

# Κεφάλαιο 11

## Υπεραγώγιμα υλικά

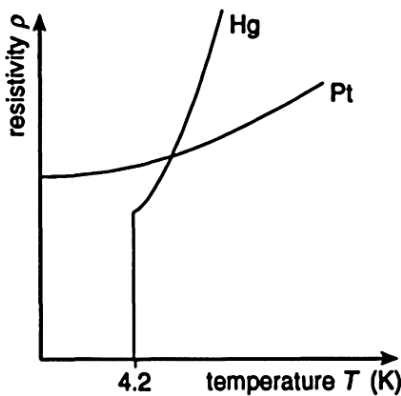
Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε την υπεραγωγιμότητα που συμπεριλαμβάνει την περιγραφή των βασικών παρατηρήσεων του φαινομένου και τις πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές του. Θα συζητήσουμε την εφαρμογή της υπεραγωγιμότητας σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες τα υπεραγώγιμα πηνία, τα υπεραγώγιμα μαγνητόμετρα (SQUIDS) και τις υπεραγώγιμες λογικές διατάξεις. Θα εξηγήσουμε την εκτροπή της μαγνητικής ροής και το φαινόμενο Meissner σε έναν υπεραγωγό και σε σχέση με τις διαφορές μεταξύ των υπεραγωγών τύπου I και τύπου II. Το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας θα συζητηθεί σαν η ασυνεχής μείωση της αγωγιμότητας σε μια κατάσταση όπου η αντίσταση dc είναι μηδέν. Θα δειχθεί επίσης ότι η κατάσταση μηδενικής αντίστασης δεν είναι ικανοποιητική για την εξήγηση του φαινομένου Meissner, όπου η μαγνητική επαγωγή δεν εισέρχεται καθόλου μέσα στο υπεραγώγιμο υλικό. Έτσι, δείχνονται συνθήκες και καταστάσεις του υλικού που εξηγούν την παρουσία της υπεραγωγιμότητας.

### 11.1 Κβαντικά φαινόμενα στην ηλεκτρική αγωγιμότητα

Με τον όρο κβαντική ηλεκτροδυναμική εννοούμε την ηλεκτρονική συμπεριφορά στην παρουσία κβαντικών φαινομένων. Βέβαια, όλα τα ηλεκτρονικά φαινόμενα είναι κβαντικά. Αυτό σημαίνει ότι όταν θα αναφερόμαστε στην κβαντική ηλεκτροδυναμική θα το κάνουμε όταν η κλασική πρόβλεψη δεν μπορεί να αντιμετωπίσει το θέμα που μελετούμε, γεγονός που σημαίνει ότι η κβαντική ηλεκτροδυναμική εισάγει μια άλλη οπτική γωνία στη μελέτη μας. Η υπεραγωγιμότητα, που είναι η ξαφνική και απόλυτη απώλεια αντίστασης σε μερικά υλικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι ένα κβαντικό φαινόμενο που δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κλασική θεωρία. Στην ανάλυσή μας θα ασχοληθούμε με τη μελέτη αλλά και τις εφαρμογές του. Στην πράξη, υπάρχουν τρεις εφαρμογές: Οι υπεραγώγιμοι μαγνήτες, οι υπεραγώγιμοι ανιχνευτές (SQUIDS) και υπεραγώγιμες διατάξεις για ηλεκτρονικές εφαρμογές. Βέβαια, υπάρχουν και άλλες εφαρμογές που εμπεριέχουν και τους ανιχνευτές φωτός.

#### 11.1.1 Μείωση της αντίστασης με τη θερμοκρασία

Η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε αρχικά από τον Kamerlingh Onnes στον υδράργυρο το 1911. Το μέταλλο επέδειξε μια απότομη μείωση στην αντίστασή του στους 4.2K όπως δείχνεται στο **Σχήμα 11.1**. Το γεγονός ότι η αντίστασή του ήταν πολύ μικρή, μικρότερη από  $10^{-25}\Omega$ , είναι μια αναγκαία αλλά όχι ικανοποιητική συνθήκη της ύπαρξης υπεραγωγιμότητας. Φυσικά, η μείωση της αντίστασης με τη μείωση της θερμοκρασίας είναι αναμενόμενη λόγω της μείωσης των ταλαντώσεων του πλέγματος, η μείωση των οποίων οδηγεί στη μείωση των σκεδάσεων ηλεκτρονίων με φωνόνια. Όμως, οι σκεδάσεις με προσμείξεις θα έπρεπε να συνεχίζονταν ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και κατά συνέπεια η ενδογενής αντίσταση θα συνέχιζε να μειώνεται ομαλά συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με την κλασική θεωρία. Αυτό παρατηρείται όντως στα μέταλλα. Στα υπεραγώγιμα υλικά όμως, παρατηρείται μια απότομη αλλαγή στην καμπύλη αντίστασης-θερμοκρασίας, γεγονός που δηλώνει μια αλλαγή φάσης στο υλικό. Αυτή η αλλαγή δεν μπορεί να εξηγηθεί από την κλασική θεωρία και χρειάζεται μια άλλη εξήγηση.



**Σχήμα 11.1** Μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας στον υδράργυρο και στον λευκόχρυσο. Η μεταβολή φάσης του υδράργυρο αρχίζει στους 4.2K περίπου καθώς το υλικό ψύχεται. Στον λευκόχρυσο που παρουσιάζει κανονική συμπεριφορά, η συνεισφορά στην αντίσταση περιλαμβάνει σκεδάσεις προσμίξεων που ισοδυναμεί με την αντίσταση στο απόλυτο μηδέν και σκεδάσεις φωνονίων που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

### 11.1.2 Η υπεραγωγιμότητα

Υπάρχουν δύο βασικά κριτήρια για τον ορισμό της εμφάνισης της υπεραγωγιμότητας:

- Η απόλυτη εξαφάνιση της αντίστασης κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$ .
- Η μη είσοδος των μαγνητικών γραμμών στο υπεραγωγό, που είναι το φαινόμενο Meissner.

Η πρώτη συνθήκη σημαίνει ότι ηλεκτρικό ρεύμα πολύ μεγάλης πυκνότητας μπορεί να ρέει το υλικό με την παρουσία πολύ μικρής τάσης. Μια λεπτομερέστερη παρατήρηση μας λέει ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή μαγνητικού πεδίου  $H_c$  πάνω από την οποία το υλικό γίνεται «κανονικό». Αυτό το κρίσιμο πεδίο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και γίνεται μηδέν στην κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$ .

### 11.1.3 Η φύση της υπεραγώγιμης μεταβολής φάσης

Η ύπαρξη της υπεραγωγιμότητας οδηγεί σε μερικές δραματικές μεταβολές των ιδιοτήτων των υλικών, οι σημαντικότερες από τις οποίες δίνονται στη συνέχεια:

- Εμφανίζεται μια συνεχής μεταβολή στην αντίσταση.
- Στην υπεραγώγιμη φάση υπάρχει ένας διαφορετικός μηχανισμός αγωγιμότητας.
- Οι ac απώλειες, δηλαδή τα δινορρεύματα, συνεχίζουν να υπάρχουν, αν και δεν υπάρχουν απώλειες dc.
- Η αντίσταση είναι περίπου 13 τάξεις μεγέθους μικρότερη σε σύγκριση με την αντίσταση ενός υπερ-καθαρού μετάλλου. Η αντίσταση ενός υπεραγώγιμου υλικού είναι της τάξης των  $10^{-25}\Omega m$ , ενώ σε χαλκό υπερευψηλής καθαρότητας η αντίσταση είναι της τάξης των  $10^{-12}\Omega m$  και στον απλό χαλκό είναι της τάξης των  $10^{-8}\Omega m$ .
- Υπάρχει μια κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  πάνω από την οποία το υλικό επανέρχεται στην κανονική αγωγή συμπεριφορά του.
- Υπάρχει ένα κρίσιμο πεδίο  $H_c$  πάνω από το οποίο το υλικό επανέρχεται στην κανονική αγωγή συμπεριφορά του.

- Υπάρχει μια κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος πάνω από την οποία το υλικό επανέρχεται στην κανονική αγώγιμη συμπεριφορά του.

Το κρίσιμο πεδίο  $H_c$  και η κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  συσχετίζονται με την παρακάτω σχέση:

$$H_c = H_0 \left( 1 - \frac{T^2}{T_c^2} \right) \quad (11.1)$$

Κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  το υλικό έχει μηδενική αντίσταση εκτός και αν ξεπεραστεί η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος που θα αναγκάσει το υλικό να επανέλθει στην κανονική αγώγιμη συμπεριφορά του.

## 11.2 Οι θεωρίες της υπεραγωγιμότητας

Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί τρεις βασικές θεωρίες για την υπεραγωγιμότητα: το φαινομενολογικό μοντέλο των δύο υγρών των Gorter και Casimir, τη μαθηματική ηλεκτροδυναμική θεωρία των London και London και η θεωρία ζευγών ηλεκτρονίων των Barden, Cooper και Schrieffer που αποτελεί τη βασική μικροσκοπική θεωρία, δηλαδή κβαντική εξήγηση της υπεραγωγιμότητας. Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητήσουμε μόνο αυτήν την τελευταία θεωρία.

Σε κανονικά μέταλλα, το κάθε ηλεκτρόνιο σκεδάζεται με προσμείξεις και με φωνόνια. Αυτό προκαλεί την αντίσταση του υλικού στη διέλευση των ηλεκτρονίων που οδηγεί στη μακροσκοπική αντίσταση, όπως συζητήθηκε στο κεφάλαιο 2. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τα ηλεκτρόνια με ενέργειες γύρω από την ενέργεια Fermi τα οποία είναι και τα ηλεκτρόνια που συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα, μπορούν να συζευχθούν. Η σύζευξη αυτή αλλάζει τις ενέργειές τους και οδηγεί σε ένα υπεραγώγιμο ενεργειακό διάκενο. Στη θεωρία αυτή, τα ηλεκτρόνια ζευγαρώνουν με αντίθετο spin και με αντίθετους κυματάριθμους, που έχει σαν αποτέλεσμα μηδενικό spin αλλά και ροπή. Με άλλα λόγια, αυτό το ζεύγος δεν υφίσταται σκέδαση διότι ο συνδυασμένος κυματάριθμος είναι μηδέν και κατά συνέπεια το μήκος κύματος μηδέν. Έτσι, αυτό το ζεύγος ηλεκτρονίων μεταδίδεται μέσα από το υλικό χωρίς σκεδάσεις σαν ένα ενδογενές ζεύγος. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα φωνόνια και οι προσμείξεις είναι τόσο ασθενείς που δεν μπορούν να υποστούν σκέδαση με τα ηλεκτρόνια. Έτσι το ηλεκτρικό ρεύμα όταν ξεκινά συνεχίζει να μεταδίδεται κατά μήκος του υλικού χωρίς αντίσταση.

### 11.2.1 Συνθήκες εμφάνισης της υπεραγωγιμότητας

Μια προϋπόθεση για την εμφάνιση της υπεραγωγιμότητας είναι η μεγάλη αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων και φωνονίων στο πλέγμα. Με αυτό τον τρόπο τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να συζευχθούν έμμεσα, διά μέσου αυτής της αλληλεπίδρασης φωνονίων, σε υπεραγώγιμα «ζεύγη Cooper». Η αλλαγή της ενέργειας που συνδέεται μ' αυτή τη σύζευξη είναι της τάξης των  $10^{-3}eV$  και δίνει ένα διάκενο υπεραγωγιμότητας στο επίπεδο Fermi.

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, οι ταλαντώσεις του πλέγματος αρχίζουν να γίνονται σημαντικές και να επηρεάζουν την αλληλεπίδραση των συζευγμένων ηλεκτρονίων μέχρι την κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  όπου οι ταλαντώσεις του πλέγματος καταστρέφουν εντελώς την ηλεκτρονική σύζευξη. Έτσι, τα υπεραγώγιμα ηλεκτρόνια μετατρέπονται στην κανονική τους κατάσταση. Η θερμική ενέργεια που χρειάζεται τα αποζεύξει τα ηλεκτρόνια είναι της ίδιας

τάξης μεγέθους με το υπεραγώγιμο διάκενο. Ένα διάκενο της τάξης των  $10^{-3}\text{eV}$  δίνει μια κρίσιμη θερμοκρασία μερικών βαθμών K, που είναι η τυπική για μια σειρά υπεραγώγιμων υλικών όπως δείχνεται στον **Πίνακα 11.1**.

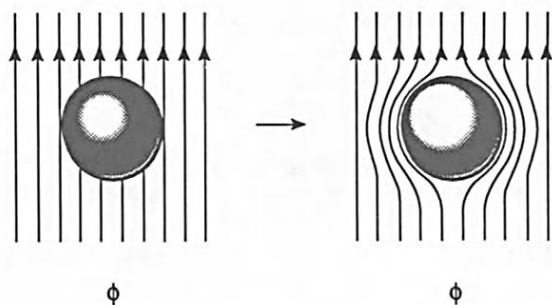
Έτσι, μπορούμε να δούμε ότι η υπεραγώγιμη κατάσταση καταστρέφεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Ακόμη, δεδομένου του γεγονότος ότι η ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και πλέγματος είναι προϋπόθεση για την εμφάνιση της υπεραγωγιμότητας, προκύπτει ότι σε μέταλλα όπως ο χαλκός, ο άργυρος και ο χρυσός που είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και κατά συνέπεια τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητάς τους έχουν ασθενείς δεσμούς με το πλέγμα και τις σκεδάσεις φωνονίων, δεν μπορούν να παρουσιάσουν υπεραγωγιμότητα.

Υλικό	Κρίσιμη θερμοκρασία $T_c$ (K)	Κρίσιμο πεδίο $H_0$ ( $\text{k A m}^{-1}$ )
Αλουμίνιο	1.2	7.9
Κάδμιο	0.5	2.4
Ίνδιο	3.4	22
Μόλυβδος	7.2	64
Υδράργυρος	4.2	33
Νιόβιο	9.3	Τύπος II
Ταντάλιο	4.5	66
Κασσίτερος	3.7	24
Ψευδάργυρος	0.9	4.2
Ζιρκόνιο	0.8	3.7

**Πίνακας 11.1** Κρίσιμες θερμοκρασίες και πεδία σε υπεραγώγιμα στοιχεία.

### 11.2.2 Το φαινόμενο Meissner

Όταν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε έναν υπεραγωγό παρουσιάζει το φαινόμενο της καταστροφής της υπεραγωγιμότητας πάνω από μια κρίσιμη τιμή πεδίου, όπως προαναφέραμε. Αυτό προκαλείται όταν η ένταση του πεδίου είναι αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα να ανεβάζει τις ενεργειακές στάθμες που συσχετίζονται με την κατάσταση υπεραγωγιμότητας πάνω απ' αυτές των κανονικών συνθηκών. Στην περίπτωση αυτή το υλικό θα επανέλθει ξανά στην προηγούμενη κανονική κατάσταση αντίστασης. Σε χαμηλότερες εντάσεις πεδίου το υπεραγώγιμο υλικό μπορεί να αποτρέψει τις μαγνητικές γραμμές να το διαπερνούν, φαινόμενο που είναι γνωστό ως φαινόμενο Meissner. Αυτό το φαινόμενο δείχνεται στο **Σχήμα 11.2**.



**Σχήμα 11.2** Διάγραμμα που δείχνει το φαινόμενο Meissner σε ένα υλικό που περνά από την κανονική στην υπεραγώγιμη κατάσταση.

Στην περίπτωση αυτή τα υπεραγώγιμα ηλεκτρόνια δημιουργούν κυκλικά δινορρέυματα στην επιφάνεια του υπεραγωγού που αντιδρούν στο εξωτερικώς επιβαλλόμενο

πεδίο και έτσι μηδενίζουν εντελώς λόγω μηδενικής αντίστασης το πεδίο μέσα στον υπεραγωγό. Σε μερικούς υπεραγωγούς, που είναι γνωστοί σαν υπεραγωγοί Τύπου II, υπάρχει επίσης μια κατάσταση κατά την οποία για μεσαίες τιμές της έντασης του πεδίου, οι μαγνητικές γραμμές διαπερνούν τοπικές περιοχές του υπεραγωγού. Αυτή η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιείται διά μέσου «μαγνητικών σωλήνων» κανονικού, μη υπεραγωγίμου υλικού που έχει τοποθετηθεί μέσα στο υπεραγωγίμο υλικό. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται κατάσταση μείξης.

### 11.2.3 Υπεραγωγοί Τύπου I και II

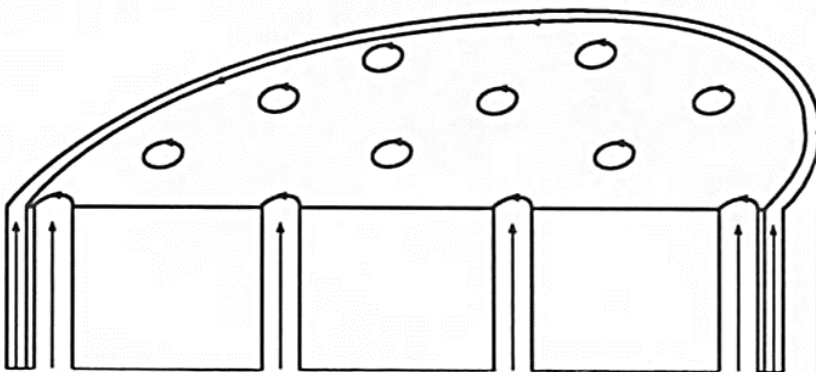
Οι υπεραγωγοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες με κριτήριο τη μετάβασή τους στην υπεραγωγίμη κατάσταση με την παρουσία μαγνητικού πεδίου. Αυτές οι καταστάσεις είναι γνωστές ως υπεραγωγοί Τύπου I και II.

Οι Υπεραγωγοί Τύπου I παρουσιάζουν μόνο δύο φάσεις: την κανονική και την υπεραγωγίμη. Η μετάβαση μεταξύ των δύο φάσεων είναι πολύ απότομη και συμβαίνει στην απουσία ενός κρίσιμου μαγνητικού πεδίου. Οι περισσότεροι υπεραγωγοί τύπου I είναι καθαρά μέταλλα.

Οι Υπεραγωγοί Τύπου II παρουσιάζουν συμπληρωματικά και μια ακόμη φάση που είναι γνωστή ως κατάσταση μείξης. Αυτή η κατάσταση παρουσιάζεται σε εντάσεις μαγνητικού πεδίου  $H_{c1}$  που είναι η κρίσιμη τιμή πεδίου για τη μεταφορά από την κατάσταση ελεύθερης ροής ή κατάσταση Meissner στην κατάσταση μείξης και την  $H_{c2}$  που είναι η κρίσιμη τιμή πεδίου για τη μεταφορά από την κατάσταση μείξης στην κανονική κατάσταση. Σ' αυτή την ενδιάμεση κατάσταση το υλικό είναι δομημένο σαν κυψέλη μελιού κανονικού υλικού μέσα σε υπεραγωγίμη θάλασσα. Οι μαγνητικές γραμμές που δεν μπορούν να διεισδύσουν το υπεραγωγίμο υλικό εξαιτίας του φαινομένου Meissner μπορούν να εισέλθουν μέσα από το κανονικό υλικό. Κάθε «κυψελωτός σωλήνας» κανονικού - μη υπεραγωγίμου - υλικού μεταφέρει ένα κβάντο μαγνητικής ροής  $2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$ .

Οι περισσότεροι υπεραγωγοί τύπου II είναι κράματα. Η διάταξη των μη υπεραγωγίμων κυψελωτών σωλήνων δίνεται στο **Σχήμα 11.3**. Οι σωληνωτές περιοχές είναι εκείνες που τα κβάντα μαγνητικής ροής εισέρχονται κάθετα στην επιφάνεια, διά μέσου του μη υπεραγωγίμου υλικού.

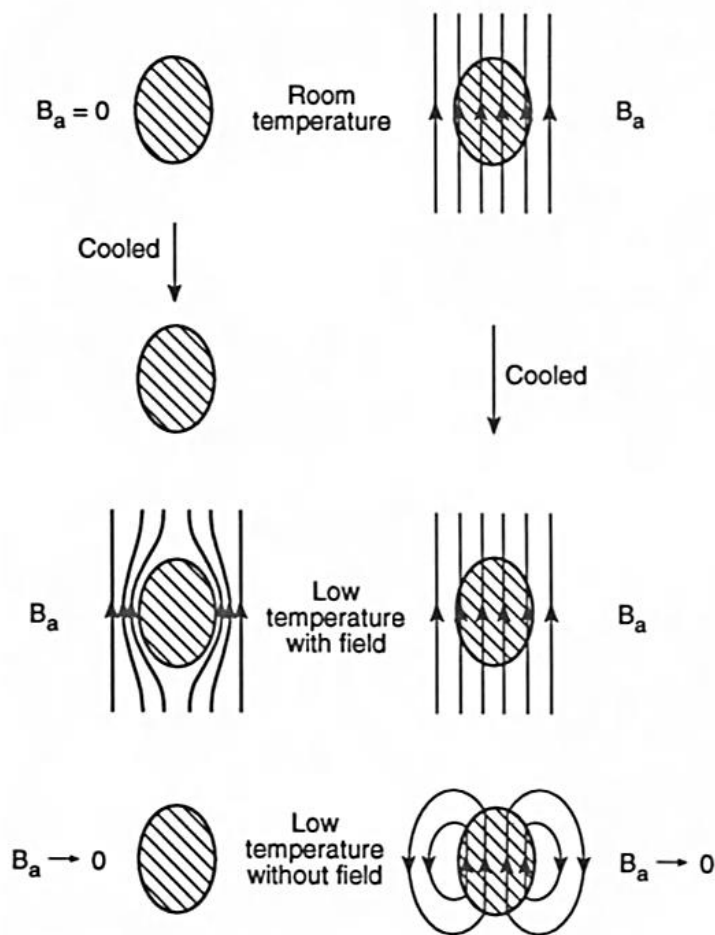
Η χρησιμότητα των υπεραγωγών τύπου II έγκειται στην επέκταση του εύρους του μαγνητικού πεδίου πάνω από την οποία μπορεί να εμφανιστεί υπεραγωγιμότητα.



**Σχήμα 11.3** Η διάταξη των μη υπεραγωγίμων κυψελωτών περιοχών που είναι εκείνες που τα κβάντα μαγνητικής ροής εισέρχονται κάθετα στην επιφάνεια, διά μέσου του μη υπεραγωγίμου υλικού.

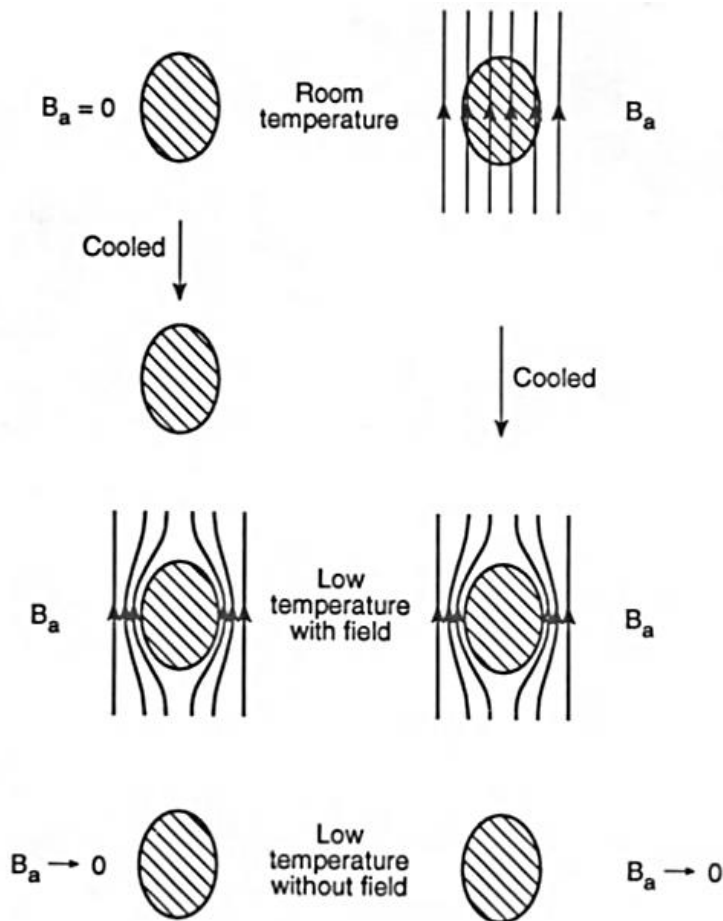
### 11.2.4 Συγκέντρωση και αποκλεισμός μαγνητικής ροής

Για μερικά χρόνια μετά την ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας, είχε θεωρηθεί ότι η συμπεριφορά ενός τέτοιου υλικού στην παρουσία μαγνητικού πεδίου θα ήταν όπως δείχνεται στο **Σχήμα 11.4**. Δηλαδή, τα υπερρεύματα θα απαγόρευαν κάθε αλλαγή μαγνητικής ροής διά μέσου του υλικού, διότι εξαιτίας του νόμου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής των Faraday - Lenz θα δημιουργούσαν επαγόμενα ρεύματα αντίδρασης. Σε έναν τέλειο αγωγό, αυτό το επαγόμενο ρεύμα θα έπρεπε να αναπτύσσει αντίθετη αλλαγή ροής που θα αντιδρούσε στην αλλαγή ροής που το προκαλούσε.



**Σχήμα 11.4** Διάγραμμα που δείχνει την αναμενόμενη, σύμφωνα με την κλασική θεωρία, συμπεριφορά ενός τέλειου αγωγού στην παρουσία μαγνητικού πεδίου.

Αυτή η θεωρία διαφωνούσε με την επόμενη θεωρία των Meissner και Ochsenfeld. Η νέα θεωρία υποστήριζε ότι μέσα στον υπεραγωγό όταν αυτός βρίσκεται στην υπεραγώγιμη κατάσταση βρίσκουμε ότι η μαγνητική ροή είναι μηδέν, εκτός από μια οριακή λεπτή ζώνη στην επιφάνειά του, όπως δείχνεται στο **Σχήμα 11.5**. Σημειώνουμε ότι αυτή η κατάσταση δεν αντιστοιχεί στην κατάσταση μείξης των υπεραγωγών Τύπου II εξαιτίας της παρουσίας του μη υπεραγώγιμου υλικού. Το φαινόμενο Meissner όμως, δείχνει ότι η υπεραγώγιμη κατάσταση είναι κάτι περισσότερο από απλά μια κατάσταση με τέλεια αγωγιμότητα, διότι η εξαίρεση της διέλευσης των μαγνητικών γραμμών από το υλικό είναι μια συμπληρωματική ιδιότητα την οποία ένα μη-υπεραγώγιμο υλικό δεν θα παρουσίαζε.



Σχήμα 11.5 Συμπεριφορά ενός υπεραγωγού κατά Meissner (σύγκρινε με το Σχήμα 11.4).

### 11.2.5 Επιφανειακά ρεύματα και το φαινόμενο Meissner

Όταν ένας υπεραγωγός ψύχεται στην παρουσία μαγνητικού πεδίου, τότε στην κρίσιμη θερμοκρασία αναπτύσσονται επιφανειακά ρεύματα στην επιφάνεια του που αναιρούν το αίτιο που τα δημιούργησε, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο. Τα υπερρεύματα επιφάνειας καθορίζονται μόνο από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

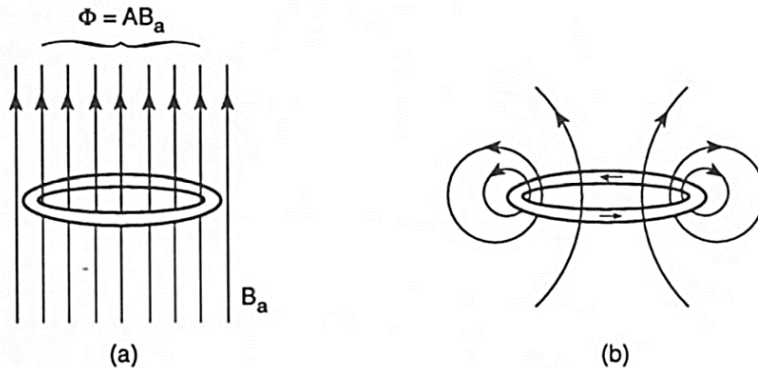
Η παρουσία των ρευμάτων επιφάνειας όταν ψύχεται ένα υπεραγωγίμο υλικό στη μεταβατική κατάσταση εξηγείται από την αναγκαιότητα να μην απειριστούν. Έτσι, αναπτύσσονται μόνο μέχρι ενός συγκεκριμένου βάθους. Στην πράξη τα υπερρεύματα αποσβένονται εκθετικά συναρτήσει του βάθους και αυτό σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο διεισδύει μέχρι ενός βάθους μέσα στο υλικό. Αυτό εκφράζεται από το βάθος διείσδυσης  $\lambda$ . Μερικές τυπικές τιμές του βάθους διείσδυσης  $\lambda$  σε διάφορους υπεραγωγούς δίνονται στον Πίνακα 11.2.

Υλικό	Βάθος διείσδυσης $\lambda(10^{-8} \text{ m})$
Αλουμίνιο	1.6
Κάδμιο	11
Μόλυβδος	3.7
Νιόβιο	3.9
Κασσίτερος	3.4

Πίνακας 11.2 Τυπικές τιμές του βάθους διείσδυσης  $\lambda$  σε διάφορους υπεραγωγούς.

### 11.2.6 Παγίδευση ροής σε ένα υπεραγώγιμο κύκλωμα

Γνωρίζουμε ότι το φαινόμενο Meissner, οδηγεί στον αποκλεισμό της μαγνητικής ροής μέσα από το σώμα ενός υπεραγώγιμου υλικού. Ένα συσχετιζόμενο φαινόμενο είναι η παγίδευση μαγνητικής ροής διά μέσου ενός υπεραγώγιμου κυκλώματος, όπως δείχνεται στο **Σχήμα 11.6**.



**Σχήμα 11.6** Παγίδευση μαγνητικής ροής με ένα κλειστό υπεραγώγιμο κύκλωμα, (a) Ροή πεδίου σε μη υπεραγώγιμο υλικό, (b) Ροή πεδίου όταν το υλικό γίνει υπεραγώγιμο.

Αν έχουμε ένα υπεραγώγιμο τοροειδές διαρρέομενο από μια ροή  $\Phi$ , τότε η ροή που το διαπερνά δεν μπορεί να αλλάξει. Η εξήγηση βρίσκεται στον νόμο των Faraday - Lenz περί ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που αναφέρει ότι κάθε αλλαγή της ροής που εισέρχεται σε ένα κύκλωμα,  $d\Phi/dt$ , δημιουργεί ένα αντίθετο ρεύμα, που αντιδρά στο αίτιο που το προκάλεσε. Στην περίπτωση του υπεραγωγού αυτό το ρεύμα προκαλεί μια ροή που αντιδρά επακριβώς με την αλλαγή ροής που το δημιούργησε. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας του SQUID (superconducting quantum interference device), που χρησιμοποιείται για να μετρήσει αλλαγές μαγνητικού πεδίου με ιδιαίτερα μεγάλη ευαισθησία της τάξης των fT.

### 11.3 Οι υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών

Η ερευνητική δουλειά στους υπεραγωγούς αυξήθηκε πολύ με την εφεύρεση υλικών που είναι υπεραγωγοί σε θερμοκρασίες πάνω από 77K. Μέχρι το 1986, η υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία για υπεραγωγούς ήταν 23.2K στο  $Nb_3Ge$ , ενώ τα προηγούμενα 75 χρόνια η αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας ήταν ιδιαίτερα αργή.

Οι ραγδαίες εξελίξεις στην υπεραγωγιμότητα άρχισαν με τους Bednorz και Muller που ανακάλυψαν ότι η ένωση La-Ba-Cu-O ήταν υπεραγώγιμη στους 30K. Μέσα σε ένα χρόνο, βρέθηκε ότι το υλικό Y-Ba-Cu-O είχε κρίσιμη θερμοκρασία 95K και σε δύο χρόνια βρέθηκε ότι ο υλικός Tl-Ba-Cu-O είχε κρίσιμη θερμοκρασία 125K. Αυτές οι ανακαλύψεις είχαν μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον διότι αύξησαν την πιθανότητα της κατασκευής υπεραγωγού σε θερμοκρασία δωματίου. Επίσης, αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον σε δύο επιστημονικές περιοχές: (1) ανάπτυξη νέων υπεραγώγιμων συστημάτων και (2) θεωρητική εξήγηση του μηχανισμού υπεραγωγιμότητας σ' αυτούς τους υπεραγωγούς.

Όμως, υπήρχαν και μερικά μειονεκτήματα σ' αυτά τα υλικά, διότι είναι πολύ εύθραυστα μετά την τελική θερμική τους προετοιμασία και έχουν δυστυχώς αρκετά χαμηλή κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος. Είναι βέβαιο ότι στο άμεσο μέλλον θα βρεθούν λύσεις στα προβλήματα που αναφέρθηκαν αλλά προς στιγμήν τουλάχιστον βρίσκουν εφαρμογές σε συγκεκριμένες



ηλεκτρονικές διατάξεις. Για παράδειγμα, οι υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών είναι ήδη εμπορικά έτοιμοι στη μορφή λεπτών υμενίων για τη χρήση τους ως αισθητήρων SQUID και μικροκυματικών διατάξεων, που και οι δύο αφορούν εφαρμογές χαμηλής ισχύος.

Ίσως, το ανανεωμένο ενδιαφέρον για την υπεραγωγιμότητα να οδηγήσει στην ανακάλυψη-εφεύρεση πιο πρακτικών υπεραγωγών υψηλών θερμοκρασιών. Αυτό ο στόχος θα είναι μια πραγματική επανάσταση. Τη στιγμή αυτή υπάρχουν ερευνητικές συνεργασίες μεγάλης κλίμακας για την εφαρμογή τέτοιων διατάξεων σε βιομηχανικά υλικά.

Όπως προαναφέρθηκε στους νέους κεραμικούς υπεραγωγούς υψηλών θερμοκρασιών το χαμηλό κρίσιμο ρεύμα παραμένει ακόμη ένα πρόβλημα. Σε υλικά όπως το La-Ba-Cu-O για παράδειγμα, η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος είναι  $1.5\text{kAcm}^{-2}$  ενώ σε υλικά όπως το Nb-Zn είναι  $10\text{MA cm}^{-2}$ . Όμως, στα υλικά αυτά το κρίσιμο πεδίο είναι αρκετά μεγάλο. Έχει εκτιμηθεί ότι το δεύτερο κρίσιμο πεδίο μεταξύ της φάσης μείξης και της μη υπεραγώγιμης κατάστασης είναι της τάξης των  $3\text{MOe}$  ή των  $300\text{T}$ , που είναι τόσο μεγάλη που δεν μπορεί να μετρηθεί με τα σημερινά μετρητικά συστήματα μέτρησης μαγνητικού πεδίου. Μια χρήσιμη κατάληξη αυτού του συμπεράσματος είναι ότι δεν έχει βρεθεί μέχρι στιγμής μια συσχέτιση μεταξύ των κρίσιμων πεδίων και της κρίσιμης πυκνότητας ρεύματος αυτών των υλικών.

## 11.4 Εφαρμογές των υπεραγωγών

Οι βασικές εφαρμογές των υπεραγωγών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές περιοχές:

- Γεννήτριες υψηλών μαγνητικών πεδίων με τη χρήση υπεραγώγιμων σωληνοειδών, για παράδειγμα σε αποτύπωση μαγνητικού συντονισμού (MRI).
- Ανίχνευση υψηλής διακριτικότητας μαγνητικής ροής χρησιμοποιώντας μαγνητόμετρα με την αρχή της διάταξης υπεραγώγιμης κβαντικής αλληλεπίδρασης (Superconducting Quantum Interference Device - SQUID).
- Μικρές ηλεκτρονικές διατάξεις χαμηλής ενέργειας που στηρίζονται βασικά στο φαινόμενο Josephson.

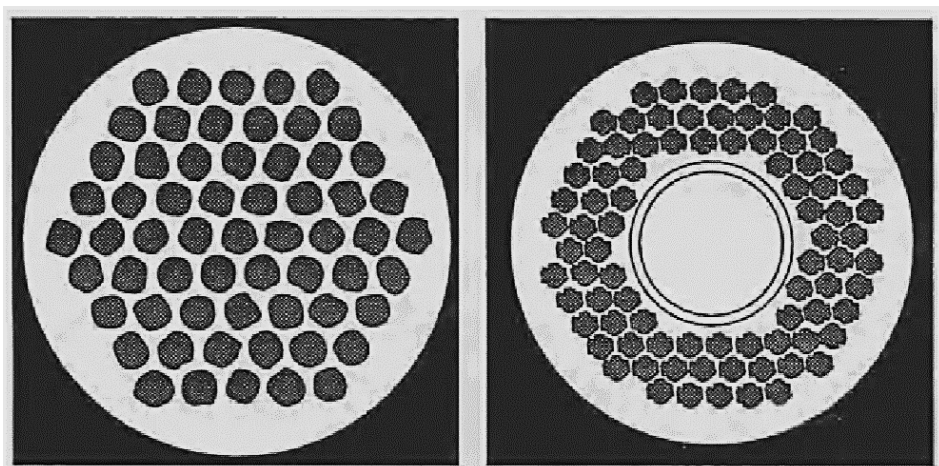
Η ανακάλυψη των κεραμικών υλικών με κρίσιμες θερμοκρασίες πάνω από το σημείο βρασμού του υγρού αζώτου επηρέασε καθεμία από τις προαναφερθείσες κατηγορίες των εφαρμογών που γράψαμε. Στο παρελθόν έχουν γραφεί εργασίες σχετικές με την κάλυψη της θεωρίας και των εφαρμογών των υπεραγωγών, μια από τις οποίες είναι η εργασία των Ruggiero και Rudman που είναι συλλογή των άρθρων ανασκόπησης εξειδικευμένων επιστημόνων που η καθεμία τους αφορά ένα συγκεκριμένο θεματικό πεδίο. Αν και το επίπεδο αυτών των άρθρων είναι μάλλον αρκετά υψηλό και λεπτομερές για τις ανάγκες μας, εν τούτοις δίνουν όλη την απαραίτητη πληροφορία για τις τελευταίες εφαρμογές σε υπεραγώγιμες διατάξεις.

Σε ένα πιο βασικό επίπεδο, το βιβλίο των Orlando και Delin είναι χρήσιμο ειδικά για υπεραγώγιμες επαφές και διατάξεις. Ένας άλλος χρήσιμος οδηγός σε τεχνολογικές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας είναι το βιβλίο του Doss που αν και εξειδικεύεται σε κεραμικούς υπεραγωγούς περιέχει μια γενική εισαγωγή στις εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας.

### 11.4.1 Υπεραγώγιμα σωληνοειδή και πηνία

Μια από τις βασικές εφαρμογές των υπεραγωγών είναι η δημιουργία μαγνητικών πεδίων υψηλής έντασης και σταθερότητας για ερευνητικές και ιατρικές εφαρμογές. Στην περίπτωση

αυτή τα υπεραγώγιμα σύρματα πρέπει να κατασκευάζονται κατευθείαν στη μορφή των πηνίων του σωληνοειδούς. Αυτά τα σύρματα είναι συνήθως κράματα νιοβίου - τιτανίου αλλά και νιοβίου - ψευδαργύρου σε μια μήτρα χαλκού η οποία ελάσσεται μέσα στο σύρμα διαμέτρου περίπου μισού χιλιοστού. Η διατομή αυτών των πολυαξονικών συρμάτων έχουν διατομή όπως δείχνεται στο **Σχήμα 11.7**.



**Σχήμα 11.7** Η διατομή των πολυαξονικών υπεραγώγιμων συρμάτων. Οι σκούρες περιοχές είναι το υπεραγώγιμο υλικό και οι ανοιχτόχρωμες περιοχές είναι η μήτρα του αγώγιμου υλικού όπως ο χαλκός. Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις είναι δύο. Η μία όπου τα υπεραγώγιμα σύρματα είναι κατανεμημένα και διαμορφώνουν έναν κύλινδρο και η άλλη όπου ένας βασικός πυρήνας κοινού αγώγιμου υλικού χρησιμοποιείται σαν βάση της διάταξης.

Στην απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού για ιατρική διάγνωση η μαγνητική ροπή του πυρήνα μπορεί να βρεθεί με τον μαγνητικό συντονισμό του πυρήνα. Η συχνότητα συντονισμού του κάθε πυρήνα εξαρτάται από τη μάζα του, την πυρηνική μαγνητική ροπή και την ένταση πεδίου που αντιλαμβάνεται. Ο συντονισμός μπορεί να προκληθεί με τη χρήση ενός πηνίου ραδιοσυχνοτήτων με μια μεταβλητή συχνότητα συντονισμού και να ανιχνευθεί από ένα πηνίο λήψης.

Η μεταβολή του πεδίου χρησιμοποιείται συνήθως για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής του πυρήνα. Η μετρούμενη συχνότητα συντονισμού μας δείχνει το πεδίο που αντιλαμβάνεται ο πυρήνας. Από την τρισδιάστατη απεικόνιση της έντασης του πεδίου σε έναν δοσμένο όγκο, μπορεί να βρεθεί η θέση του πυρήνα μέσα στο υλικό. Στην εφαρμογή αυτή είναι απαραίτητο να έχουμε πολύ ισχυρό πεδίο που να είναι σταθερό και ελεγχόμενο με υψηλή ακρίβεια σε όλο τον όγκο που μας ενδιαφέρει. Ένα υψηλό πεδίο έχει πλεονεκτήματα διότι δίνει μια υψηλότερη συχνότητα συντονισμού και κατά συνέπεια μια βελτιωμένη σχέση σήματος προς θόρυβο. Έτσι, στη διάταξη αυτή ο μαγνήτης έχει μεγάλη σημασία.

Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα που μπορούν να δημιουργήσουν μαγνητικά πεδία μέχρι 15T. Τα υπεραγώγιμα σύρματα που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν τα υπεραγώγιμα σωληνοειδή μπορούν να μεταφέρουν πολύ υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, της τάξης των  $10\text{MA cm}^{-2}$  ή  $10^{11}\text{A m}^{-2}$ .

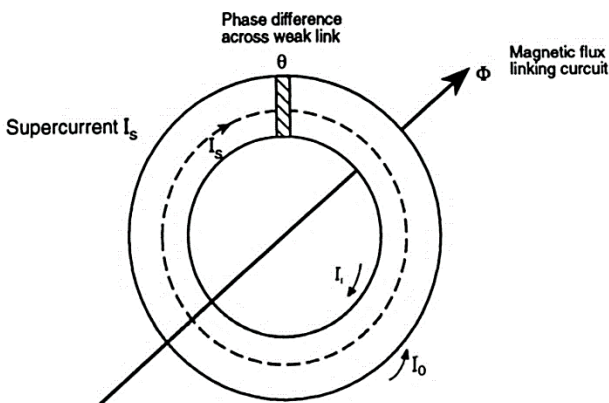
#### 11.4.2 Υπεραγώγιμα μαγνητόμετρα

Σε μια επαφή μέταλλου - μονωτή - μέταλλου (MIM), μπορεί να συμβεί κβαντομηχανική οδήγηση ηλεκτρονίων κατά μήκος του ενεργειακού φράγματος που θέτει ο μονωτής, με την προϋπόθεση ότι το πάχος του μονωτή είναι ικανοποιητικά μικρό. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί με την κβαντομηχανική οδήγηση ηλεκτρονίων σε ένα πεπερασμένο

πηγάδι δυναμικού που μελετήσαμε στο κεφάλαιο 4 ενός και μόνο ηλεκτρονίου ανά χρονική στιγμή δείχθηκε για πρώτη φορά από τον Giaever. Αργότερα ο Josephson προέβλεψε ότι μια επαφή υπεραγωγού - μονωτή - υπεραγωγού (SIS), η κβαντομηχανική οδήγηση των ζευγών ηλεκτρονίων Cooper μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη πιθανότητα από ότι είχε εκτιμηθεί παλιότερα. Αργότερα, αυτή η πρόβλεψη αποδείχθηκε πειραματικά από τους Anderson και Rowell.

Όταν συνδέονται παράλληλα δύο τέτοιες SIS επαφές Josephson, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των κυματοσυναρτήσεων των ηλεκτρονίων. Αυτό οδηγεί σε μια ταλαντούμενη (ημιτονοειδή) μεταβολή της τάσης στα άκρα της διάταξης όταν το κύκλωμα διαρρέεται κάθετα από μαγνητική ροή. Αυτή η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν διάταξη μέτρησης ροής υπερ-υψηλής διακριτότητας που είναι γνωστή ως υπεραγώγιμη διάταξη κβαντικής αλληλεπίδρασης (Superconducting Quantum Interferenc Device - SQUID). Τα μαγνητόμετρα SQUID μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν αλλαγές ροής τόσο χαμηλές όσο το κβάντο μαγνητικής ροής που είναι  $2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$ . Προς το παρόν χρησιμοποιούνται σε ιατρικές διαγνώσεις, ανίχνευση ορυκτών, ανίχνευση υποβρυχίων και κίνησης, καθώς επίσης στο χαρακτηρισμό υλικών και γενικότερα σε επιστημονικές μετρήσεις.

Αν θεωρήσουμε το υπεραγώγιμο κύκλωμα που περικλείει μαγνητική ροή, όπως δείχνεται στο **Σχήμα 11.8**, τότε θα δημιουργηθεί ένα εξωτερικό υπερ-ρεύμα  $I_0$  το οποίο θα αναιρέσει το εξωτερικό πεδίο, σύμφωνα με τη θεωρία των Faraday - Lenz. Το ρεύμα αυτό δεν εξαρτάται από την ιστορία της μεταβολής των μαγνητικών γραμμών, διότι εξ ορισμού εξαρτάται μόνο από το σύνολό τους που εμπεριέχεται μέσα στο κύκλωμα.



**Σχήμα 11.8** Διάταξη υπεραγώγιμου κυκλώματος, γνωστή ως επαφή Josephson.

Για να συντηρηθεί η μαγνητική ροή μέσα στην οπή πρέπει να υπάρχει ένα εσωτερικό ρεύμα  $I_i$  το οποίο να σχετίζεται με την ιστορία των μαγνητικών γραμμών. Αυτό το ρεύμα καθορίζεται από την ποσότητα της ροής η οποία διέρρευσε το κύκλωμα τη στιγμή που το υλικό έγινε υπεραγώγιμο.

Η σχέση μεταξύ της πυκνότητας ροής που διαπερνά το υπεραγώγιμο κύκλωμα και της πυκνότητας ροής που εφαρμόζεται εξωτερικά είναι:

$$B = B_a + \frac{LI_s}{A} \quad (11.2)$$

όπου  $B_a$  είναι η πυκνότητα ροής του επιβαλλόμενου πεδίου,  $I_s$  είναι το συνολικό υπεραγώγιμο ρεύμα,  $L$  είναι η αυτεπαγωγή του δακτυλίου και  $A$  η διατομή του. Το ρεύμα  $I_s$  συσχετίζεται με το κρίσιμο ρεύμα  $I_c$  που ορίζεται από τις ιδιότητες της επαφής του μονωτή με τη σχέση:

$$I_s = I_c \sin \theta \quad (11.3)$$

όπου  $\theta$  είναι η διαφορά φάσης της κυματοσυνάρτησης του ζεύγους ηλεκτρονίων Cooper στη μονωτική επαφή. Έτσι έχουμε:

$$B = B_a + \frac{L}{A} I_c \sin \theta. \quad (11.4)$$

Αν έχουμε έναν απολύτως υπεραγώγιμο δακτύλιο, τότε η μαγνητική ροή μέσα από το δακτύλιο είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο κβάντων μαγνητικής ροής:

$$\Phi = N \Phi_0 \quad (11.5)$$

όπου  $N$  είναι ένας ακέραιος αριθμός και  $\Phi_0$  είναι ένα κβάντο μαγνητικής ροής. Αν η μονωτική επαφή είναι πολύ λεπτή τότε η φασική γωνία  $\theta$  εξαρτάται από τη ροή  $\Phi$ :

$$\theta = 2\pi N - 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (11.6)$$

και δεδομένου ότι το  $N$  είναι ακέραιος αριθμός θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \sin 2\theta &= \sin 2\pi \left( N - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \\ &= -\sin \left( 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \end{aligned} \quad (11.7)$$

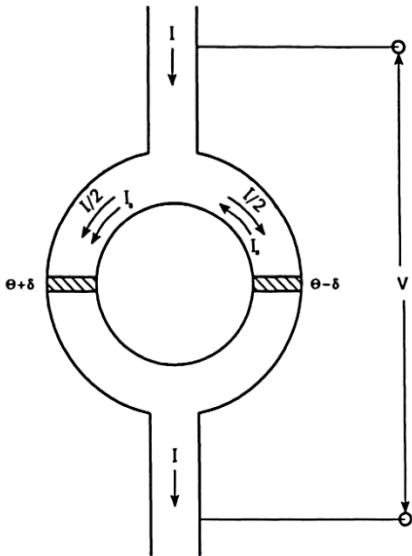
Επομένως:

$$B = B_a - \frac{L}{A} I_c \sin \left( \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \right). \quad (11.8)$$

Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρονική στιγμή που η τιμή του  $\Phi$  είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $2.07 \times 10^{-15}$  Wb, δηλαδή όταν το ημίτονο έχει τιμή 1, τότε η πυκνότητα ροής μέσα στον δακτύλιο ισούται με την πυκνότητα ροής του επιβαλλόμενου πεδίου. Σε μεσαίες τιμές ροής ένα υπερ-ρεύμα διαρρέει τον υπεραγωγό που καθορίζεται από τη μαγνητική ροή που εμπεριέχεται στο υπεραγώγιμο δακτυλίδι και η οποία μπορεί να μετρηθεί. Αν μετρήσουμε την τάση στα άκρα του υπεραγώγιμου δακτυλιδιού, τότε η τάση στα άκρα του σύρματος μέτρησης είναι περιοδική συνάρτηση της ροής που διαρρέει το υπεραγώγιμο κύκλωμα.

### 11.4.3 Αρχές λειτουργίας του SQUID

Αν θεωρήσουμε το κύκλωμα που αποτυπώνεται στο **Σχήμα 11.9**, ένα ρεύμα  $I$  ρέει από τα δύο μονοπάτια της διάταξης συμβολομετρίας.



**Σχήμα 11.9** Ηλεκτρικό κύκλωμα που δείχνει τη σύνδεση των δύο επαφών Josephson για τη διαμόρφωση του SQUID.

Αν υποθέσουμε ότι η διάταξη είναι συμμετρική τότε το μισό ρεύμα  $I/2$  διαρρέει το κάθε μονοπάτι. Αν  $I < I_c/2$ , τότε θα έχουμε μια φασική διαφορά σε κάθε μονωτική επαφή, όπως περιγράψαμε νωρίτερα. Έστω τώρα ότι μια ροή  $\Phi$  εισέρχεται στο κύκλωμα. Αυτή η ροή θα προκαλέσει ένα υπεραγωγίμο ρεύμα  $I_s$  που θα προστεθεί στο υπάρχον ρεύμα στο ένα μονοπάτι αλλά θα αφαιρεθεί από το ρεύμα στο άλλο. Έτσι, οι φασικές διαφορές στα δύο άκρα θα είναι  $\theta + \delta$  και  $\theta - \delta$  και έτσι:

$$\frac{1}{2}I + I_s = I_c \sin(\theta + \delta) \quad (11.9)$$

$$\frac{1}{2}I - I_s = I_c \sin(\theta - \delta) \quad (11.10)$$

Αθροίζοντας αυτά τα δύο ρεύματα θα έχουμε:

$$\begin{aligned} &= I_c \{ \sin(\theta + \delta) + \sin(\theta - \delta) \} \\ &= 2I_c \sin \theta \cos \delta \end{aligned} \quad (11.11)$$

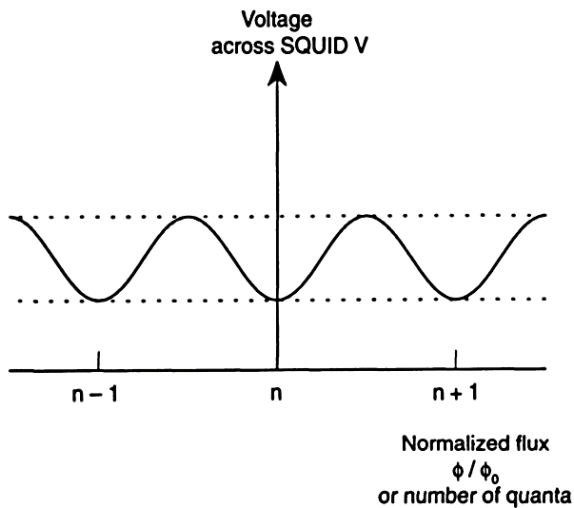
Και η ολική αλλαγή της φάσης στα δύο μονωτικά άκρα θα είναι  $2\delta$  που πρέπει να ισούται με  $2\pi N - 2\pi\Phi/\Phi_0$ , και έτσι:

$$\delta = \pi N - \frac{\pi \Phi}{\Phi_0} \quad (11.12)$$

όπου  $N$  είναι ακέραιος όπως προηγουμένως. Έτσι:

$$I = 2I_c \cos(\pi N) \cos\left(\frac{\Phi \pi}{\Phi_0}\right) \sin \theta \quad (11.13)$$

Έτσι, καθώς μεγαλώνει η μαγνητική ροή το ρεύμα μεταβάλλεται περιοδικά με τη ροή και το ίδιο κάνει και η τάση στα άκρα της διάταξης, όπως δείχνεται στο **Σχήμα 11.10**. Η περίοδος αντιστοιχεί σε ένα κβάντο ροής, με αποτέλεσμα η διάταξη αν μπορεί να μετρά κβάντα ροής και στην πράξη η ευαισθησία της μπορεί να είναι το ένα εκατομμυριοστό του κβάντου ροής, γεγονός βέβαια που εξαρτάται από τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Στην πράξη, το ρεύμα δεν αλλάζει ποτέ κατεύθυνση και η εξίσωση που περιγράψαμε ισχύει πάντα. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ζεύγη ηλεκτρονίων διαμορφώνουν τη γωνία τους  $\theta$  για να είναι σίγουρα ότι το αρχικό ρεύμα  $I$  ρέει πάντα στην ίδια κατεύθυνση.



**Σχήμα 11.10** Μεταβολή της τάσης στα άκρα ενός SQUID, συναρτήσει του αριθμού των κβάντων ροής του εξωτερικού πεδίου που προσπαθεί να διαρρεύσει το δακτυλίδι.

Σημειώνουμε ότι η διάταξη μετράει αλλαγές του μαγνητικού πεδίου και όχι απόλυτη τιμή πεδίου. Έτσι, για τη μέτρηση της απόλυτης τιμής ενός πεδίου χρειάζεται η σχετική κίνηση της πηγής του πεδίου ή του υπεραγωγίμου δακτυλιδιού για να προκύψει με συγκριτική τεχνική, η απόλυτη τιμή του πεδίου.

#### 11.4.4 Νέες διατάξεις

Ένας νέος τύπος μαγνητόμετρου SQUID χωρίς επαφές τύπου Josephson, προτάθηκε από τον Fink. Στη διάταξη αυτή τα υπερ-ρεύματα σε δύο παράλληλους βραχίονες έχει σαν αποτέλεσμα ένα κρίσιμο ρεύμα που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς συναρτήσει του εξωτερικού πεδίου. Πρόσφατα ο Moschalkon, έδειξε ότι η κβαντική αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα σε έναν υπεραγωγίμο βρόγχο μήκους όχι μεγαλύτερου από το μήκος αλληλοσύνδεσης των

ζευγών Cooper το οποίο έχει μια τυπική τιμή μερικών χιλιοστών και είναι πολύ μικρότερο του μήκους ενός βρόγχου που χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό SQUID. Αυτό οδηγεί σε μια ημιτονοειδή μεταβολή της τάσης στα άκρα του βρόγχου σαν συνάρτηση της μαγνητικής ροής που τον διαρρέει. Ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης σ' αυτά τα μεσοσκοπικά μήκη βρόγχων είναι αρκετά διαφορετικό από το φαινόμενο που παρατηρείται στις διατάξεις που χρησιμοποιούν επαφή Josephson. Βέβαια, υπάρχουν μερικές ομοιότητες στη συμπεριφορά τους. Περιοχές με χαμηλή πυκνότητα ζευγών Cooper, συμβαίνουν περιοδικά σ' αυτούς τους μεσοσκοπικούς βρόγχους σε ημι-κβάντα μαγνητικής ροής ως αποτέλεσμα της μαγνητικής μόνωσης και των ρευμάτων μεταφοράς στον βρόγχο. Η φάση των ηλεκτρονίων Cooper στον βρόγχο εγγυάται ότι όταν εμφανίζεται μια χαμηλή πυκνότητα ζευγών στον έναν βραχίονα θα πρέπει να συμβαίνει ταυτόχρονα και στον άλλο.

Υπάρχει μια συνεχής και μακρόχρονη ερευνητική δουλειά για την ανάπτυξη στοιχείων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που βασίζονται σε ταλαντώσεις κρίσιμων ρευμάτων σε τέτοιους μεσοσκοπικούς βρόγχους αν και υπάρχουν σημαντικά προβλήματα που πρέπει να υπερπηδηθούν. Συγκεκριμένα, για να παρατηρήσουμε αυτά τα φαινόμενα χρειαζόμαστε κάτω από 1K και τάσεις κάτω από 0.1mV. Η απόκριση της διάταξης εξαρτάται επίσης πολύ και από τη στοιχειομετρία του δείγματος. Για παράδειγμα, η μορφή αλληλεπίδρασης μπορεί να αλλάξει με την πρόσθεση μίας και μόνο πρόσμειξης στο κύκλωμα. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται αρκετή ερευνητική δουλειά ακόμη για να γίνουν τέτοιες διατάξεις πρακτικά εφαρμόσιμες.

## 11.5 Υπεραγώγιμες ηλεκτρονικές διατάξεις

Ας θεωρήσουμε τώρα τις ηλεκτρονικές εφαρμογές υπεραγωγών ή εφαρμογές χαμηλής ισχύος σε διάκριση από τις ηλεκτρικές εφαρμογές ή εφαρμογές υψηλής ισχύος. Στις περιπτώσεις αυτές τα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά των υπεραγώγιμων επαφών συμπεριφέρονται σαν παραδοσιακές ηλεκτρονικές συναρτήσεις, αν και στις πολλές περιπτώσεις με βελτιωμένη συμπεριφορά σε σχέση με μη υπεραγώγιμα υλικά. Για παράδειγμα οι υπεραγώγιμες διατάξεις είναι συχνά ταχύτερες ή μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες, ή μπορούν να έχουν μικρότερες απώλειες από συμβατικές διατάξεις.

Μαζί με την απότομη μείωση ή μηδενισμό της αντίστασης του υλικού, συμβαίνουν και άλλα εξίσου δραματικά φαινόμενα στις ηλεκτρονικές ιδιότητες των υλικών, συμπεριλαμβανομένης και της αλλαγής στην πυκνότητα καταστάσεων που προκαλείται εξαιτίας του υπεραγώγιμου ενεργειακού διάκενου.

Η οδήγηση μονού ηλεκτρονίου (single electron transport) συμβαίνει όταν τα ηλεκτρόνια πολώνονται και οδηγούνται μέσα από ένα λεπτό μονωτικό υμένιο μεταξύ του υπεραγώγιμου υλικού και ενός κανονικού υλικού που είναι γνωστή και σαν επαφή SIN. Το σχετιζόμενο φαινόμενο Josephson όπου ένα ζεύγος ηλεκτρονίων ή ζεύγος Cooper περνάει από μια υπεραγώγιμη περιοχή σε μια άλλη μέσω ενός λεπτού μονωτικού υμενίου. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή ως SIS. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση διατάξεων που μπορούν να αλλάξουν ηλεκτρική κατάσταση πολύ γρήγορα. Αυτό το φαινόμενο προσφέρει τη δυνατότητα σχεδίασης λογικών διατάξεων και μικρών υπολογιστικών κυκλωμάτων που μπορούν να λειτουργούν πολύ γρήγορα, με ταχύτητες έναυσης που μπορεί να είναι και 1000 φορές πιο γρήγορες από τις διατάξεις πυριτίου. Μέχρι στιγμής έχουν γίνει προσπάθειες για την κατασκευή υπολογιστών με τη λογική αυτή αλλά έχουν εντοπιστεί αδυναμίες λειτουργίας, ενώ βέβαια έχουν να ανταγωνιστούν τις ημιαγώγιμες III-V διατάξεις που αναπτύσσονται ραγδαίως και που επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα υψηλής ταχύτητας.

Οι κύριες εφαρμογές των υπεραγώγιμων κυκλωμάτων σε ηλεκτρονικές διατάξεις είναι:

- Διατάξεις ραδιοσυχνοτήτων και διατάξεις μικροκυμάτων (όπως ανιχνευτές μικρών κυμάτων κάποιων mm, φίλτρα κλπ.).
- Λογικές διατάξεις και κυκλώματα υψηλής ταχύτητας.
- Αναλογικές διατάξεις υψηλής συχνότητας και χαμηλού θορύβου (όπως στοιχεία παλμογράφων υψηλών συχνοτήτων).
- Λεπτά υμένια.
- Υβριδικά κυκλώματα και διατάξεις ημιαγωγών - υπεραγωγών.
- Οπτικοί ανιχνευτές.

Οι διάφορες εφαρμογές των υπεραγωγών έχουν αναπτυχθεί σε διάφορα άρθρα στο παρελθόν. Μια σχετικά πρόσφατη διαπανεπιστημιακή - διεπιχειρησιακή έρευνα στο πεδίο των υπεραγώγιμων ηλεκτρονικών, μελέτησε και ανάλυσε 4 περιοχές που φαίνεται ότι έχουν ενδιαφέρον:

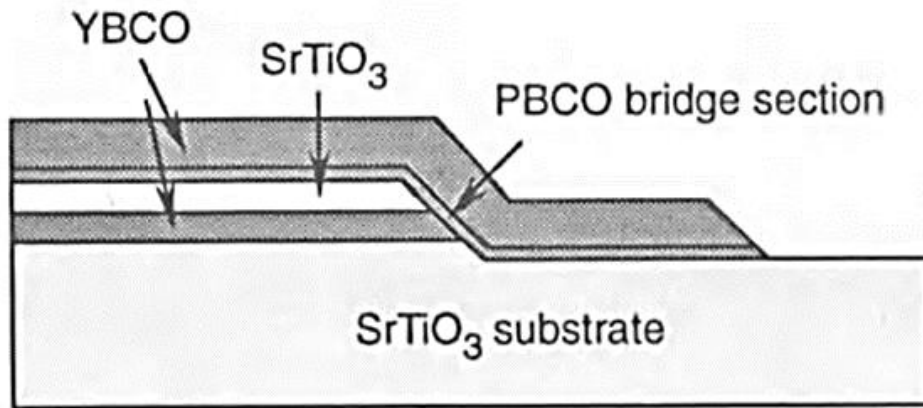
- Υλικά και διαδικασίες παραγωγής.
- Υπεραγώγιμες επαφές
- Δίκτυα
- Κυκλώματα.

Στον τομέα των υλικών και των διαδικασιών παραγωγής ήταν και είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν υποδομές μεγάλης κλίμακας για να είναι δυνατή η παρασκευή λεπτών υμενίων. Η μεγάλη δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι οι παράμετροι του πλέγματος του υποστρώματος και ο συντελεστής θερμικής διαστολής του υποστρώματος πρέπει να ταιριάζουν μ' αυτά των υπεραγώγιμων λεπτών υμενίων. Τα υποψήφια υλικά που ερευνήθηκαν είναι το  $\text{NdGaO}_3$ , το  $\text{LaAlO}_3$ , το  $\text{MgO}$  και το  $\text{ZrO}_2$ . Η απόθεση των υπεραγώγιμων λεπτών υμενίων στα υποστρώματα μπορεί να γίνει με μια από τις πολλές υπάρχουσες τεχνικές όπως, η απόθεση με θρυμματισμό, εξάχνωση σε κενό, απόθεση με laser, μοριακή επιταξία (molecular beam epitaxy - MBE) και οργανομεταλλική απόθεση (chemical vapour deposition - CVD).

Τα πιο "δουλεμένα" υπεραγώγιμα υλικά για εφαρμογές λεπτών υμενίων είναι τα  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ή "YBCO" ο  $\text{TlBaCaCuO}$  ή "TBCCO" και το  $\text{BiSrCaCuO}$  ή "BSCCO". Ένα άλλο υλικό που μελετάται ακόμη είναι το  $[\text{BaK}]\text{BiO}_3$ , το οποίο έχει μεγάλο μήκος αλληλοσυσχέτισης, δηλαδή μεγάλη περιοχή στην οποία οι καταστάσεις των ηλεκτρονίων μπορούν να συσχετιστούν. Ακόμη οι ηλεκτρονικές του ιδιότητες είναι ισοτροπικές. Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν αυτό το υλικό έναν σημαντικό υποψήφιο για διατάξεις και επαφές που βασίζονται σε οδήγηση ηλεκτρονίων, παρόλο που η κρίσιμη θερμοκρασία του είναι 30K.

Η ανάπτυξη άλλων διατάξεων με τη χρήση άλλων κεραμικών υπεραγωγών πρέπει να υπερπηδήσει μερικά σημαντικά προβλήματα που υπάρχουν εξαιτίας της ανισοτροπίας και του μήκους αλληλοσυσχέτισης. Παρόλα τα προβλήματα, τέτοιες διατάξεις, όπως υπεραγώγιμες επαφές στη μορφή λεπτών υμενίων, έχουν ήδη κατασκευαστεί, όπως για παράδειγμα το εργαστηριακό πρωτότυπο που δείχνεται στο **Σχήμα 11.11**. Αυτό το πρωτότυπο είναι μια επαφή Josephson και είναι κατασκευασμένη από λεπτό υμένιο YBCO που έχει διαχωριστεί από ένα στρώμα  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ . Τα υμένια αυτά αναπτύχθηκαν σε τρόπο ώστε τα επίπεδα των οξειδίων του χαλκού να είναι παράλληλα στην επιφάνεια του υποστρώματος, δίνοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα ρεύματος. Η βηματική κατασκευή αυτών των υλικών είναι τέτοια που να διασφαλίζει ότι η λεπτή μονωτική επιφάνεια είναι επίσης στην κατεύθυνση του μέγιστου μήκους αλληλεπίδρασης. Αυτή η γεωμετρία κατά συνέπεια βελτιστοποιεί τη διάταξη.





**Σχήμα 11.11** Σχηματικό διάγραμμα μιας επαφής Josephson λεπτού υμενίου.

Σε δίκτυα, οι υπεραγωγοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση ημιαγωγίμων διατάξεων. Τα υπεραγωγίμα λεπτά υμένια έχουν χαμηλή αντίσταση σε μικροκυματικές συχνότητες με αποτέλεσμα να αποτελούν το υλικό για την ανάπτυξη μικροσκοπικών μικροκυματικών φίλτρων χαμηλών απωλειών. Για παράδειγμα, στους 77K και στα 4GHz, ένα λεπτό υμένιο YBCO έχει μόνο 25% των απωλειών ενός φίλτρου αργύρου. Τα υπεραγωγίμα φίλτρα υψηλής απόδοσης μπορούν να έχουν συντελεστές Q μεγαλύτερους από 1000, σε σύγκριση με τις τιμές του Q άλλων υλικών που δουλεύουν στις ίδιες συνθήκες και που είναι γύρω στο 250.

Επίσης μπορούν να κατασκευαστούν SQUIDS με ιδιαίτερα χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο, χρησιμοποιώντας διαδικασία τριών επιπέδων με τη χρήση υμενίων νιοβίου-αλουμινίου και οξειδίου του νιοβίου. Αυτά τα υμένια κατασκευάζονται με την τεχνική του θρυμματισμού και, στη συνέχεια, πλανάρονται με μια διαδικασία παρόμοια μ' αυτήν που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ημιαγωγίμων διατάξεων. Σχετικά πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί διατάξεις SQUID, για χρήση σε αισθητήρες μαγνητικού πεδίου και ταλαντωτές με επιφάνειες επαφής  $0.7\mu\text{m} \times 0.7\mu\text{m}$ . Μια μελλοντική, πιθανή εφαρμογή είναι τα υπεραγωγίμα FET τρανζίστορς (SUFETs).

Τέλος, το φως αλληλοεπιδρά με αυτά τα υλικά διά μέσου των ηλεκτρονίων. Σε προηγούμενα κεφάλαια έχουμε ήδη συζητήσει την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με ημιαγωγούς και μέταλλα. Τα ηλεκτρόνια στους υπεραγωγούς είναι ευαίσθητα στο φως με μικρές φωτονικές ενέργειες της τάξης των  $0.01\text{eV}$ , με αποτέλεσμα οι υπεραγωγοί να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ανιχνευτές φωτός υπερυψηλής ευαισθησίας.

Οι υπεραγωγίμες διατάξεις που παρουσιάστηκαν σ' αυτό το κεφάλαιο δείχνουν την υπάρχουσα τεχνογνωσία σε διατάξεις υπεραγωγίμων υλικών.