



Ηλεκτρομαγνητισμός (205)

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Διδάσκοντες Μαθήματος:

Αναπλ. Καθ. Κωνσταντίνος Πετρίδης (cpetridis@hmu.gr)

Επικ. Καθ. Γεώργιος Κακαβελάκης (kakavelakis@hmu.gr)

5. Ρεύμα και αντίσταση

Εισαγωγή

- Ως τώρα μελετήσαμε ηλεκτρικά φαινόμενα με ακίνητα φορτία, δηλαδή μελέτη της ηλεκτροστατικής (στατικού ηλεκτρισμού)
- Τώρα θα μελετήσουμε φαινόμενα που οφείλονται σε ηλεκτρικά φορτία που κινούνται, δηλαδή φαινόμενα ηλεκτροδυναμικής (δυναμικού ηλεκτρισμού)
- Επίσης θα εξετάσουμε το ρεύμα (ή ένταση ηλ. ρεύματος) που περιγράφει το ρυθμό ροής ενός ηλ. φορτίου δια μέσου μιας διατομής στο χώρο
- Οι περισσότερες εφαρμογές του ηλεκτρισμού έχουν σχέση με ηλ. ρεύματα

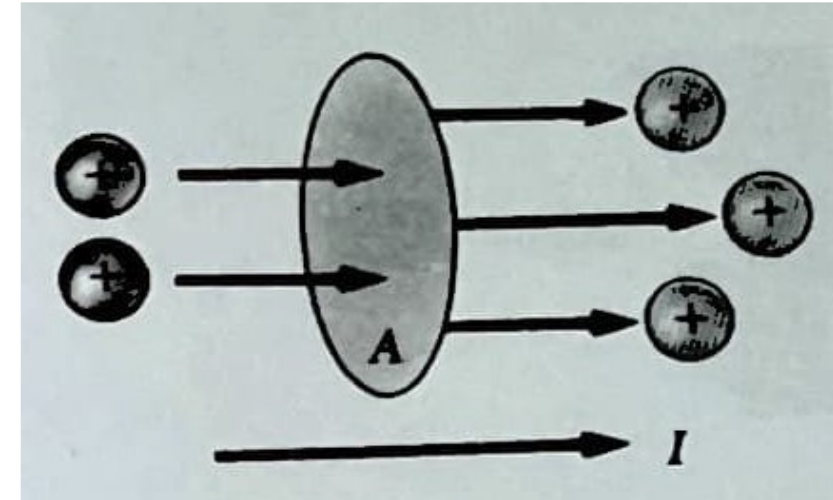
5.1 Ηλεκτρικό ρεύμα

- Τα ομώνυμα φορτία, όταν κινούνται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση δημιουργούν ηλ. ρεύμα
- Υποθέστε ότι φορτία κινούνται κάθετα προς την επιφάνεια A (σχήμα), έστω ότι είναι η διατομή ενός σύρματος
- Ορίζουμε ότι το ρεύμα ισούται με τον ως προς το χρόνο ρυθμό με τον οποίο το φορτίο ρέει δια μέσου αυτής της επιφάνειας
- Έστω ότι ένα φορτίο ΔQ διαρρέει την επιφάνεια κατά το χρονικό διάστημα Δt , τότε το μέσο ρεύμα I_{av} ισούται με το πηλίο του φορτίου δια το διαρρέυσαν χρονικό διάστημα:

$$I_{av} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

- Αν όμως ο ρυθμός ροής του φορτίου μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου, τότε μεταβάλλεται και το ρεύμα
- Έτσι ορίζουμε το στιγμιαίο ρεύμα I (ένταση ηλ. ρεύματος), ως το όριο του μέσου ρεύματος όταν το Δt τείνει στο μηδέν:

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

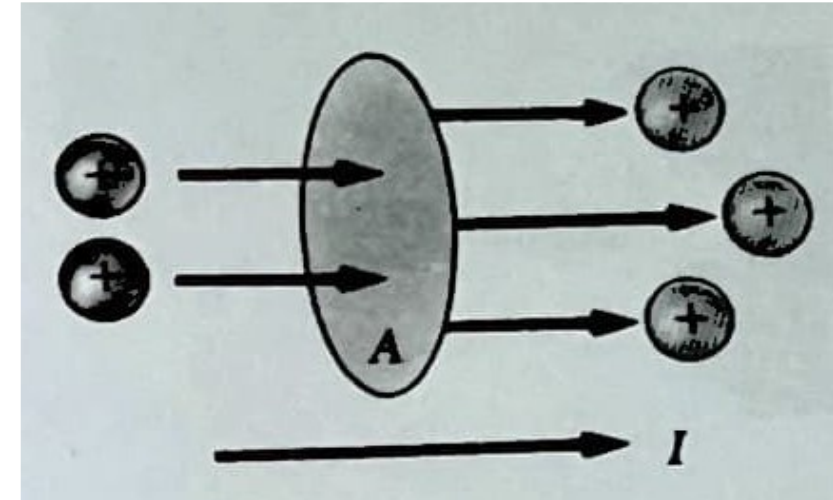


5.1 Ηλεκτρικό ρεύμα

- Στο SI η μονάδα ρεύματος είναι το Ampere (A) όπου 1 Ampere:

$$1A = 1 \frac{C}{s}$$

- Αν φορτίο 1C διέλθει δια μέσου της επιφάνειας κατά τη διάρκεια 1s, το ρεύμα είναι 1A.
- Τα φορτία που ρέουν δια μέσου μιας επιφάνειας μπορεί να είναι θετικά ή αρνητικά ή και τα δύο
- Συμβατικά δεχόμαστε ότι η κατεύθυνση του ρεύματος συμπίπτει με την κατεύθυνση της ροής των θετικών φορτίων
- Σε ένα αγωγό (πχ χαλκός), το ηλ. ρεύμα οφείλεται στην κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων (αρνητικών φορτίων), άρα η κατεύθυνση του ρεύματος είναι αντίθετη με την κατεύθυνση ροής των ηλεκτρονίων



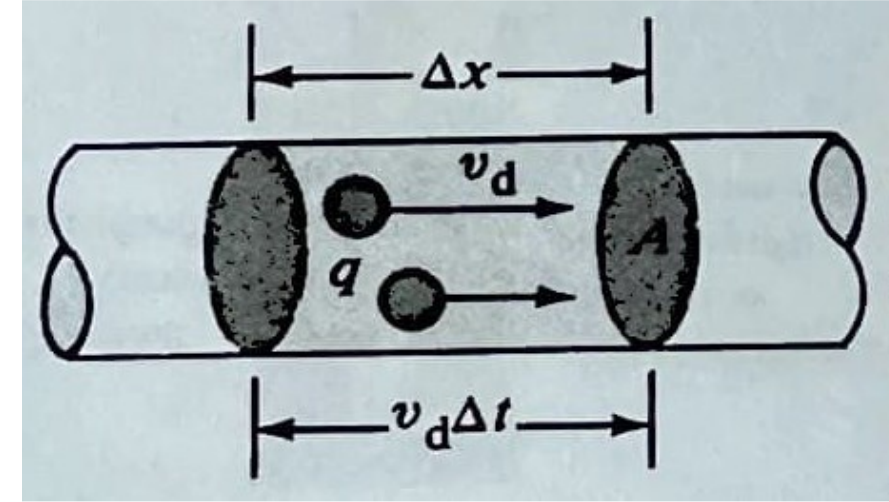
5.1 Ηλεκτρικό ρεύμα

- Ας εξετάσουμε το ρεύμα ενός αγωγού διατομής A (σχήμα)
- Ο όγκος του γραμοσκιασμένου τμήματος μήκους Δx είναι $A \Delta x$
- Αν συμβολίσουμε με n τον αριθμό των κινούμενων φορτίων ανά μονάδα όγκου, τότε ο αριθμός των κινούμενων φορτίων μέσα στο τμήμα αυτό είναι $nA \Delta x$
- Άρα το φορτίο ΔQ αυτού του τμήματος του αγωγού είναι:

$$\Delta Q = (nA \Delta x)q$$

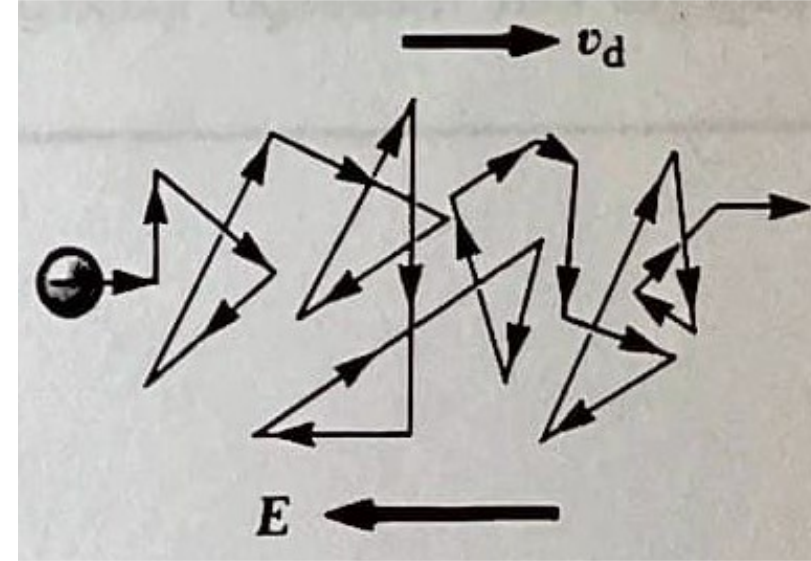
- Αν τα φορτία κινούνται με ταχύτητα v_d τότε η απόσταση που καλύπτουν στο χρονικό διάστημα Δt είναι $\Delta x = v_d \Delta t$
- Άρα το ΔQ γίνεται: $\Delta Q = (nA v_d \Delta t)q$
- Έτσι αν διαιρέσουμε το ΔQ με το Δt για να βρούμε το ρεύμα:

$$I = nq A v_d$$



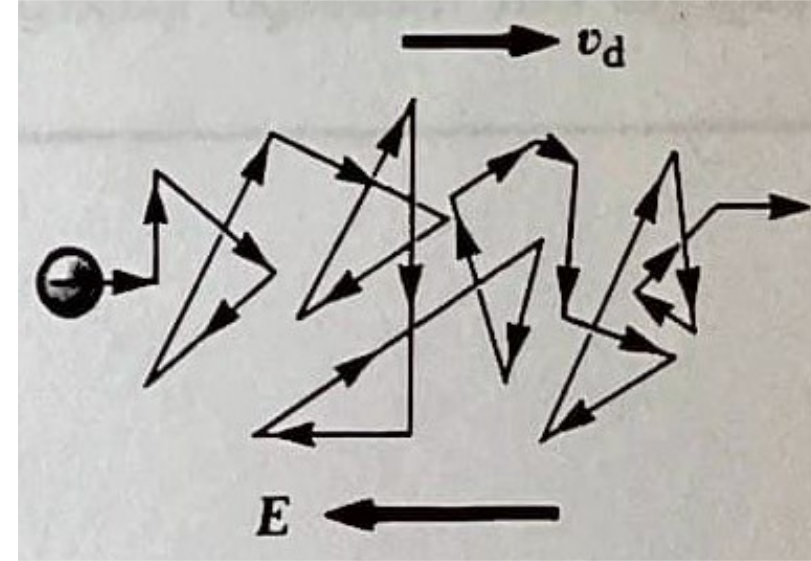
5.1 Ηλεκτρικό ρεύμα

- Η ταχύτητα v_d είναι ο μέσος όρος των ταχυτήτων των φορτίων και την ονομάζουμε ταχύτητα διολίσθησης
- Για να την καταλάβουμε καλύτερα έστω ότι έχουμε ένα αγωγό που έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια
- Αν δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού, τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται εντελώς τυχαία
- Όταν όμως εφαρμόσουμε διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού (πχ τον συνδέσουμε με μια μπαταρία), τότε δημιουργείται μέσα στον αγωγό ένα εξωτερικό ηλ. πεδίο. Το πεδίο αυτό ασκεί ηλ. δύναμη πάνω στα ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται αντίθετα με την κατεύθυνση του ηλ. πεδίου και έτσι δημιουργείται ρεύμα
- Στην πραγματικότητα κάθε ηλεκτρόνιο δεν κινείται σε σταθερή ευθύγραμμη τροχιά, αλλά συγκρούεται επανειλημμένα με τα άτομα του μετάλλου, με αποτέλεσμα να διανύει μια τεθλασμένη τροχιά
- Τα άτομα του μετάλλου κερδίζουν ενέργεια από αυτές τις κρούσεις των ηλεκτρονίων και έτσι αρχίζουν να ταλαντώνονται εντονότερα γύρω από τη θέση ισορροπίας τους, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του μετάλλου



5.1 Ηλεκτρικό ρεύμα

- Παρόλες αυτές τις κρούσεις, τα ηλεκτρόνια κινούνται κατά μήκος του αγωγού με μέση ταχύτητα την ταχύτητα διολίσθησης
- Το ρεύμα όμως δημιουργείται από το εξωτερικό ηλ. πεδίο, αφού η ενέργεια που παρέχει στα ηλεκτρόνια, είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που χάνουν εξαιτίας των κρούσεων με τα άτομα του μετάλλου



5.2 Αντίσταση και ο νόμος του Ohm

- Σε προηγούμενα κεφάλαια είδαμε ότι δεν μπορεί να υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε ένα αγωγό, όταν αυτός είναι σε ηλεκτροστατική ισορροπία
- Τώρα θα δούμε τι συμβαίνει όταν τα φορτία κινούνται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση σε ένα αγωγό
- Τα φορτία ενός αγωγού είδαμε ότι κινούνται υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ηλ. πεδίου και παράγουν ρεύμα
- Σε αυτή την περίπτωση δεν απαγορεύεται η ύπαρξη ηλ. πεδίου μέσα στον αγωγό
- Έστω ότι έχουμε ένα αγωγό διατομής A που διαρρέεται από ρεύμα I
- Ορίζουμε ως πυκνότητα ρεύματος J στο αγωγό, το ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας.
- Εφόσον $I = nq A v_d$, τότε $J = \frac{I}{A} = nq v_d$
- Με μονάδες στο SI A/m^2
- Η πυκνότητα ρεύματος είναι διανυσματικό μέγεθος, άρα έχει την ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα των θετικών φορτίων

5.2 Αντίσταση και ο νόμος του Ohm

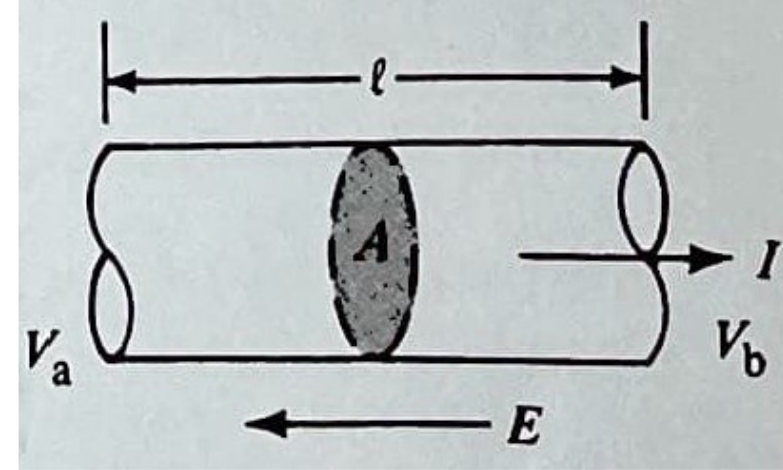
- Όταν υπάρχει διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα άκρα ενός αγωγού, τότε αμέσως δημιουργείται ηλ. πεδίο $\mathbf{E}$ και πυκνότητα ρεύματος $\mathbf{J}$
- Αν η διαφορά δυναμικού είναι σταθερή, τότε το ρεύμα του αγωγού είναι σταθερό
- Η πυκνότητα ρεύματος είναι συνήθως ανάλογη με το ηλ. πεδίο και συνδέεται με τον τύπο $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$, όπου σ είναι η αγωγιμότητα του υλικού του αγωγού
- Τα υλικά για τα οποία ισχύει η παραπάνω εξίσωση λέμε ότι ακολουθούν το νόμο του Ohm, που ορίζει ότι για πολλά υλικά (μέσα σε αυτά και τα μέταλλα) ο λόγος της πυκνότητας ρεύματος προς το ηλεκτρικό πεδίο είναι ίσος με τη σταθερά σ και ανεξάρτητος από το πεδίο που παράγει το ρεύμα
- Τα υλικά που ακολουθούν αυτό το νόμο λέγονται ωμικά και γι' αυτά τα $\mathbf{E}$ και $\mathbf{J}$ είναι ανάλογα
- Φυσικά γνωρίζουμε ότι ο νόμος του Ohm δεν ισχύει για όλα τα υλικά, τα οποία ονομάζονται μη-ωμικά

5.2 Αντίσταση και ο νόμος του Ohm

- Ας θεωρήσουμε ένα κομμάτι ευθύγραμμου σύρματος έχει μήκος l και διατομή A
- Η σταθερή διαφορά δυναμικού $V_b - V_a$ στα άκρα του σύρματος δημιουργεί ηλ. πεδίο και επομένως ρεύμα μέσα στον αγωγό
- Αν υποθέσουμε ότι το ηλ. πεδίο μέσα στον αγωγό είναι ομογενές, τότε η διαφορά δυναμικού $V = V_b - V_a$ σχετίζεται με το ηλ. πεδίο σύμφωνα με τη σχέση: $V = El$
- Μπορούμε να πούμε ότι η πυκνότητα ρεύματος στο σύρμα είναι:

$$J = \sigma E = \sigma V/l$$

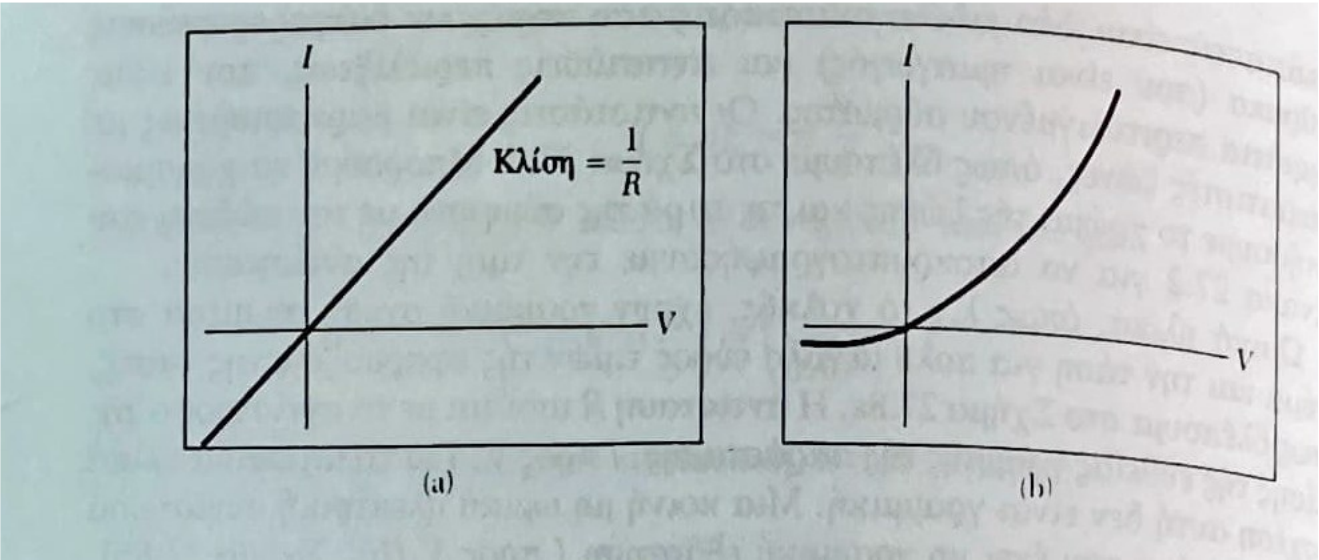
- Άρα η διαφορά δυναμικού ισούται με $V = (l/\sigma)J = (l/\sigma A)I$
- Η ποσότητα $l/\sigma A$ ονομάζεται αντίσταση R του αγωγού: $R = l/\sigma A = V/I$
- Στο SI η αντίσταση έχει μονάδες Volt ανά Ampere. Ορίζουμε ότι ένα Ohm (Ω) ισούται με το πηλίκο ενός volt δια ενός Ampere ($1\Omega = 1V/A$)
- Αν η διαφορά δυναμικού 1V στα άκρα ενός αγωγού προκαλεί ρεύμα 1A, τότε λέμε ότι η αντίσταση του αγωγού είναι 1 Ω
- Πχ αν μια συσκευή είναι συνδεδεμένη με πηγή 220V και διαρρέεται από ρεύμα 10A, τότε έχει αντίσταση 22 Ω



5.2 Αντίσταση και ο νόμος του Ohm

- Το αντίστροφο της αγωγιμότητας ενός υλικού ονομάζεται ειδική αντίσταση ρ : $\rho=1/\sigma$
- Χρησιμοποιώντας αυτό τον ορισμό και την εξίσωση της αντίστασης έχουμε: $R=\rho (l/A)$
- Μονάδες της ειδικής αντίστασης ρ είναι $\Omega \text{ m}$
- Κάθε ωμικό υλικό έχει μια χαρακτηριστική ειδική αντίσταση, που εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία
- Άρα η αντίσταση δεν εξαρτάται μόνο από την ειδική αντίσταση του υλικού, αλλά και από τη γεωμετρία του
- Καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού έχουν πολύ χαμηλή ειδική αντίσταση, ενώ καλοί μονωτές έχουν πολύ υψηλή ειδική αντίσταση
- Όλες οι ηλεκτρικές συσκευές όπως πχ θερμάστρες, λαμπτήρες κλπ. έχουν σταθερή αντίσταση
- Στα περισσότερα κυκλώματα για να ελεγχθεί η τιμή του ρεύματος, χρησιμοποιούμε ηλεκτρικές αντιστάσεις

5.2 Αντίσταση και ο νόμος του Ohm



(α) Ωμική και (β) μη-ωμική συμπεριφορά

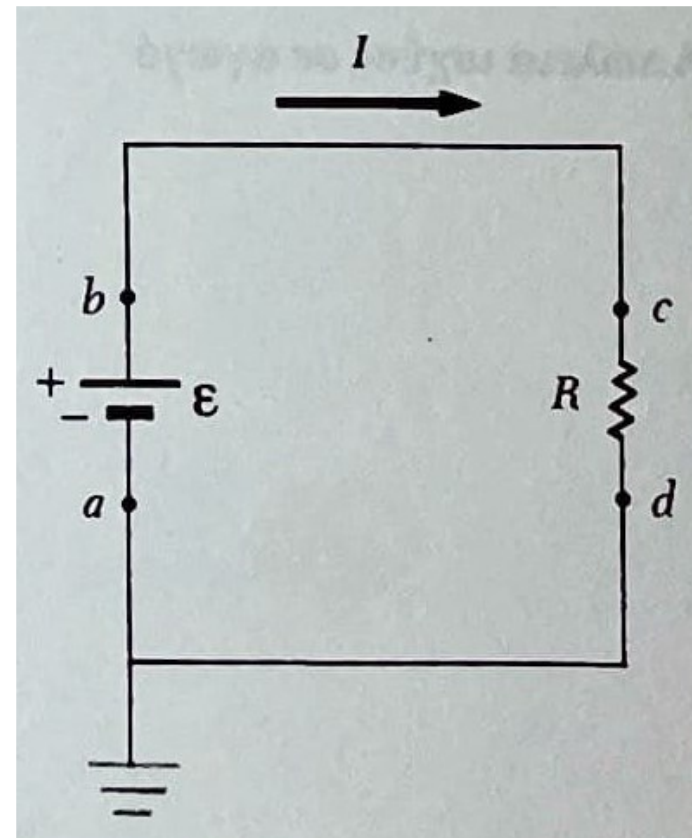
Υλικό	Ειδική αντίσταση ^a ($\Omega \cdot \text{m}$)
Άργυρος	1.59×10^{-8}
Χαλκός	1.7×10^{-8}
Χρυσός	2.44×10^{-8}
Αλουμίνιο	2.82×10^{-8}
Βολφράμιο	5.6×10^{-8}
Σίδηρος	10×10^{-8}
Πλατίνα	11×10^{-8}
Μόλυβδος	22×10^{-8}
Χρωμιονικελίνης ^b	150×10^{-8}
Χαλκός	3.5×10^{-5}
Γερμάνιο	0.46
Πυρίτιο	640
Ύαλος	$10^{10} - 10^{14}$
Εδονίτης	$\approx 10^{13}$
Θείο	10^{15}
Χαλαζίας	75×10^{16}

5.3 Ηλεκτρική ενέργεια και ισχύς

- Όταν χρησιμοποιούμε μπαταρία για τη δημιουργία ρεύματος σε ένα αγωγό, έχουμε συνεχή μετατροπή της χημικής ενέργειας της μπαταρίας σε κινητική ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων
- Η κινητική αυτή ενέργεια δαπανάται στις κρούσεις των ελεύθερων ηλεκτρονίων με τα άτομα του αγωγού που βρίσκονται στις πλεγματικές τους θέσεις
- Αυτά με τη σειρά τους, λόγω της ενέργειας που κερδίζουν, ταλαντώνονται περισσότερο και έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία του αγωγού
- Άρα η χημική ενέργεια της μπαταρίας μετατρέπεται συνεχώς σε θερμική ενέργεια του αγωγού

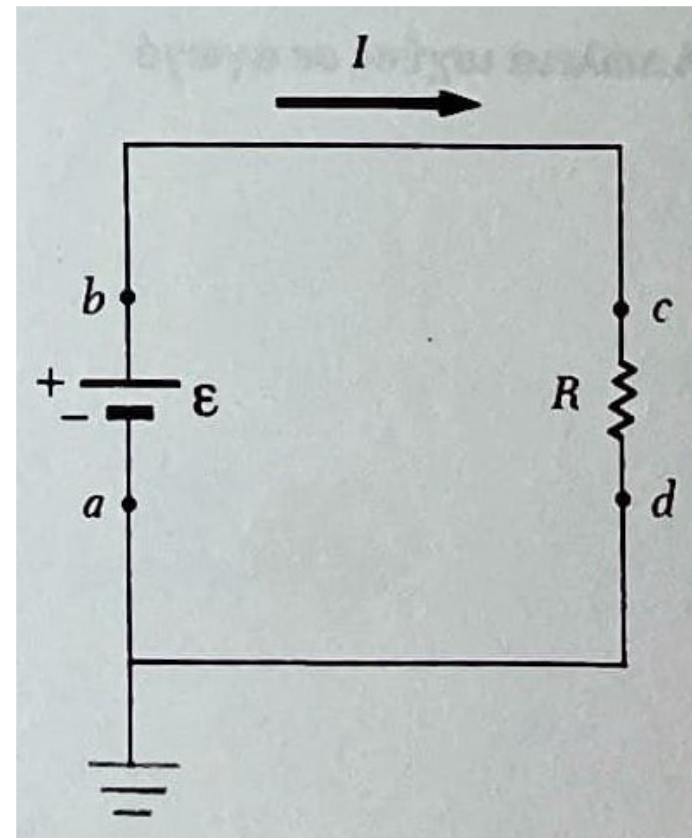
5.3 Ηλεκτρική ενέργεια και ισχύς

- Έστω ότι έχουμε το απλό κύκλωμα που αποτελείται από μια μπαταρία της οποίας οι πόλοι είναι συνδεδεμένοι με μια αντίσταση R
- Ο θετικός πόλος της μπαταρίας είναι αυτός με το υψηλότερο δυναμικό από τον αρνητικό
- Έστω ότι μια ποσότητα θετικού φορτίου ΔQ κινείται στο κύκλωμα ξεκινώντας από το σημείο a δια μέσου της μπαταρίας και της αντίστασης καταλήγοντας πίσω στο σημείο a .
- Το σημείο a είναι το σημείο αναφοράς και είναι γειωμένο. Θεωρούμε το δυναμικό της γης ότι είναι μηδενικό
- Καθώς το φορτίο κινείται δια μέσου της μπαταρίας από το a στο b , η ηλεκτρική δυναμική του ενέργεια αυξάνεται κατά $V\Delta Q$, ενώ η χημική δυναμική ενέργεια της μπαταρίας ελαττώνεται κατά την ίδια ποσότητα
- Καθώς στη συνέχεια το φορτίο κινείται μέσα στην αντίσταση από το σημείο c στο d , χάνει την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του καθώς συγκρούεται με τα άτομα της αντίστασης, παράγοντας έτσι θερμική ενέργεια
- Επίσης αν μπορούσαμε να αγνοήσουμε την αντίσταση των συρμάτων, η ενέργεια δε θα μεταβαλλόταν στις διαδρομές bc και da .
- Έτσι όταν το φορτίο επιστρέφει στο σημείο a , έχει την ίδια δυναμική ενέργεια (μηδέν) που είχε στην αρχή.



5.3 Ηλεκτρική ενέργεια και ισχύς

- Ο ρυθμός με τον οποίο το φορτίο ΔQ χάνει δυναμική ενέργεια καθώς διέρχεται από την αντίσταση είναι: $\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} V = IV$, όπου I είναι το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα
- Το φορτίο ξανακερδίζει την ενέργεια αυτή όταν διέλθει και πάλι από την μπαταρία
- Ο ρυθμός με τον οποίο το φορτίο χάνει ενέργεια ισούται με την ισχύ P που χάνεται στην αντίσταση. Έτσι $P = IV$
- Στη περίπτωση μας η ισχύς αυτή παρέχεται από την μπαταρία
- Η εξίσωση $P = IV$ ισχύει για τον υπολογισμό μεταφοράς ισχύος σε οποιαδήποτε συσκευή που έχει διαφορά δυναμικού V στους πόλους της και διαρρέεται από ρεύμα I
- Αν χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση $P = IV$ και εφόσον γνωρίζουμε ότι για την αντίσταση ισχύει $V = IR$, μπορούμε να εκφράσουμε την ισχύ που καταναλώθηκε στην αντίσταση ως: $P = I^2 R = V^2 / R$
- Στο SI το ρεύμα μετριέται σε Ampere, η τάση σε Volt, η αντίσταση σε Ω και η ισχύς σε Watt (W).
- Η ισχύς που καταναλώνεται υπό μορφή θερμότητας σε μια αντίσταση R λέγεται θερμική ισχύς joule



5.3 Ηλεκτρική ενέργεια και ισχύς

- Ονομάζουμε τις μπαταρίες, όπως και όλες τις πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, πηγές ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ)
- Αν αγνοήσουμε την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα σημεία α και b ισούται με την ΗΕΔ $\mathcal{E}$ της μπαταρίας. Δηλαδή $V = V_b - V_a = \mathcal{E}$
- Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι $I = V/R = \mathcal{E}/R$
- Αφού $V = \mathcal{E}$, η ισχύς που παρέχεται από την ΗΕΔ μπορεί να γραφτεί ως $P = I\mathcal{E}$, που φυσικά ισούται με την ισχύ I^2R , η οποία καταναλώθηκε στην αντίσταση

Συνοψίζοντας τι είδαμε στο Κεφάλαιο 5

- ✓ Ηλεκτρικό ρεύμα
- ✓ Αντίσταση και νόμος Ohm
- ✓ Ηλεκτρική ενέργεια και ισχύς

Ερωτήσεις;