή Ψηφίου	Τιμή Πολλαπλασιαστή
Μαύρο	0	1
Καφέ	1	10
Κόκκινο	2	10^2
Πορτοκαλί	3	10^3
Κίτρινο	4	10^4
Πράσινο	5	10^5
Μπλε	6	10^6
Βιολετί (μοβ, ιώδες)	7	10^7
Γκρι	8	10^8
Λευκό	9	10^9

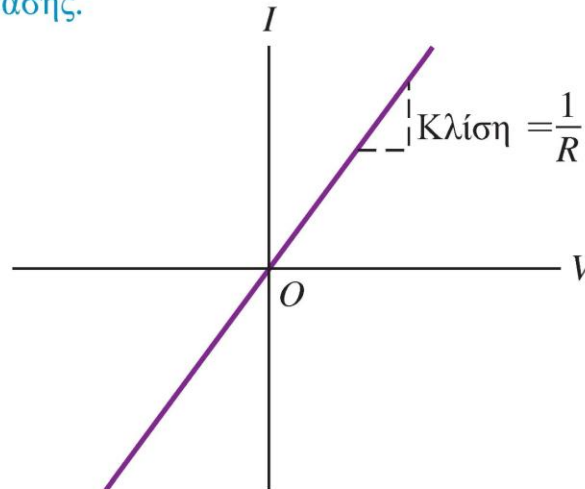
ΑΝΤΙΣΤΑΤΕΣ

Ένα στοιχείο κυκλώματος, το οποίο έχει καθορισμένη τιμή αντίστασης, καλείται **αντιστάτης** (ή **ωμική αντίσταση** ή και **αντίσταση**).

25.10 Σχέση ρεύματος-τάσης για δύο διατάξεις. Μόνο στην περίπτωση αντιστάτη που υπακούει στον νόμο του Ohm όπως στην περίπτωση (a) το ρεύμα I είναι ανάλογο προς την τάση V .

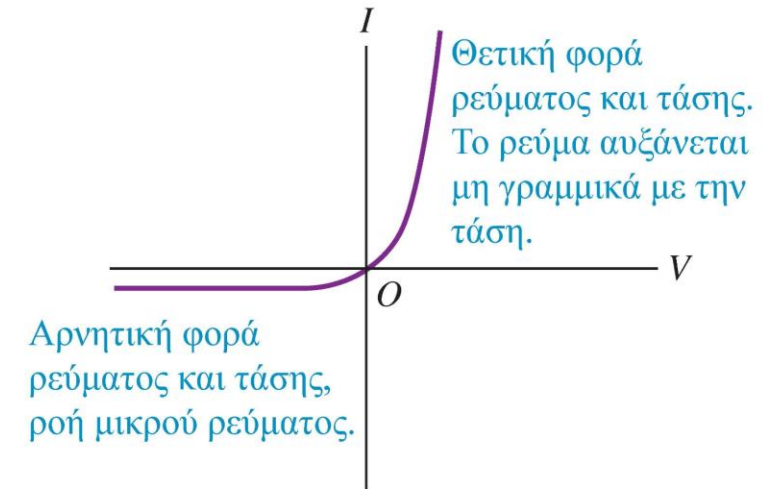
(a)

Ωμικός αντιστάτης (π.χ. τυπικό μεταλλικό σύρμα): Σε δεδομένη θερμοκρασία, το ρεύμα είναι ανάλογο της τάσης.



(b)

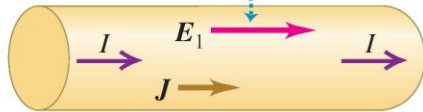
Δίοδος ημιαγωγού: ένας μη ωμικός αντιστάτης



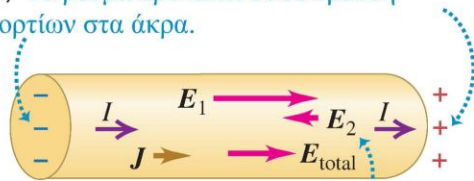
ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

25.11 Αν δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό αγωγού, ο οποίος δεν είναι τμήμα πλήρους κυκλώματος, το ρεύμα ρέει στον αγωγό για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

(α) Ηλεκτρικό πεδίο E_1 που δημιουργείται μέσα σε απομονωμένο αγωγό προκαλεί ρεύμα.

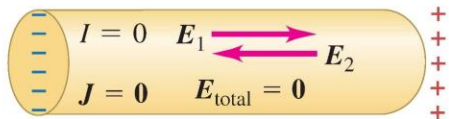


(β) Το ρεύμα προκαλεί συσσώρευση φορτίων στα άκρα.



Το συσσωρευμένο φορτίο δημιουργεί ένα αντιτιθέμενο πεδίο E_2 , και έτσι μειώνεται το ρεύμα.

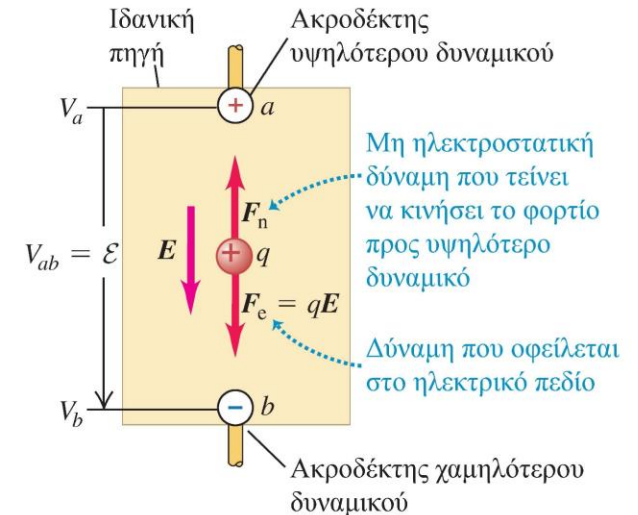
(γ) Μετά από πολύ μικρό χρόνο το E_2 έχει την ίδια τιμή με το E_1 : τότε το ολικό πεδίο $E_{\text{total}} = 0$ και το ρεύμα σταματά τελείως.



25.12 Όπως ακριβώς στο σιντριβάνι απαιτείται μια αντλία, ένα ηλεκτρικό κύκλωμα απαιτεί μια πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης για να διατηρήσει σταθερό το ρεύμα.



25.13 Σχηματικό διάγραμμα μιας πηγής ΗΕΔ σε ένα «ανοιχτό κύκλωμα». Φαίνονται η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου $F_e = qE$ και η μη ηλεκτροστατική δύναμη F_n που ασκούνται σε ένα θετικό φορτίο q .

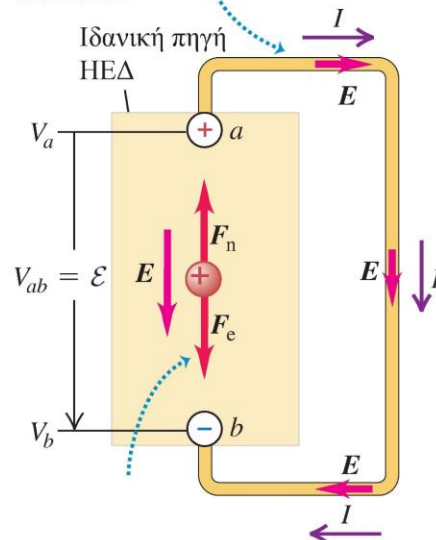


Όταν η πηγή ΗΕΔ δεν είναι μέρος κλειστού κυκλώματος αλλά ανοιχτού, τότε $F_n = F_e$ και δεν υπάρχει συνολική κίνηση φορτίου μεταξύ των ακροδεκτών.

ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

25.14 Σχηματικό διάγραμμα μιας ιδανικής πηγής ΗΕΔ σε πλήρες (κλειστό) κύκλωμα. Η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου $F_e = qE$ και η μη ηλεκτροστατική δύναμη F_n δείχνονται για θετικό φορτίο q . Το ρεύμα έχει φορά από το a προς το b στο εξωτερικό κύκλωμα και από το b προς το a στο εσωτερικό της πηγής.

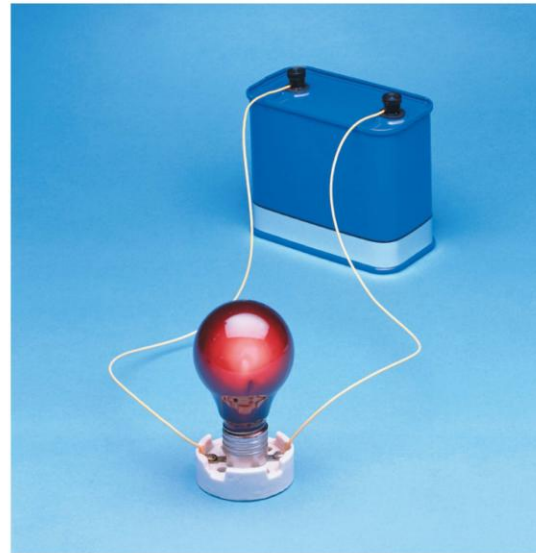
Το δυναμικό μεταξύ των ακροδεκτών δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο στο κύκλωμα, κάνοντας τα φορτία να κινούνται.



Όταν μια πραγματική (αντί για μια ιδανική) πηγή ΗΕΔ συνδεθεί με ένα κύκλωμα, το V_{ab} και έτσι και η F_e μειώνονται, άρα $F_n > F_e$ και η F_n εκτελεί έργο επί των φορτίων.

Εσωτερική αντίσταση

25.15 Η ΗΕΔ μιας μπαταρίας –δηλαδή η πολική τάση όταν δεν είναι συνδεδεμένη με οτιδήποτε– είναι 12 V. Όμως, επειδή η μπαταρία έχει εσωτερική αντίσταση, η πολική της τάση είναι μικρότερη από 12 V όταν παρέχει ρεύμα σε μια λάμπα.



Πολική τάση, πηγή με εσωτερική αντίσταση

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

Ρεύμα διά της πηγής
Εσωτερική αντίσταση

(25.15)

$$\mathcal{E} - Ir = IR \quad \text{ή} \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad (\text{ρεύμα για πηγή με εσωτερική αντίσταση}) \quad (25.16)$$

ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

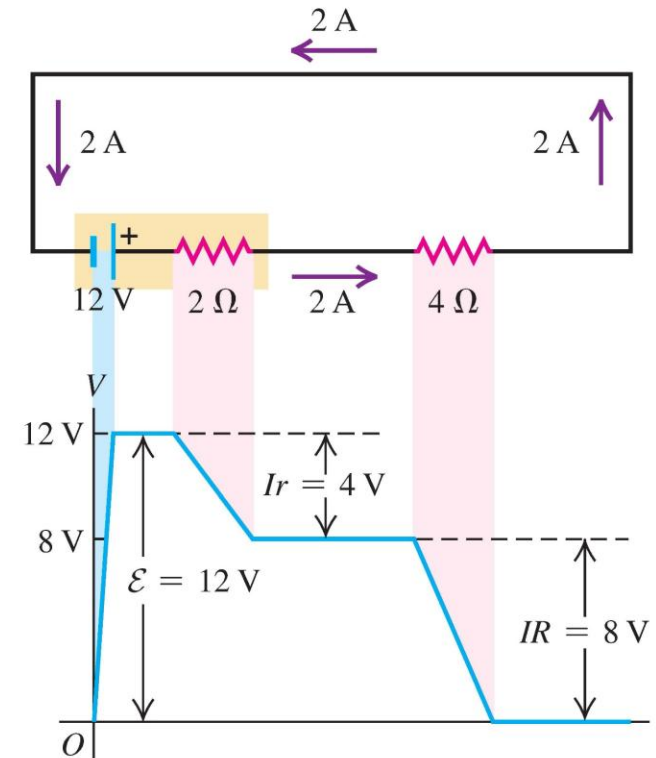
ΠΙΝΑΚΑΣ 25.4

Σύμβολα Σχηματικών Διαγραμμάτων Κυκλωμάτων

	Αγωγός με αμελητέα αντίσταση
	Αντιστάτης
	Πηγή ΗΕΔ (πάντοτε η μακρύτερη γραμμή της πηγής συμβολίζει τον θετικό ακροδέκτη, συνήθως ο ακροδέκτης με το υψηλότερο δυναμικό)
	Πηγή ΗΕΔ με εσωτερική αντίσταση r (το r μπορεί να τοποθετηθεί με οποιαδήποτε πλευρά)
ή	
	Βολτόμετρο (μετρά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών του)
	Αμπερόμετρο (μετρά το ρεύμα που το διαρρέει)

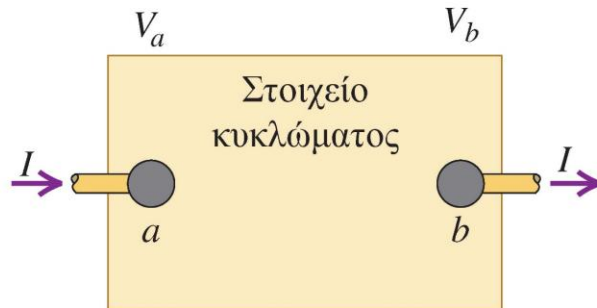
Μεταβολές δυναμικού κατά μήκος κυκλώματος

25.20 Αυξήσεις και μειώσεις δυναμικού σε ένα κύκλωμα.



ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

25.21 Η ισχύς εισόδου στο στοιχείο κυκλώματος μεταξύ των a και b είναι $P = (V_a - V_b)I = V_{ab}I$.



Ισχύς που παρέχεται
στο ή εξάγεται από
στοιχείο κυκλώματος

$$P = V_{ab}I \quad (25.17)$$

Τάση κατά μήκος
του στοιχείου κυκλώματος
Ρεύμα στο στοιχείο κυκλώματος

Ισχύς εισόδου σε ωμική αντίσταση

$$P = V_{ab}I = I^2R = \frac{V_{ab}^2}{R} \quad (25.18)$$

Ισχύς που παρέχεται
σε αντιστάτη
Τάση κατά μήκος του αντιστάτη
Ρεύμα στον αντιστάτη
Αντίσταση του αντιστάτη

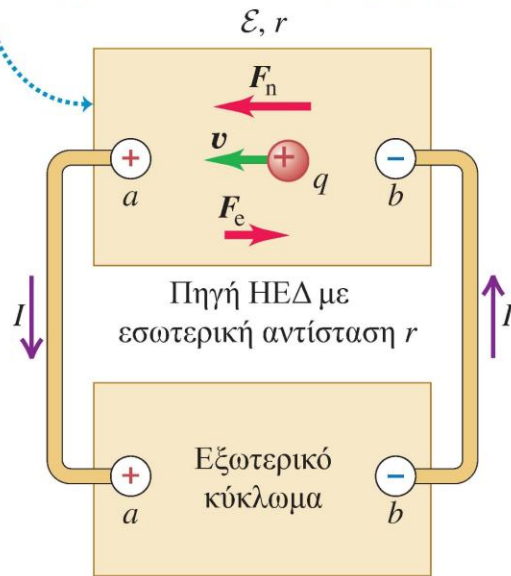
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Ισχύς εξόδου μιας πηγής

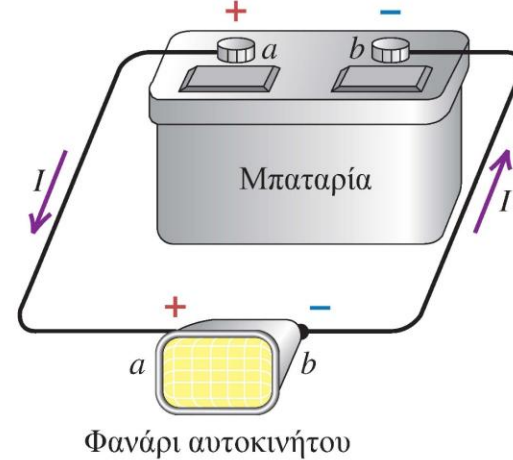
25.22 Μετατροπή ενέργειας σε ένα απλό κύκλωμα.

(a) Διάγραμμα κυκλώματος

- Η πηγή ΗΕΔ μετατρέπει μη ηλεκτρική σε ηλεκτρική ενέργεια με ρυθμό $\mathcal{E}I$.
- Η εσωτερική της αντίσταση καταναλώνει ενέργεια με ρυθμό I^2r .
- Η διαφορά $\mathcal{E}I - I^2r$ είναι η ισχύς εξόδου της.



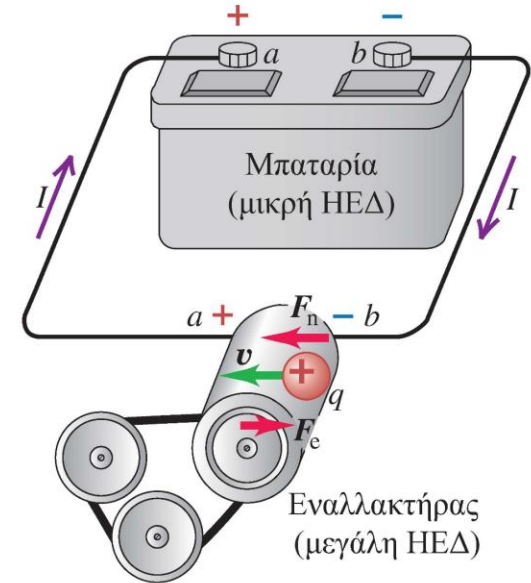
(b) Πραγματικό κύκλωμα του τύπου που φαίνεται στο (a)



Υποθέστε ότι το κάτω ορθογώνιο του Σχ. 25.22a είναι και αυτό πηγή, με ΗΕΔ *μεγαλύτερη* από αυτήν της άνω πηγής και αντίθετη από αυτήν της άνω πηγής. Το Σχ. 25.23 δείχνει ένα πραγματικό παράδειγμα, μια μπαταρία αυτοκινήτου (το άνω στοιχείο κυκλώματος) που φορτίζεται από τον εναλλακτήρα (το κάτω στοιχείο κυκλώματος) που είναι μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Το ρεύμα στο κύκλωμα είναι τότε *αντίθετο* από αυτό που φαίνεται στο Σχ. 25.22· η κάτω πηγή σπρώχνει ρεύμα αντίθετα διαμέσου της άνω πηγής.

Ισχύς εισόδου σε μια πηγή

25.23 Όταν δύο πηγές είναι συνδεδεμένες σε ένα απλό κύκλωμα ενός βρόχου, η πηγή με τη μεγαλύτερη ΗΕΔ παρέχει ενέργεια στην άλλη πηγή.

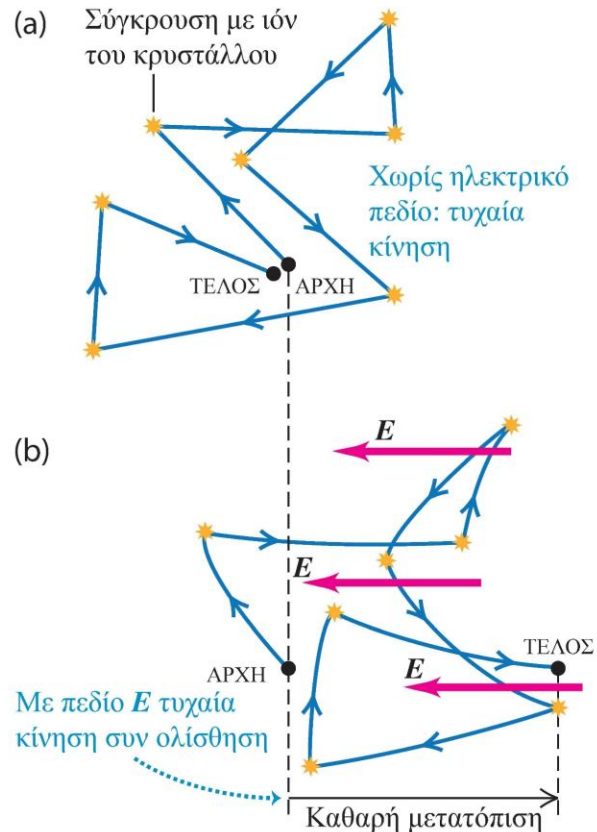


$$P = V_{ab}I = \mathcal{E}I + I^2r \quad (25.20)$$

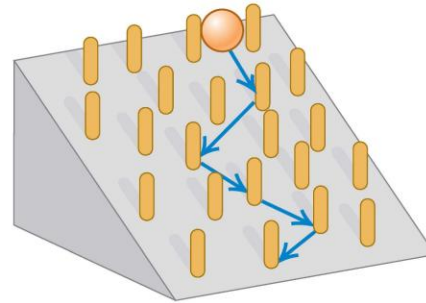
Έργο εκτελείται *επί του*, αντί *από τον*, παράγοντα που προκαλεί τη μη ηλεκτροστατική δύναμη στην άνω πηγή. Υπάρχει μια μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μη ηλεκτρική ενέργεια στην άνω πηγή με ρυθμό $\mathcal{E}I$.

ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

25.26 Τυχαίες κινήσεις ηλεκτρονίων μέσα σε μεταλλικό κρύσταλλο (a) με μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο, και (b) με ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί ολίσθηση. Οι καμπυλώσεις των τροχιών έχουν σχεδιαστεί υπερβολικά μεγάλες.



25.27 Η κίνηση μιας μπάλας, που κυλίζει προς τα κάτω σε κεκλιμένο επίπεδο και συγκρούεται κατά τη διαδρομή της με πασσάλους, είναι ανάλογη προς την κίνηση ενός ηλεκτρονίου σε μεταλλικό αγωγό παρουσία ηλεκτρικού πεδίου.



$$\rho = \frac{E}{J} \quad (25.21) \quad (\text{ορισμός ειδικής αντίστασης})$$

$$J = nq\mathbf{v}_d \quad (25.22) \quad (\text{πυκνότητα ρεύματος})$$

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

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

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (25.24)$$

Ειδική αντίσταση του μετάλλου

Μάζα ηλεκτρονίου

Πλήθος ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου

Μέσος χρόνος μεταξύ συγκρούσεων

Μέτρο του φορτίου του ηλεκτρονίου

