

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ- ΑΝΤΙΣΤΑΤΕΣ

7.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε την ηλεκτρική αγωγιμότητα των μεταλλικών υλικών και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, όπως η θερμοκρασία, οι κρυσταλλικές ατέλειες και η μηχανική κατεργασία. Επίσης, θα αναφέρουμε τις ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές και ότι η επιλογή του κατάλληλου αγώγιμου υλικού εξαρτάται κύρια από την ειδική αντίσταση και τη μεταβολή της από εξωτερικούς παράγοντες, τη μηχανική αντοχή και την αντοχή στη διάβρωση.

7.2. Οι σπουδαιότερες ιδιότητες των μεταλλικών υλικών

Για να είναι πετυχημένη μία ηλεκτρονική θεωρία για τα μεταλλικά υλικά θα πρέπει να προβλέπει τις εξής ιδιότητες, που είναι και οι σπουδαιότερες απ' αυτές που παρατηρούνται πειραματικά στα μέταλλα:

1). Κάτω από ισόθερμες συνθήκες ισχύει ο νόμος του Ohm, ο οποίος γράφεται με τη μορφή:

$$\bar{J} = \sigma \cdot \bar{E} \quad 7.1$$

όπου σ είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, J είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

2). Τα μέταλλα είναι πολύ καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Έτσι λοιπόν, ενώ η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός μονωτή μπορεί να είναι μέχρι και $10^{-16} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ και στους ημιαγωγούς παίρνει τιμές συνήθως στην περιοχή $10^{-4} - 10^5 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, για τα περισσότερα μέταλλα στη θερμοκρασία δωματίου η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα παίρνει τιμές στην περιοχή $10^6 - 10^8 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$. Στον πίνακα 7-1 φαίνονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας για μία σειρά από μέταλλα που περιέχει μονοσθενή και πολυσθενή καθώς και μεταβατικά μέταλλα.

3). Τα μέταλλα έχουν μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k_e , που οφείλεται στη συνεισφορά των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Οι Wiedemann και Franz παρατήρησαν ότι οι καλοί αγωγοί της θερμότητας είναι και καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και μάλιστα, διατύπωσαν το γνωστό νόμο Wiedemann-Franz, που λέει

ότι ο λόγος $\frac{k_e}{\sigma}$ είναι σταθερός για όλα τα μέταλλα στην ίδια θερμοκρασία. Στις συνηθισμένες θερμοκρασίες ο λόγος αυτός είναι ανάλογος προς την απόλυτη θερμοκρασία, οπότε προκύπτει ότι ο αριθμός του Lorenz ($L = \frac{k_e}{\sigma \cdot T}$) είναι σταθερός για όλα τα μέταλλα και ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 7-1.

4). Όταν τα μέταλλα ψύχονται πολύ πιο κάτω από μία χαρακτηριστική θερμοκρασία (που σχετίζεται με τη θερμοκρασία Debye), παρατηρούμε μία αύξηση στην τιμή του k_e και ακόμα ταχύτερη αύξηση της σ . Για το χαλκό και μερικά άλλα μονοσθενή μέταλλα η σ μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση $\sigma \propto T^{-5}$ στο πιο απότομο τμήμα της αντίστοιχης καμπύλης στο σχήμα 7.1.

Πίνακας 7-1. Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ^* και αριθμός του Lorenz για διάφορα μεταλλικά υλικά.

Μεταλλικό υλικό	T = 100K		T = 273K	
	Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma(\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$	Αριθμός του Lorenz $L = \frac{k_e}{\sigma T} (V^2 / T^2)$	Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα $\sigma(\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$	Αριθμός του Lorenz $L = \frac{k_e}{\sigma T} (V^2 / T^2)$
Χαλκός	$2,9 \times 10^8$	$1,9 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^7$	$2,3 \times 10^{-8}$
Χρυσός	$1,6 \times 10^8$	$2,0 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^7$	$2,4 \times 10^{-8}$
Ψευδάργυρος	$6,2 \times 10^7$	$1,8 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^7$	$2,3 \times 10^{-8}$
Κάδμιο	$4,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^7$	$2,4 \times 10^{-8}$
Αλουμίνιο	$2,1 \times 10^8$	$1,5 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^7$	$2,2 \times 10^{-8}$
Μόλυβδος	$1,5 \times 10^7$	$2,0 \times 10^{-8}$	$5,2 \times 10^6$	$2,5 \times 10^{-8}$
Βολφράμιο	$9,8 \times 10^7$	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,1 \times 10^7$	$3,0 \times 10^{-8}$
Σίδηρος	$8,0 \times 10^7$	$3,1 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^7$	$2,8 \times 10^{-8}$

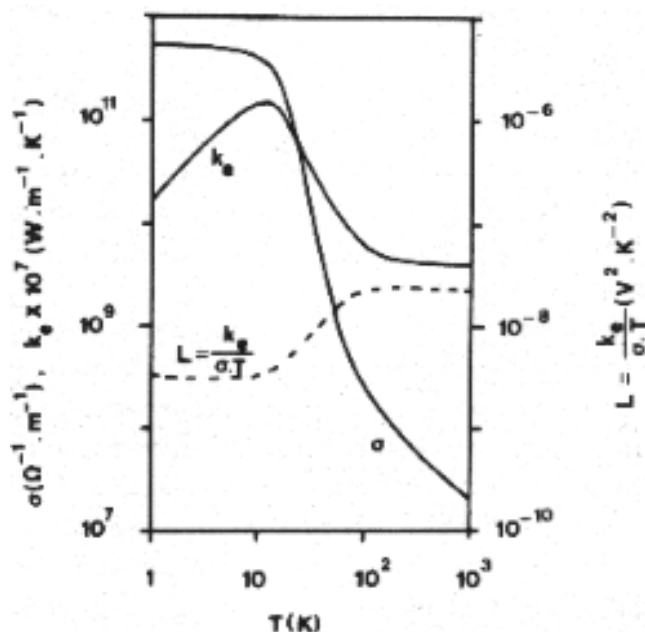
5). Σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, η σ τείνει σε μία σταθερή τιμή που καθορίζεται από τις ξένες προσμίξεις και από τις δομικές ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση τότε βρίσκεται συνήθως ότι υπακούει στο νόμο Matthiessen:

$$\rho(T) = \frac{1}{\sigma(T)} = \frac{1}{\sigma_{imp.}} + \frac{1}{\sigma_{καθ.}(T)}$$

7.2

* G. T. Meaden, "Electrical Resistance of Metals" (Plenum Press, 1965).

όπου η συνεισφορά των προσμίξεων και των πλεγματικών ατελειών, $\sigma_{imp.}$, είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία. Επομένως, τη $\sigma_{imp.}$ είναι εύκολο να την παρατηρήσουμε στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, όπου η συνεισφορά του καθαρού μετάλλου, $\sigma_{καθ.}(T)$, τείνει στο άπειρο και η $1/\sigma_{καθ.}(T)$ τείνει στο μηδέν.



Σχήμα 7.1. Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ και συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κ_e (συνιστώσα που οφείλεται, μόνο στα ηλεκτρόνια) στον πολύ καθαρό χαλκό ως συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας.

- 6). Τα μαγνητικά φαινόμενα στα σιδηρομαγνητικά μέταλλα και κράματα συνεισφέρουν επίσης στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υλικών αυτών.
- 7). Τα μισά περίπου από τα μέταλλα γίνονται υπεραγωγοί στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.
- 8). Το ηλεκτρονικό αέριο στα μέταλλα παρουσιάζει πολύ μικρή ειδική θερμότητα, η οποία είναι ανάλογη προς την απόλυτη θερμοκρασία, ενώ η αντίστοιχη παραμαγνητική επιδεκτικότητα του ηλεκτρονικού αερίου είναι και πολύ μικρή αλλά και ανεξάρτητη από την απόλυτη θερμοκρασία.
- 9). Με την παρουσία ενός συνδυασμού από ένα ηλεκτρικό πεδίο, ένα μαγνητικό πεδίο και μια κλίση θερμοκρασίας στα μεταλλικά υλικά εμφανίζονται διάφορα γαλβανο-θερμο-μαγνητικά φαινόμενα, τα οποία είναι συνήθως πολύ ασθενικά στα μέταλλα.
- 10). Για πολύ καθαρά μονοκρυσταλλικά μεταλλικά υλικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε διάφορα φαινόμενα που εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του κρυστάλλου, όταν υπάρχει πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο στα υλικά αυτά. Πολλά από τα φαινόμενα αυτά είναι κυματοειδείς συναρτήσεις της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Τα διάφορα θεωρητικά πρότυπα, που προτάθηκαν κατά καιρούς για να

εξηγήσουν το φαινόμενο της μεταλλικής αγωγιμότητας, θεωρούν ότι η κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων αποτελείται από τις εξής δύο συνιστώσες:

α). Η πρώτη συνιστώσα είναι η τυχαία (άτακτη) κίνηση που οφείλεται στη θερμική ενέργεια καθώς και στην ενέργεια μηδενικού σημείου (στα κλασσικά πρότυπα υπάρχει μόνο η θερμική άτακτη κίνηση, ενώ στα κβαντικά πρότυπα ενός "εκφυλισμένου" ηλεκτρονικού αερίου κυριαρχεί η κίνηση μηδενικού σημείου). Η στιγμιαία ταχύτητα του οποιουδήποτε ηλεκτρονίου είναι αρκετά μεγάλη, πλην όμως η μέση ταχύτητα του συνόλου των ηλεκτρονίων στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας (όταν δεν υπάρχουν εξωτερικές επιδράσεις) είναι ίση με το μηδέν εξαιτίας της τυχαίας αυτής κίνησης των ηλεκτρονίων. Για ένα οποιοδήποτε συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο, η χρονική μέση τιμή του μέτρου του διανύσματος της ταχύτητας (για μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να έχουμε πολλές ελεύθερες διαδρομές ανάμεσα στις κρούσεις) είναι διαφορετική από το μηδέν, ενώ η αντίστοιχη χρονική μέση τιμή του διανύσματος της ταχύτητας (άρα και η πυκνότητα του ρεύματος) είναι ίση με το μηδέν, όταν δεν υπάρχει εξωτερικό πεδίο. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι οι κρούσεις αλλάζουν την πορεία της κίνησης του ηλεκτρονίου με την ίδια πιθανότητα σ' οποιαδήποτε κατεύθυνση.

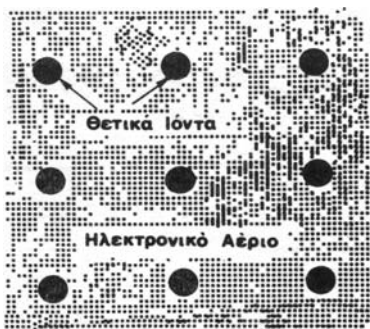
β). Η δεύτερη συνιστώσα της κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μια συστηματική κατευθυνόμενη κίνηση που οφείλεται στην παρουσία ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου ή μίας κλίσης θερμοκρασίας στο μέταλλο.

Η μέση τιμή του διανύσματος της ταχύτητας για το σύνολο των ηλεκτρονίων δεν είναι ίση με το μηδέν, όταν επιδρά το εξωτερικό πεδίο, και κάθε ηλεκτρόνιο τείνει να κινηθεί προς την ίδια κατεύθυνση. Κατά πόσο αυτή η κατευθυνόμενη κίνηση θα οδηγήσει σε φαινόμενα, που μπορούν να παρατηρηθούν μακροσκοπικά, εξαρτάται από το **μέσο ελεύθερο χρόνο τ_m** μεταξύ των κρούσεων.

7.3. Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Θα θεωρήσουμε ότι τα μέταλλα αποτελούνται από: α) Μία περιοδική τρισδιάστατη διάταξη **θετικών ιόντων** που συμπεριλαμβάνουν τον ατομικό πυρήνα και τα ηλεκτρόνια των κλειστών εσωτερικών στοιβάδων του ατόμου και β) Μία σχεδόν ομοιόμορφη πυκνότητα αρνητικού φορτίου που οφείλεται σ' όλα τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής ηλεκτρονικής στοιβάδας. Τα ηλεκτρόνια αυτά που περιγράφονται με κυματοσυναρτήσεις που εκτείνονται στο χώρο πέρα από τα όρια ενός ατόμου ονομάζονται **ηλεκτρόνια σθένους ή ελεύθερα ηλεκτρόνια**. Η συγκέντρωση αυτών είναι ανάλογη της ατομικής συγκέντρωσης πολλαπλασιαζόμενη με το σθένος των ατόμων (είναι μεγαλύτερη από $N=2 \times 10^{28} \text{m}^{-3}$). Αυτά σχηματίζουν το λεγόμενο "ηλεκτρονικό αέριο", που τα σωματίδιά του εκτελούν την άτακτη θερμική

κίνησή τους. Το σύστημα αυτό παριστάνεται διαγραμματικά στο σχήμα 7.2. Η μέση τιμή της πυκνότητας του φορτίου είναι μηδενική, αφού στο μέταλλο έχουμε ηλεκτρική ουδετερότητα.



Σχήμα 7.2 .Σχηματική διάταξη των ατόμων μετάλλου σε ένα επίπεδο, για μονοσθενή άτομα.

1. Υποθέτουμε ότι το περιοδικό ηλεκτροστατικό δυναμικό στο εσωτερικό του κρυστάλλου έχει αμελητέα επίδραση πάνω στα N ηλεκτρόνια-κύματα (στην πραγματικότητα υποθέτουμε $V=0$), και κινούνται εντελώς ελεύθερα μέσα σ' ολόκληρο τον όγκο του μετάλλου. Δηλαδή τα μέταλλα μπορούν να μοντελοποιηθούν, ως μία συλλογή N μη-αλληλοεπιδρώντα ηλεκτρόνια.
2. Στην επιφάνεια του μετάλλου τα N ηλεκτρόνια συναντούν ένα φράγμα δυναμικού (έχει τιμές από 4eV ως 11eV) που τ' αναγκάζει να περιορίζονται μέσα στο μέταλλο.

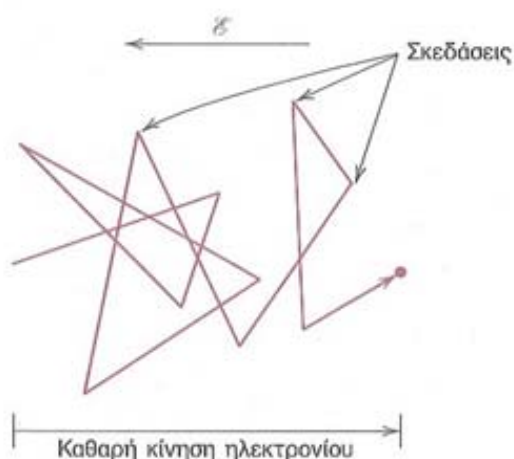
Η μοντελοποίηση αυτή ονομάζεται *θεωρία του αερίου των ελεύθερων ηλεκτρονίων* και προτάθηκε από τον Sommerfeld το 1928. Στο μοντέλο αυτό η ενέργεια των ηλεκτρονίων ακολουθεί την κατανομή Fermi-Dirac και τα ηλεκτρόνια ακολουθούν την αρχή του Pauli. Η χρήση του περιορίζεται στα μέταλλα, παρά το γεγονός ότι έχει σημαντικές βελτιώσεις δεν μπορεί να απαντήσει στο ερώτημα "γιατί ένα κρύσταλλος είναι αγωγός και άλλος δεν είναι".

Τα θετικά ιόντα των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα δονούνται γύρω από τη μέση θέση ισορροπίας τους και επομένως κατέχουν κινητική ενέργεια που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συνεχώς ανταλλάσσουν ενέργεια με τα δονούμενα θετικά ιόντα του πλέγματος γύρω από τη θέση ισορροπίας τους με ελαστικές και ανελαστικές συγκρούσεις (σκεδάσεις). Απουσία ηλεκτρικού πεδίου η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι τυχαία και τα ηλεκτρόνια έχουν θερμική ταχύτητα

$$\frac{1}{2} m v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v_{th} = \left(\frac{3kT}{m} \right)^{1/2} \quad 7.3$$

Τα ηλεκτρόνια έχουν την ίδια πιθανότητα να κινηθούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση με αποτέλεσμα να μην έχουμε ροή ρεύματος.

Κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου $E(V/cm)$, ασκείται δύναμη πάνω στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Κατά συνέπεια, όλα υφίστανται μία επιτάχυνση με κατεύθυνση αντίθετη από αυτήν του πεδίου, λόγω του αρνητικού τους φορτίου. Σύμφωνα με την κβαντομηχανική, δεν υφίστανται αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός επιταχυνόμενου ηλεκτρονίου και των ατόμων σ' ένα τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα. Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα επιταχύνονται καθόλη τη διάρκεια εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου, πράγμα που θα προκαλέσει ένα συνεχώς αυξανόμενο ηλεκτρικό ρεύμα με το χρόνο. Παρόλα αυτά, γνωρίζουμε πως ένα ρεύμα αποκτά μία σταθερή τιμή τη στιγμή της εφαρμογής του πεδίου, υποδεικνύοντας έτσι ότι υπάρχει κάτι που μπορεί να ονομαστεί «δύναμη τριβής» και που αντιτίθεται στην επιτάχυνση που προκαλεί το εξωτερικό πεδίο. Αυτές οι δυνάμεις τριβής προκαλούνται λόγω σκέδασης των ηλεκτρονίων στις ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος, όπως τις δονήσεις των ίδιων των ατόμων του πλέγματος (δηλαδή συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα φωνόνια), καθώς και με τα άτομα των προσμίξεων (συμπεριλαμβανομένων των πλεγματικών κενών, των εξαρμόσεων). Κάθε σκέδαση επιφέρει απώλεια κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων και μεταβολή στη διεύθυνση της κίνησής τους, όπως σχηματικά αναπαριστάται στο σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3. Η διαδρομή ενός ηλεκτρονίου που εκτρέπεται εξαιτίας των σκεδάσεων

Παρόλα αυτά, παρατηρείται μία συνολική κίνηση ηλεκτρονίων με φορά αντίθετη αυτής του πεδίου. Αυτή η κίνηση είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Το φαινόμενο της σκέδασης γίνεται φανερό με τη μορφή αντίστασης στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Διάφοροι παράμετροι χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του μεγέθους αυτής της σκέδασης, ανάμεσα σ' αυτές περιλαμβάνονται η *ταχύτητα μετατόπισης* και η *ευκινησία* των ηλεκτρονίων. Σ' αυτό το σημείο είναι ζωτικό να κατανοηθούν οι έννοιες αυτές. Θα θεωρήσουμε ότι μετά από μία σύγκρουση τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα να επιταχυνθούν ξανά υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Συνεπώς η ταχύτητα των ηλεκτρονίων μεταβάλλεται με το χρόνο. Η δύναμη που ασκείται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια από το ηλεκτρικό πεδίο είναι $-eE$. Η δύναμη αυτή επιταχύνει το ηλεκτρόνιο μεταξύ των σκεδάσεων στην κατεύθυνση του πεδίου, οπότε σύμφωνα με

το θεμελιώδη νόμο της μηχανικής θα έχουμε :

$$v(t) = at = -\frac{eE}{m}t \quad 7.4$$

Αν ο **μέσος ελεύθερος χρόνος** των ηλεκτρονίων ανάμεσα σε δύο διαδοχικές συγκρούσεις είναι τ , τότε η μέση καθαρή (οριακή) ταχύτητα είναι η **ταχύτητα μετατόπισης** ή **ολίσθησης** των ηλεκτρονίων κατά την κίνησή τους μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου,

$$\bar{v} = v_d = -\frac{e\tau}{m}E \quad 7.5$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η **ταχύτητα μετατόπισης** v_d είναι ευθέως ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σύμφωνα με τη σχέση. Δεδομένου ότι η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι n (ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου του υλικού), **η πυκνότητα του ρεύματος** που διαρρέει τον αγωγό είναι:

$$J = -en v_d \quad 7.6$$

Ως εκ τούτου, συνδιάζοντας τις εξ(7.5) και (7.6) έχουμε:

$$J = \frac{ne^2\tau}{m}E \quad 7.7$$

$$\text{ή } J = \sigma E \quad 7.8$$

Η εξ(7.8) είναι φυσικά ο νόμος του Ohm, και η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ προκύπτει ότι είναι:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} = ne\mu, \quad 7.9$$

$$\text{όπου } \mu = \frac{e\tau}{m}$$

Η ποσότητα μ στην εξ(7.9) ονομάζεται **ευκινησία ηλεκτρονίων**. Περιγράφει την ευκολία με την οποία τα ηλεκτρόνια ολισθαίνουν μέσα στο υλικό και είναι μία πολύ σημαντική ποσότητα για το χαρακτηρισμό ημιαγωγικών υλικών.

Στο μοντέλο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των μετάλλων που λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς της κβαντομηχανικής για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, η **μέση ελεύθερη διαδρομή** l_m , ανάμεσα σε γειτονικές σκεδάσεις των ηλεκτρονίων αγωγιμότητα ορίζεται ως

$$\tau_m = \frac{\lambda_m(E_f)}{v_f} \quad 7.10$$

όπου v_f είναι η θερμική ταχύτητα των ηλεκτρονίων στην στάθμη Fermi, γιατί όλες οι συγκρούσεις προϋποθέτουν μόνο ηλεκτρόνια που βρίσκονται, ενεργειακά, κοντά στη στάθμη Fermi και, επομένως, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα στην εξ.(7.9) εξαρτάται από τις τιμές της v_f που είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία και της $\lambda_m(E_f)$ που εξαρτάται από τη θερμοκρασία

$$\sigma = \frac{ne^2 \lambda_m(E_f)}{mv_f} \quad 7.11$$

$$\text{όπου } v_f = \left(\frac{2E_f}{m} \right)^{1/2} \approx 10^5 \text{ m/s} \quad 7.12$$

Οι πειραματικές τιμές της σ έδειξαν ότι η $\lambda_m(E_f)$ έχει τιμές της τάξης μερικών εκατοντάδων Å στη θερμοκρασία δωματίου (για καλούς μεταλλικούς αγωγούς) και πολύ μεγαλύτερες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι τιμές αυτές της $\lambda_m(E_f)$ είναι πολύ μεγαλύτερες από την αναμενόμενη τιμή των 10 Å περίπου, για την περίπτωση των ελαστικών συγκρούσεων των ηλεκτρονίων από τα θετικά ιόντα του κρυστάλλου που προκύπτει από το κλασσικό μοντέλο του Drude. Επισημαίνεται ότι η σχέση 7.10 είναι ακριβής μόνο αν η μέση ταχύτητα v_d που αποκτούν τα ηλεκτρόνια υπό την επίδραση του πεδίου είναι μικρότερη της θερμικής ταχύτητας Fermi v_f των ηλεκτρονίων.

7.4. Πειραματική ηλεκτρική ειδική αντίσταση των μετάλλων

Η καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα των μετάλλων οφείλεται στην υψηλή κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων μέσα στην κρυσταλλική δομή. Κάθε παράγοντας που μεταβάλλει την κανονικότητα της κρυσταλλικής δομής επηρεάζει αρνητικά την κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Οι διάφορες ατέλειες της κρυσταλλικής δομής (όπως σημειακές ατέλειες, εξαρμόσεις, όρια κρυσταλλικών κόκκων κ.ά.) αυξάνουν την πιθανότητα συγκρούσεων μεταξύ των ηλεκτρονίων και των ατελειών, οπότε μειώνεται η μέση ελεύθερη διαδρομή (δηλαδή η μέση απόσταση που διανύουν μεταξύ συγκρούσεων) και ο χρόνος ηρεμίας των ηλεκτρονίων. Συνεπώς μειώνεται η μέση ταχύτητα των ηλεκτρονίων (άρα και η κινητικότητα) και επομένως αυξάνεται η ειδική αντίσταση. Έτσι η προσθήκη ατόμων ξένων στοιχείων σ' ένα μέταλλο αυξάνει την ειδική του αντίσταση. Εάν ένα μεταλλικό υλικό υποστεί ψυχρή κατεργασία, οι κόκκοι παραμορφώνονται και αυξάνεται η πυκνότητα των εξαρμόσεων και επομένως και η ειδική αντίσταση. Τέλος, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός αγωγού, αυξάνεται το πλάτος ταλάντωσης των θετικών ιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος

και επομένως η πιθανότητα συγκρούσεων μεταξύ των ηλεκτρονίων και των φωνονίων με συνέπεια την ελάττωση της μέσης ελεύθερης διαδρομής και συνεπώς αύξηση της ειδικής αντίστασης.

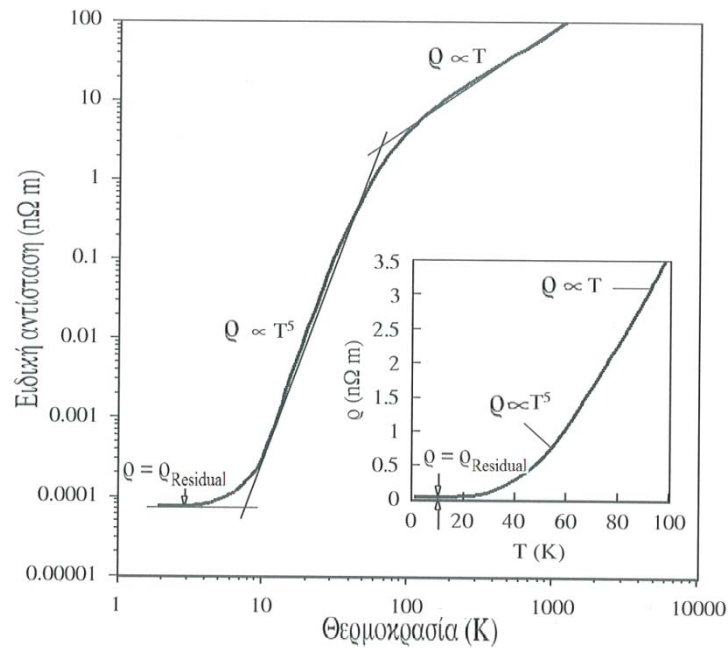
Η μέση ελεύθερη διαδρομή εξαιτίας των σκεδάσεων από τις ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος, $\lambda_{imp.}$, δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ενώ εκείνη που οφείλεται στις σκεδάσεις από τα φωνόνια, $\lambda_{phon.}$, μειώνεται όταν αυξάνει η θερμοκρασία του υλικού. Για το συνδυασμό των δύο αυτών μηχανισμών σκέδασης ηλεκτρονίων η μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας παίρνει τη μορφή

$$\frac{1}{\lambda_m(T)} = \frac{1}{\lambda_{imp.}} + \frac{1}{\lambda_{phon.}(T)} \quad 7.13$$

Η ολική ειδική αντίσταση ενός μετάλλου είναι το άθροισμα της ειδικής αντίστασης του καθαρού με τέλεια κρυσταλλική δομή μετάλλου, $\rho_{phonon}(T)$, (θερμική συνιστώσα της ειδικής αντίστασης) και των επί μέρους αυξήσεων της ειδικής αντίστασης που οφείλονται στους διάφορους τύπους ατελειών, $\rho_{imp.}$

$$\rho_{ολ} = \rho_{phonon}(T) + \rho_{imp.} \quad \text{νόμος του Matthiessen} \quad 7.14$$

Η θερμική συνιστώσα προέρχεται από τις συγκρούσεις μεταξύ των ηλεκτρονίων και δονούμενων θετικών ιόντων (τα άτομα του μετάλλου μετά την απόσπαση των ελεύθερων ηλεκτρονίων μετατρέπονται σε θετικά ιόντα) γύρω από τη θέση ισορροπίας τους στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ο συνδυασμός αυτός μίας ειδικής αντίστασης που εξαρτάται από την T , αλλά είναι ανεξάρτητη από την καθαρότητα του μεταλλικού υλικού, $\rho(T)$, και μίας ειδικής αντίστασης που είναι ανεξάρτητη από την T , αλλά εξαρτάται από την καθαρότητα και την κρυσταλλική τελειότητα του υλικού, $\rho_{imp.}$, είναι γνωστός ως νόμος του Matthiessen. Στο σχήμα 7.4 απεικονίζεται η ρ του χαλκού από τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μέχρι τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες (κοντά στη θερμοκρασία τήξης ~ 1358 K). Το διάγραμμα είναι λογαριθμικό. Πάνω από τους 120 K, η $\rho \propto T$, ενώ στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες η $\rho \propto T^5$ για να πλησιάσει τελικά την παραμένουσα ειδική αντίσταση $\rho_{residual}$. Το ένθετο σχήμα απεικονίζει τη σχέση του ρ με την T κάτω από τους 100 K σε γραμμικό διάγραμμα (η $\rho_{residual}$ είναι πολύ μικρή).

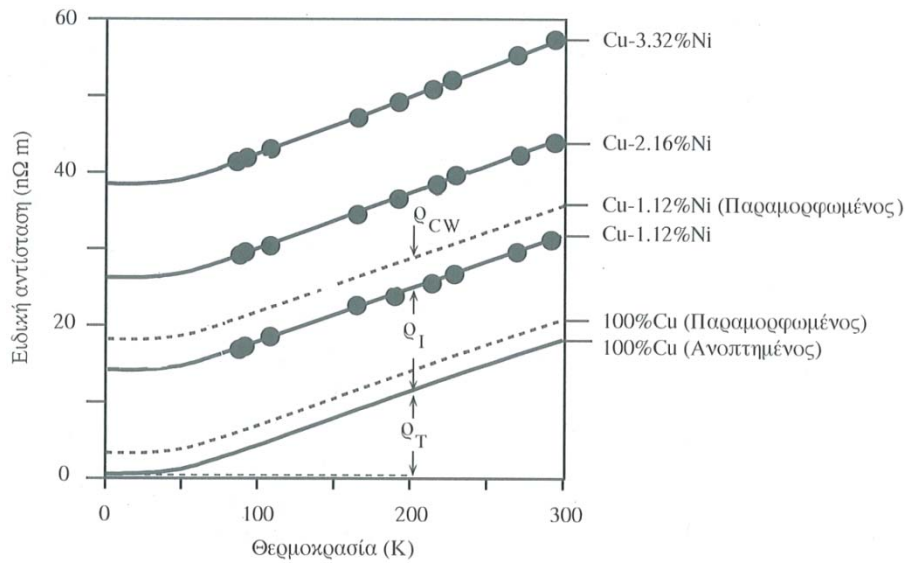


Σχήμα 7.4. Ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μεταλλικού Cu (πειραματικές τιμές), όπου φαίνεται η συμπεριφορά που είναι σύμφωνη με τον κανόνα του Matthiessen.

1) *Εξάρτηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις ξένες προσμίξεις.* Η ειδική αντίσταση των μετάλλων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες παίρνει μία οριακή τιμή μεγαλύτερη του μηδενός (σχήμα 7.5) και ονομάζεται παραμένουσα αντίσταση. Κοντά στο απόλυτο μηδέν το πλάτος δόνησης των θετικών ιόντων του πλέγματος μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα η κίνηση των ηλεκτρονίων να μην επηρεάζεται από τα δονούμενα θετικά ιόντα. Η παραμένουσα αντίσταση οφείλεται στις κρυσταλλικές ατέλειες. Για στερεά μεταλλικά διαλύματα, που προκύπτουν με προσθήκη σ' ένα καθαρό μέταλλο ατόμων μίας πρόσμιξης, η $(\rho_d)_i$ δίνεται από τη σχέση :

$$\rho_d = b_{AB} x(1-x) \quad 7.15$$

όπου b_{AB} είναι σταθερά που περιγράφει την επίδραση της πρόσμιξης B στο βασικό μέταλλο A και x η περιεκτικότητα της πρόσμιξης εκφρασμένη σε γραμμοατομικό κλάσμα. Στο σχήμα 7.5 δίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας της πρόσμιξης νικελίου στην ειδική αντίσταση του κράματος (στερεού διαλύματος) χαλκού-νικελίου (Cu-Ni). Το ίδιο σχήμα δείχνει την επίδραση της ψυχρής κατεργασίας στην αγωγιμότητα μίας σειράς κραμάτων Cu-Zn. Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης λόγω της ψυχρής κατεργασίας σχετίζεται με την αύξηση της πυκνότητας των εξαρμόσεων που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πλαστικής παραμόρφωσης.



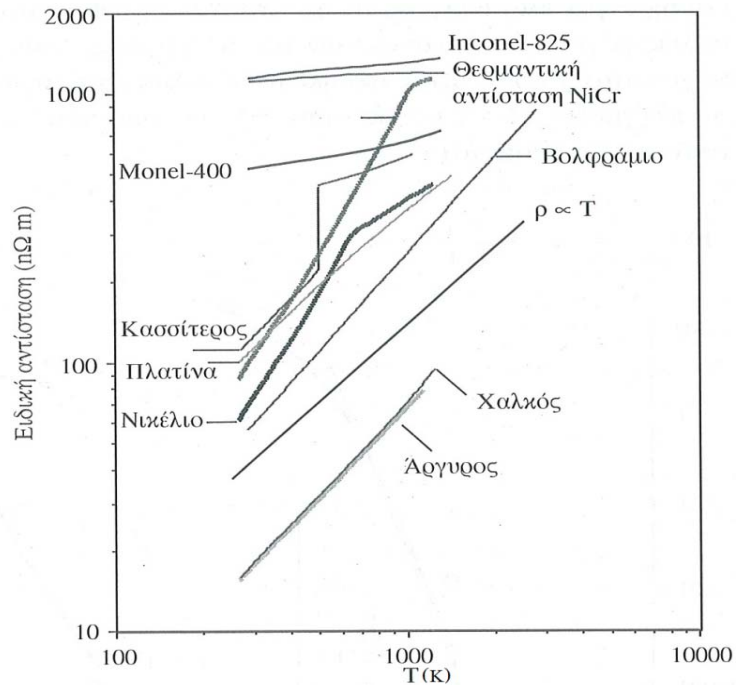
Σχήμα 7.5. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση συναρτήσει της θερμοκρασίας για το χαλκό και κράματα χαλκού-νικελίου, ένα από αυτά έχει παραμορφωθεί.

2) Εξάρτηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τη θερμοκρασία.

Για τα περισσότερα μέταλλα και για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των -200°C η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με τη θερμοκρασία, με εξαίρεση τα μαγνητικά υλικά το σίδηρο και το νικέλιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6 και ακολουθεί τη σχέση :

$$\rho_T = \rho_{0C}(1 + \alpha T) \quad 7.16$$

όπου ρ_{0C} είναι η ειδική αντίσταση στους 0°C , α_T είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής ειδικής αντίστασης (*temperature coefficient resistance, TCR*), χαρακτηριστικός του κάθε μετάλλου και T είναι η θερμοκρασία του μετάλλου σε $^{\circ}\text{C}$. Για το κράμα Ni-Cr η ειδική αντίσταση εξαρτάται κυρίως από την παραμένουσα αντίσταση, και επομένως η ειδική αντίσταση ελάχιστα εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Τα κράματα αυτά έχουν πολύ μικρό θερμοκρασιακό συντελεστή ειδικής αντίστασης. Στα μαγνητικά (καθαρά) υλικά, π.χ. Fe τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας δεν σκεδάζονται μόνο λόγω των ταλαντώσεων του πλέγματος, όπως συμβαίνει π.χ. στο Cu, αλλά αλληλεπιδρούν μαγνητικά με τα ιόντα του πλέγματος και έτσι παρουσιάζουν πιο σύνθετη εξάρτηση από την T .



Σχήμα 7.6. Η ειδική αντίσταση συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορα μέταλλα (ο κασσίτερος τήκεται στους 505K, ενώ το νικέλιο και ο σίδηρος μεταβαίνουν από τη μαγνητική στη μη μαγνητική κατάσταση (Curie) στους 627 και 1043K, αντίστοιχα).