



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τσιάρου Μαγδαληνή

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ
ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΣΕ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΥΜΕΝΙΑ Fe/Cr**

Επιβλέπων: Καθηγητής, Παναγιωτόπουλος Ιωάννης

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, 2025

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την18/12/2025.....από την εξεταστική επιτροπή:

1. **Παναγιωτόπουλος Ιωάννης**, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, **Επιβλέπων**.
2. Μπέλτσιος Κωνσταντίνος, Καθηγητής της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.
3. Μάρκου Αναστάσιος Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής της Σ.Θ.Ε του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."

(Υπογραφή υποψηφίου)
Τσιάρου Μαγδαλήνη

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
ΜΕΡΟΣ Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ.....	4
1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή στον μαγνητισμό	4
1.2 Βασικές Έννοιες Μαγνητισμού.....	5
1.2.1 Μαγνητική διπολική ροπή.....	6
1.2.2 Ατομική μαγνητική ροπή	8
1.2.3 Μαγνήτιση.....	9
1.3 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών	11
1.3.1 Διαμαγνητικά.....	12
1.3.2 Παραμαγνητικά	13
1.3.3 Σιδηρομαγνητικά	14
1.3.4 Αντισιδηρομαγνητικά	15
1.3.5 Σιδηριμαγνητικά	15
1.4 Οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής και η προέλευση τους	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ.....	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία.....	20
2.3 Ανισοτροπία σχήματος (shape anisotropy)	24
2.4 Επειφανειακή ανισοτροπία (surface anisotropy).....	26
2.5 Μαγνητοελαστική Ανισοτροπία.....	28
2.6 Μαγνητικές περιοχές και μαγνητικά τοιχώματα	30
2.7 Βρόχος υστέρησης.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΑ ΥΜΕΝΙΑ.....	36
3.1 Εισαγωγή	36
3.2 Πολυστρωματική Διαμόρφωση.....	36

3.3 Φυσικές ιδιότητες και φαινόμενα	38
3.4 Εφαρμογές μαγνητικών πολυστρωματικών υμενίων.....	38
3.5 Μαγνητική εγγραφή – μαγνητική αποθήκευση πληροφορίας	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΠΙΝΤΡΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	44
4.1 Εισαγωγή	44
4.2 Γιγαντιαία Μαγνητοαντίσταση	47
4.3 Βαλβίδα Spin.....	49
4.4 Αλληλεπιδράσεις RKKY	51
4.5 Συνθετικοί (τεχνητοί) Αντισηδηρομαγνήτες.....	53
4.6 Εφαρμογές SAF.....	55
4.7 Επιφανειακές αντισυμμετρικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής Dzyaloshinskii – Moriya (DMI)	57
ΜΕΡΟΣ Β. ΠΕΙΡΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	60
5.1 Μέθοδοι Σύνθεσης Λεπτών Υμενίων	60
5.2 Εναπόθεση λεπτών υμενίων με την Μέθοδο της Καθοδικής Ιοντοβολής (Sputtering).....	61
5.3 Τεχνικές sputtering	62
5.3.1 DC δίοδος Sputtering	62
5.3.2 RF sputtering	64
5.3.3 Magnetron Sputtering	65
5.4 Μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος VSM (Vibrating Sample Magnetometer)	66
5.5 Εισαγωγή στις ακτίνες X	68
5.6 Περίθλαση ακτίνων X – XRD.....	70
5.7 Ανακλαστικότητα ακτίνων X (XRR)	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ	75
6.1 Εισαγωγή	75
6.2 Αντισηδηρομαγνητική σύζευξη σε πολυστρωματικές δομές Fe/Cr	76
6.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας ιοντοβολής.....	78
6.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μονάδας Περίθλασης Ακτίνων –X Παράλληλης Δέσμης (XRR).....	79
6.5 Παρασκευή Δειγμάτων	81
6.6 Αποτελέσματα – Συζήτηση.....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης ανταλλαγής σε πολυστρωματικά υμένια του συστήματος $[\text{Fe}/\text{Cr}]_8$, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές στη σπιντρονική και στις τεχνολογίες αποθήκευσης υψηλής πυκνότητας. Στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση της επίδρασης του πάχους του μη μαγνητικού στρώματος Cr στη διαμόρφωση και την ισχύ της RKKY αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων Fe. Για τον σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν πέντε πολυστρωματικά συστήματα τύπου $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8/\text{Ru}_{10}$, με $x = 8, 12.5, 15, 17.5$ και $20 \text{ \AA}$, χρησιμοποιώντας την τεχνική της μαγνητικά υποβοηθούμενης καθοδικής ιοντοβολής (magnetron sputtering). Ο μαγνητικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε με μαγνητόμετρο παλλόμενου δείγματος (VSM) με το πεδίο να εφαρμόζεται παράλληλα στο επίπεδο του υμενίου, μέσω του οποίου καταγράφηκαν οι βρόχοι υστέρησης σε θερμοκρασία δωματίου. Από τις μετρήσεις προσδιορίστηκε το πεδίο ανταλλαγής H_{ex} , το οποίο συνδέεται άμεσα με την ισχύ της αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του στο δείγμα με πάχος Cr $17.5 \text{ \AA}$. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συνεπές με τη συνημιτονοειδή φύση της RKKY αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση του πάχους του διαχωριστικού στρώματος. Παράλληλα, η δομική διερεύνηση των υμενίων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ανακλαστικότητας ακτίνων-X (XRR), από την οποία επιβεβαιώθηκε η καλή συμφωνία μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών τιμών των παχών. Η ανάλυση των XRR δεδομένων επέτρεψε τον αξιόπιστο προσδιορισμό του συνολικού πάχους των πολυστρωματικών δομών και του ρυθμού εναπόθεσης του Cr. Τα αποτελέσματα της εργασίας καταδεικνύουν ότι η αντισιδηρομαγνητική σύζευξη στις δομές Fe/Cr μπορεί να ελεγχθεί και να βελτιστοποιηθεί μέσω της κατάλληλης επιλογής του πάχους του Cr, με το βέλτιστο σημείο να εντοπίζεται στα $17.5 \text{ \AA}$. Η βέλτιστη αυτή σύζευξη προσδίδει αυξημένη σταθερότητα και επιθυμητή μαγνητική απόκριση, καθιστώντας τις συγκεκριμένες δομές ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές σε MRAM, spin valves, GMR αισθητήρες και γενικότερα σε διατάξεις προηγμένης σπιντρονικής.

ABSTRACT

This thesis focuses on the optimization of the antiferromagnetic exchange coupling in multilayer thin films of the $[\text{Fe}/\text{Cr}]_8$ system, which are of significant interest for spintronic applications and high-density magnetic storage technologies. The aim of the study is to investigate how the thickness of the non-magnetic Cr spacer layer influences the formation and strength of the RKKY antiferromagnetic coupling between the ferromagnetic Fe layers. To this end, five multilayer structures of the form $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8/\text{Ru}_{10}$, with $x = 8, 12.5, 15, 17.5$, and $20 \text{ \AA}$, were fabricated using magnetron sputtering. Magnetic characterization was performed using a Vibrating Sample Magnetometer (VSM) with the applied magnetic field parallel to the film plane, enabling the acquisition of hysteresis loops at room temperature. From these measurements, the exchange field H_{ex} was determined, which directly reflects the strength of the antiferromagnetic coupling. The maximum value of H_{ex} was observed for the sample with a Cr spacer thickness of $17.5 \text{ \AA}$, fully consistent with the sinusoidal

behavior of the RKKY interaction as a function of spacer thickness. Structural characterization was carried out using X-ray Reflectivity (XRR), which confirmed the good agreement between nominal and experimentally obtained layer thicknesses. The XRR analysis also enabled precise determination of the total multilayer thickness and the deposition rate of the Cr layers. The results demonstrate that the antiferromagnetic coupling in Fe/Cr multilayers can be effectively controlled and optimized through appropriate selection of the Cr spacer thickness, with 17.5 Å identified as the optimal value for maximizing coupling strength. This enhanced coupling leads to improved magnetic stability and desirable magnetic response, making these multilayer structures highly suitable for applications in MRAM, spin valves, GMR sensors, and advanced spintronic devices.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μαγνητικά υλικά αποτελούν έναν από τους πλέον δυναμικούς και ραγδαία εξελισσόμενους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας των υλικών, καθώς διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στη βιομηχανική παραγωγή όσο και στην καθημερινή ζωή. Η πιο χαρακτηριστική και σημαντική τους εφαρμογή εντοπίζεται στον χώρο της πληροφορικής, και ιδιαίτερα στις τεχνολογίες αποθήκευσης δεδομένων. Η μελέτη των μαγνητικών φαινομένων και των αντίστοιχων υλικών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αποθήκευσης και επεξεργασίας πληροφοριών, ενώ παράλληλα ανοίγει τον δρόμο για καινοτομίες και σε άλλους τεχνολογικούς τομείς. Η μαγνητική εγγραφή παραμένει μέχρι σήμερα η κυρίαρχη τεχνολογία για την αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων, κυρίως σε σκληρούς δίσκους και παρόμοια μέσα. Ωστόσο, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταχύτερη προσπέλαση δεδομένων έχει οδηγήσει στην αναζήτηση μαγνητικών δομών με ανώτερες ιδιότητες, όπως υψηλή σταθερότητα και χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Η αύξηση της πυκνότητας αποθήκευσης προϋποθέτει τη μείωση του μεγέθους του bit πληροφορίας, γεγονός που καθιστά κρίσιμη τη χρήση υλικών με ελεγχόμενες μαγνητικές αλληλεπιδράσεις και ανθεκτικότητα σε θερμικές διακυμάνσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει οι πολυστρωματικές μαγνητικές δομές και, ειδικότερα, οι τεχνητοί αντισιδηρομαγνήτες (Synthetic Antiferromagnets – SAFs). Οι συνθετικοί αντισιδηρομαγνήτες αποτελούνται από διαδοχικά στρώματα σιδηρομαγνητικών υλικών που χωρίζονται μεταξύ τους από λεπτά μη μαγνητικά διαχωριστικά στρώματα, τα οποία προκαλούν αντισιδηρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων. Αυτή η ελεγχόμενη σύζευξη επιτρέπει τον ακριβή χειρισμό κρίσιμων μαγνητικών ιδιοτήτων, όπως η μαγνητοαντίσταση, η μαγνητική ανισοτροπία και η δυναμική της μαγνήτισης. [1]

Οι SAFs έχουν βρει εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών πεδίων, με σημαντικότερες τις συσκευές σπιντρονικής, τις μαγνητοαντιστατικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης (MRAM) και τις βαλβίδες - spin. Στις εφαρμογές αυτές, η αντισιδηρομαγνητική σύζευξη προσφέρει αυξημένη σταθερότητα, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και βελτιωμένη διατήρηση της μαγνητικής πληροφορίας. Παράλληλα, οι SAFs χρησιμοποιούνται σε τεχνολογίες εγγραφής υψηλής πυκνότητας, όπου η πολυστρωματική δομή τους συμβάλλει σε μεγαλύτερη ακρίβεια και

αποδοτικότητα, επιτρέποντας την αποθήκευση περισσότερων δεδομένων σε μικρότερο χώρο σε σχέση με τις παραδοσιακές σιδηρομαγνητικές διατάξεις. [2]

Πέρα από την πληροφορική, οι SAFs παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για ιατρικές εφαρμογές. Τα αντισιδηρομαγνητικά νανοσωματίδια αξιοποιούνται στη στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων, στη μαγνητική υπερθερμία για αντικαρκινικές θεραπείες και στη βελτίωση της απεικόνισης στη μαγνητική τομογραφία (MRI), προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και ελεγχόμενη μαγνητική απόκριση. [3]

Είτε πρόκειται για τον τομέα των ηλεκτρονικών σπιν, είτε για τεχνολογίες εγγραφής υψηλής πυκνότητας, είτε για βιοϊατρικές εφαρμογές, οι συνθετικοί αντισιδηρομαγνήτες εξακολουθούν να υπόσχονται πολλά.

ΜΕΡΟΣ Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟ

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή στον μαγνητισμό

Ο όρος *μαγνητισμός* προέρχεται από το όνομα της Μαγνησίας, της περιοχής όπου πριν από 2000 χρόνια και πλέον, οι αρχαίοι Έλληνες ανακάλυψαν ένα ιδιαίτερο είδος πετρώματος. Το υλικό αυτό, που ονομάζεται *μαγνητίτης*, είχε την ασυνήθιστη ιδιότητα να έλκει κομμάτια σιδήρου. Τον 12ο αιώνα οι κινέζοι χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά τους μαγνήτες για την κατασκευή πυξίδων (Shen Kua), που αποτέλεσαν, σημαντικό βοήθημα της ναυσιπλοΐας. Ωστόσο, μέχρι να ξεκινήσει η ερευνα και η κατανόηση του μαγνητισμού, χρειάστηκαν να περάσουν μερικοί αιώνες. Τον 16ο αιώνα ο William Gilbert, γιατρός της βασίλισσας Ελισάβετ, κατασκεύασε τεχνητούς μαγνήτες, τρίβοντας κομμάτια σιδήρου πάνω σε μαγνητίτη, και δημοσίευσε τα πρώτα συστηματικά πειράματα επάνω στον μαγνητισμό, στη μονογραφία του *De Magnete*, το οποίο αποτελεί το πρώτο νεωτερικό επιστημονικό κείμενο. Ισχυρίστηκε επίσης ότι η πυξίδα προσανατολίζεται πάντα κατά τον άξονα Βορρά – Νότου, επειδή η ίδια η Γη έχει μαγνητικές ιδιότητες, δηλαδή, αποτελεί έναν τεράστιο μαγνήτη. Το 1750, ο Άγγλος John Michell ανακάλυψε ότι οι μαγνητικοί πόλοι υπακούουν στο νομό του αντίστροφου τετράγωνου. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν από τον Coulomb. Οι κλάδοι του μαγνητισμού και του ηλεκτρισμού αναπτύχθηκαν σχεδόν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο μέχρι το 1819, όποτε ο Δανός Hans Christian Ørsted, ανακάλυψε τυχαία μέσω μιας βελόνας και μιας πυξίδας, ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να δημιουργήσει μαγνητικό πεδίο. Τα πειραματικά φαινόμενα υποδείκνυαν σαφώς ότι ο μαγνητισμός σχετίζεται με τον ηλεκτρισμό. Λίγο αργότερα ο Γάλλος φυσικός Andre – Marie Ampere, πρότεινε ότι πηγή κάθε μαγνητικού φαινομένου είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Συνεπώς, από τον 1820 και μετά ο μαγνητισμός και ο ηλεκτρισμός είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους (ηλεκτρομαγνητισμός), με άλλα λόγια, αποτελούν δύο διαφορετικές όψεις του ίδιου νομίσματος. Καθοριστική ήταν και η διαίσθηση του Michael Faraday ότι οι ηλεκτρικές και οι μαγνητικές δυνάμεις είναι δυνατόν να προσληφθούν ως πεδία που διαπερνούν τα πάντα. Ο ίδιος ανακάλυψε την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή το 1821 καθώς και τη σχέση μαγνητισμού και φωτός με το μαγνητοοπτικό φαινόμενο Faraday. Αυτό αποτέλεσε έμπνευση για τον James Clerk Maxwell να διατυπώσει το 1864 μια ενοποιημένη θεωρία ηλεκτρισμού, μαγνητισμού και φωτός, η οποία συνοψίζεται στις τέσσερις διάσημες εξισώσεις του Maxwell. Στα επόμενα χρόνια ακολουθεί η καταγραφή του πρώτου βρόχου υστέρησης για το σίδηρο, η διατύπωση του νόμου του Curie, η περιγραφή της θεωρίας του παραμαγνητισμού, διαμαγνητισμού καθώς και του σιδηρομαγνητισμού (Weiss). Η δεκαετία του 1920 ανήκει στην κατανόηση και την ανάπτυξη της φυσικής του μαγνητισμού σε μικροσκοπικό επίπεδο, που βασίζονται σε θεωρίες όπως είναι το σπιν των ηλεκτρονίων καθώς και οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής. [4,5]



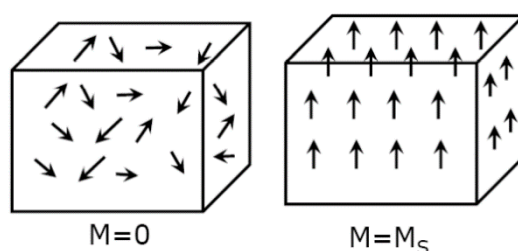
Εικόνα 1.1: Ορισμένοι από τους ανθρώπους που έγραψαν την δική τους ιστορία στον μαγνητισμό. Επάνω σειρά από τα αριστερά: Shen Kua, William Gilbert, Hans Christian Oersted, Andre Marie Ampere. Μεσαία σειρά από τα αριστερά: Michael Faraday, James Clerk Maxwell, Samuel Goudsmit, Georg Uhlenbeck. Κάτω σειρά από τα αριστερά: Werner Heisenberg, Pierre Curie, James Ewing, Louis Neel.

1.2 Βασικές Έννοιες Μαγνητισμού

Στην καθημερινή μας ζωή, σχεδόν όλες οι εφαρμογές που χρησιμοποιούμε βασίζονται στον μαγνητισμό, για αυτό και η τεχνολογία εστιάζει στην ερευνά και στην ανάπτυξη των ήδη υπάρχοντων και νέων μαγνητικών υλικών. Τα μαγνητικά υλικά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών από βαριές βιομηχανικές χρήσεις (όπως κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές) μέχρι και μικροεφαρμογές υψηλής τεχνολογίας (αισθητήρες, δίσκοι μαγνητικής εγγραφής, κεφαλές ανάγνωσης, βαλβίδα spin κτλ.). Μια ευρεία γκάμα εφαρμογών των μαγνητικών εφαρμογών προκύπτει από τη σύνδεση του μαγνητισμού με άλλες φυσικές ιδιότητες όπως είναι τα λεγόμενα μαγνητοοπτικά, μαγνητοελαστικά και φαινόμενα μαγνητοαντίστασης. Για την εκάστοτε εφαρμογή θα χρησιμοποιηθεί ανάλογα και το υλικό που έχει και τις επιθυμητές ιδιότητες. Η βασική ποσότητα του μαγνητισμού είναι η μαγνητική διπολική ροπή, όπως είναι αντίστοιχα για τον ηλεκτρισμό το ηλεκτρικό φορτίο. Μια πολύ βασική διαφορά με τον ηλεκτρισμό είναι ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα. Αυτό σημαίνει ότι ενώ τα ηλεκτρικά φορτία μπορούν να απομονωθούν (θετικό και αρνητικό φορτίο), οι μαγνητικοί πόλοι δεν μπορούν, δηλαδή ένας βόρειος μαγνητικός πόλος δεν μπορεί να υπάρξει ποτέ χωρίς

την παρουσία ενός νότιου πόλου και αντίστροφα. Ακόμη και αν φτάσουμε σε ατομικό επίπεδο, ποτέ δεν θα απομονώσουμε έναν μοναδικό πόλο, αυτό υποδεικνύει ότι και τα ίδια τα άτομα είναι μικροσκοπικοί μαγνήτες. Ένα υλικό εμφανίζεται σαν μαγνητισμένο όταν, οι μικροσκοπικές στοιχειώδεις μαγνητικές ροπές (μπορούμε να τις φανταστούμε σαν κβαντικές πυξίδες) που αντιστοιχούν σε κάθε άτομο προσανατολίζονται έτσι ώστε να παράγουν σε μακροσκοπικό επίπεδο μαγνητικό πεδίο. [7]

Άρα οι ιδιότητες και η συμπεριφορά τους εξαρτάται από την ύπαρξη των μαγνητικών ροπών και από την αλληλεπίδραση μεταξύ τους και με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται.



Σχήμα 1.2: Η μαγνήτιση σαν αποτέλεσμα του προσανατολισμού των ατομικών διπολικών ροπών. Αριστερά: οι μαγνητικές ροπές είναι τυχαία προσανατολισμένες στον χώρο, με αποτέλεσμα να έχουμε μηδενική μαγνήτιση. Δεξιά: οι μαγνητικές ροπές είναι πλήρως προσανατολισμένες και το υλικό βρίσκεται στη μαγνήτιση κόρου.

Γενικά, όλα τα υλικά έχουν μαγνητική απόκριση έστω και ασθενής. Ως μαγνητικό υλικό όμως θεωρούμε αυτό που μαγνητίζεται εύκολα και ισχυρά υπό την επιβολή ελάχιστου πεδίου, δηλαδή μας ενδιαφέρουν τα υλικά που παράγουν μεγάλο μαγνητικό πεδίο σε σχέση με το πεδίο που χρειάστηκε να τα μαγνητίσει. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα των μαγνητικών υλικών. [7]

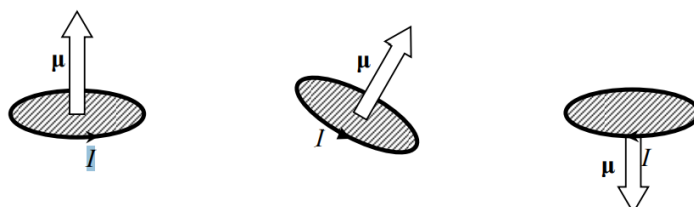
1.2.1 Μαγνητική διπολική ροπή

Ακριβώς όπως ένα ηλεκτρικό φορτίο περιβάλλεται από ηλεκτρικό πεδίο, το ίδιο φορτίο, αν κινείται περιβάλλεται και από μαγνητικό πεδίο. Δηλαδή, με τα κινούμενα φορτισμένα σωμάτια συνδέεται και ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Ουσιαστικά, το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από την κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου. Η μαγνήτιση ενός υλικού, οφείλεται στα ηλεκτρόνια των ατόμων από τα οποία αποτελείται το υλικό, καθώς τα τελευταία βρίσκονται σε διαρκή κίνηση. Όπως αναφέραμε, η προέλευση των μαγνητικών φαινομένων οφείλεται στην ύπαρξη των μαγνητικών ροπών. Ο ορισμός της μαγνητικής ροπής δίνεται από το τύπο :

$$\mu = I \cdot S \quad (1.1)$$

όπου I είναι το ρεύμα που ρέει σε έναν κυκλικό βρόχο και το S ορίζεται σαν διάνυσμα που έχει μέτρο ίσο με το εμβαδόν του βρόχου και φορά που καθορίζεται από τον

κανόνα του δεξιόστροφου κοχλίου. Με ποιοτικούς όρους, η μαγνητική ροπή εκφράζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από ένα βρόχο ρεύματος και τον βαθμό αλληλεπίδρασης αυτού του βρόχου με ένα εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι μονάδες της στο SI είναι $A \cdot m^2$.



Σχήμα 1.3: Ορισμός της μαγνητικής διπολικής ροής.

Η συνολική μαγνητική ροπή ενός υλικού είναι το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους μαγνητικών ροπών των ατόμων που το αποτελούν. Υπάρχουν οι παρακάτω συνεισφορές στην μαγνητική ροπή:

- Λόγω της τροχιακής κίνησης των ηλεκτρονίων
- Λόγω του spin του ηλεκτρονίου
- Λόγω της μεταβολής της τροχιακής στροφορμής που επάγεται από το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό είναι και το φαινόμενο του διαμαγνητισμού.
- Υπάρχει και μια τέταρτη συνεισφορά που οφείλεται στην ιδιοστροφορμή του πυρήνα. το οποίο είναι ασθενές και δεν θα το λαμβάνουμε υπόψη μας στον υπολογισμό της συνολικής μαγνητικής ροπής ενός ατόμου.

Στη συνολική μαγνητική ροπή λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δύο πρώτες συνεισφορές (της τροχιακής στροφορμής και του spin του ηλεκτρονίου), οι δύο τελευταίες είναι αρκετά ασθενείς και επισκιάζονται από τα δύο πρώτα. Άρα λόγω της τροχιακής στροφορμής και της ιδιοπεριστροφής (spin) του ηλεκτρονίου παράγονται μαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο να συμπεριφέρεται ως ένας μικροσκοπικός μαγνήτης. Σύμφωνα με το μοντέλο της κλασικής φυσικής τα ηλεκτρόνια περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα ενός ατόμου και ταυτόχρονα περιστρέφονται γύρω από τον άξονα τους (ιδιοπεριστροφή – spin). Στην πραγματικότητα γνωρίζουμε ότι δεν ισχύει ακριβώς το παραπάνω αλλά το χρησιμοποιούμε για εκπαιδευτικούς λόγους. Από την κβαντική ξέρουμε ότι τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε ηλεκτρονιακά τροχιακά με δεδομένη ενέργεια και υπακούουν σε ορισμένους κανόνες (ηλεκτρονιακή δομή). [6]

1.2.2 Ατομική μαγνητική ροπή

Ένα ηλεκτρόνιο το οποίο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα μέσα σε ένα άτομο, συμπεριφέρεται σαν να είναι ένας βρόχος ρεύματος και συνεπώς έχει μαγνητική διπολική ροπή, η οποία αποκαλείται *τροχιακή μαγνητική ροπή* (*orbital magnetic moment*), και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu_{\text{orb}} = -\frac{e}{2m_e}L \quad (1.2)$$

όπου e και m_e είναι το φορτίο και η μάζα ενός ηλεκτρονίου και L η τροχιακή του στροφορμή. Από την εξίσωση παρατηρούμε ότι η μαγνητική ροπή είναι ανάλογη της τροχιακής στροφορμής και σχετίζεται με αυτή μέσω ενός παράγοντα, $e/2m$ που ονομάζεται γυρομαγνητικός λόγος. Το ηλεκτρόνιο έχει επίσης μια εγγενή στροφορμή ή ιδιοστροφορμή (δεν έχει κλασικό ανάλογο), S , η οποία είναι γνώστη και ως spin του ηλεκτρονίου. Η μαγνητική ροπή spin συμβολίζεται με μ_{spin} και δίνεται από τη σχέση :

$$\mu_{\text{spin}} = -\frac{e}{m_e}S \quad (1.3)$$

Όπως βλέπουμε από τη σύγκριση των παραπάνω εξισώσεων, ο λόγος της μαγνητικής ροπής ως προς τη στροφορμή είναι διπλάσιος για την στροφορμή του spin . Η συνισταμένη μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου αποτελείται από το διανυσματικό άθροισμα των μ_{orb} και μ_{spin} . Έτσι για ένα ηλεκτρόνιο η πλήρης έκφραση της μαγνητικής ροπής δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \mu_{\text{orb}} + \mu_{\text{spin}} = -\frac{e}{2m_e}L - \frac{e}{m_e}S = -\frac{\mu_B}{\hbar}(L + 2S) \quad (1.4)$$

Άρα, η συνισταμένη μαγνητική ροπή μ_{atom} του ίδιου του ατόμου εξαρτάται από τις τροχιακές κινήσεις και τα spin όλων των ηλεκτρονίων του. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονίσουμε ότι στη συνολική μαγνητική ροπή, συνεισφέρουν μόνο τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε ασυμπλήρωτες στιβάδες. Σε μια συμπληρωμένη στοιβάδα για παράδειγμα, για κάθε ηλεκτρόνιο με δεδομένη L ή S υπάρχει ένα άλλο ηλεκτρόνιο με αντίθετη L ή S και ο αριθμός των ηλεκτρονίων που έχουν spin πάνω ισούται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που έχουν spin κάτω, άρα το ίδιο ισχύει και για την μ_{orb} και μ_{spin} . Κατά συνέπεια, μόνο οι μη – συμπληρωμένες υποστιβάδες συνεισφέρουν στη συνολική μαγνητική ροπή ενός ατόμου. Επίσης, όπως αναφέραμε παραπάνω, και τα πρωτόνια έχουν μαγνητική ροπή λόγω spin , αλλά η τιμή τους είναι πολύ μικρότερη από αυτή του ηλεκτρονίου και δεν την υπολογίζουμε στη συνολική μαγνητική ροπή. Αυτό συμβαίνει γιατί η μάζα του πρωτονίου είναι 1836 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου, και αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση (1.3) την μάζα του πρωτονίου, το αποτέλεσμα θα έχει αμελητέα τιμή. [6.7]

1.2.3 Μαγνήτιση

Η συνολική μαγνητική ροπή, που είναι το άθροισμα των μαγνητικών ροπών που αποτελούν το υλικό, διαιρούμενη με τον αντίστοιχο όγκο του υλικού, δίνουν την λεγόμενη *μαγνήτιση του υλικού*. Η μαγνήτιση συμβολίζεται με M και δίνεται από τον τύπο:

$$M = \frac{d\mu}{dV} \quad (1.5)$$

Όπου με $d\mu$ συμβολίζουμε το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών ροπών που περιλαμβάνονται μέσα σε όγκο dV . Ο όγκος αυτός, πρέπει να είναι στοιχειώδης, δηλαδή, αρκετά μικρότερος από τον συνολικό όγκο του υλικού, αλλά ταυτόχρονα και αρκετά μεγάλος σε σχέση με τις ατομικές διαστάσεις, ώστε να περιλαμβάνει ικανό αριθμό ατόμων ώστε να χαρακτηρίζεται μακροσκοπικός. Λέμε ότι ένα σώμα είναι μαγνητισμένο όταν όλες οι μαγνητικές ροπές που αντιστοιχούν σε κάθε του άτομο είναι προσανατολισμένες. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα κινούμενο φορτίο ή από ηλεκτρικό ρεύμα. Επίσης, μια άλλη πηγή του μαγνητικού πεδίου είναι και οι μόνιμοι μαγνήτες. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν τα συμβατικά ηλεκτρικά ρεύματα, αλλά οι τροχιακές κινήσεις καθώς και η ιδιοπεριστροφή (spin) των ηλεκτρονίων που οδηγούν στη μαγνήτιση του υλικού καθώς και στην δημιουργία μαγνητικού πεδίου στον χώρο γύρω από αυτό. [8]

Μια από τις θεμελιώδεις έννοιες του μαγνητισμού είναι το *μαγνητικό πεδίο H* ή ένταση μαγνητικού πεδίου ή μαγνητίζον πεδίο. Το H σχετίζεται με τα ρεύματα αγωγιμότητας, δηλαδή με τα εξωτερικά ρεύματα και μπορούμε να πούμε ότι ταυτίζεται με το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Όταν ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται σε ένα μέσο από κάποιο ηλεκτρικό ρεύμα, η απόκριση του μέσου είναι η *μαγνητική επαγωγή B* . Από την εξίσωση του Maxwell μέσα στην ύλη ισχύει ότι $\Delta \times B = \mu_0 (J_{\text{free}} + J_M)$. Όπως βλέπουμε από την εξίσωση υπάρχουν δύο συνεισφορές στη μαγνητική επαγωγή:

αυτή που οφείλεται στα ελεύθερα μακροσκοπικά ρεύματα σε αγωγούς και αυτή από “μικροσκοπικά” ρεύματα που αντιστοιχούν στις μαγνητικές ατομικές ροπές. Άρα

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1.6)$$

Εκτός της ύλης όπου $M=0$ ισχύει ότι $B=\mu_0 H$ δηλαδή, τα πεδία B και H είναι ισοδύναμα απλά έχουν διαφορετικές μονάδες, ενώ μέσα στην ύλη προστίθεται και η συνεισφορά της μαγνήτισης. Οι μονάδες του H και M στο SI είναι A/m, του B σε T (tesla) και του συντελεστή μ_0 σε T·m/A. Η μαγνητική διαπερατότητα (magnetic permeability) ορίζεται ως η μαγνητική επαγωγή ανά μονάδα πεδίου μαγνήτισης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.7)$$

και δείχνει το μέτρο ικανότητας ενός υλικού να υποστηρίξει τον σχηματισμό ενός πεδίου εντός του ίδιου, δηλαδή, αποτελεί τον βαθμό μαγνήτισης του υλικού σε σχέση με το πεδίο μαγνήτισης H . [6,7]

Η διαπερατότητα του κενού ονομάζεται απόλυτη διαπερατότητα μ_0 , και ισούται με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο κενό ανά μονάδα πεδίου μαγνήτισης. Η μαγνητική επαγωγή στο κενό ταυτίζεται με το εφαρμοζόμενο πεδίο, καθώς δεν υπάρχει υλικό. Η παρουσία ενός μαγνητικού υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας μ_r , η οποία ορίζεται ως ο λόγος του μαγνητικού πεδίου μέσα σε ένα υλικό προς το μαγνητικό πεδίο στο κενό, όπως φαίνεται από τον παρακάτω τύπο: [10]

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.8)$$

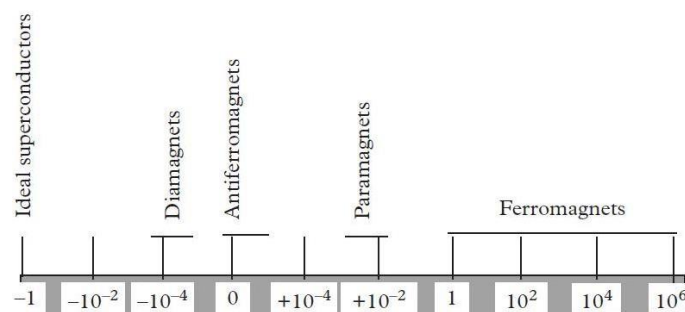
Ένα άλλο μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύγκριση μεταξύ των μαγνητικών υλικών είναι και η μαγνητική επιδεκτικότητα χ_m (susceptibility). Το μέγεθος αυτό είναι αδιάστατο και ισούται με την μαγνήτιση που επάγεται στο υλικό ανά μονάδα πεδίου μαγνήτισης σύμφωνα με τη σχέση:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (1.9)$$

Κάθε υλικό εμφανίζει διαφορετική απόκριση υπό την επιβολή ενός εξωτερικού πεδίου και επομένως και διαφορετική τιμή επιδεκτικότητας. Άρα, η μαγνητική επιδεκτικότητα μπορεί να αποτελέσει ένα κριτήριο ταξινόμησης των υλικών. Η επιδεκτικότητα και η διαπερατότητα των μαγνητικών υλικών εξαρτώνται από την θερμοκρασία και πιο αναλυτικά, μειώνονται με την αύξησή της (ειδικά στα σιδηρομαγνητικά υλικά). Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι παραπάνω σχέσεις δεν ισχύουν για όλα τα μαγνητικά υλικά. Για παράδειγμα, για τα σιδηρομαγνητικά υλικά που εμφανίζουν υστέρηση, όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι παραπάνω σχέσεις δεν είναι γραμμικές, καθώς τόσο η διαπερατότητα (μ) όσο και η επιδεκτικότητα (χ_m) διαφέρουν από σημείο σε σημείο, για αυτό τον λόγο είναι πιο χρήσιμο να ορίσουμε τα διαφορικά των αντίστοιχων μεγεθών. Τα δύο μεγέθη, το χ_m και το μ_r , συνδέονται στενά μεταξύ τους μέσω της σχέσης:

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (1.10)$$

Επίσης, στην γενικότερη περίπτωση, το μ και χ είναι τανυστές, μόνο στα ισότροπα υλικά είναι μονόμετρα μεγέθη. [9,10]

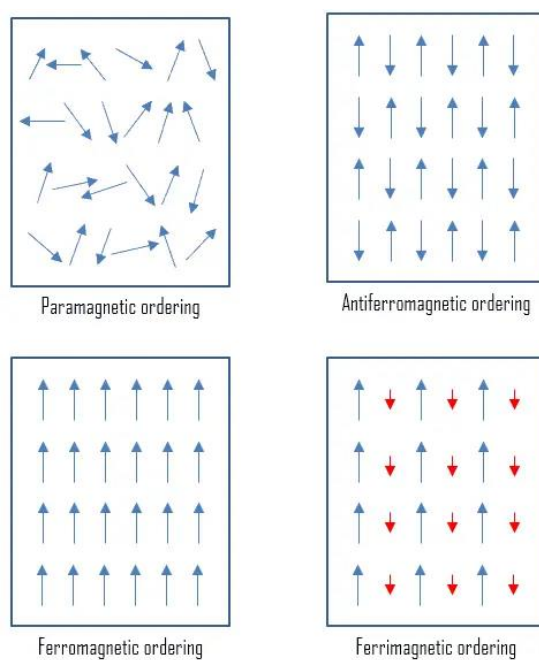


Σχήμα 1.4: Μαγνητική επιδεκτικότητα για τις διάφορες κατηγορίες μαγνητικών υλικών.

1.3 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών

Η ύπαρξη μονίμων ή όχι μαγνητικών ροπών καθώς και αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους, καθορίζουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες των μαγνητικών υλικών. Αυτές καθορίζουν και τη μαγνητική τάξη. Με βάση τα παραπάνω καθώς και με τις τιμές της επιδεκτικότητας μπορούμε να διαχωρίσουμε τα μαγνητικά υλικά σε πέντε κατηγορίες:

- ✓ Διαμαγνητικά
- ✓ Παραμαγνητικά
- ✓ Σιδηρομαγνητικά
- ✓ Αντισιδηρομαγνητικά
- ✓ Σιδηριμαγνητικά



Σχήμα 1.5: Είδη μαγνητικής τάξης.

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

Ατομικός αριθμός — Ατομικό σύμβολο
 Τυπική ιοντική αλλαγή T_N (K) — Ατομικό βάρος T_C (K)

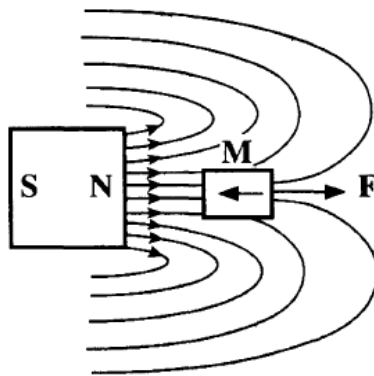
Λεγenda:

- Μη μεταλλικό
- Μεταλλικό
- Ραδιενεόν
- Διαμαγνητικά
- Παραμαγνητικά
- Σιδηρομαγνητικά $T_C > 290$ K
- Αντισιδητομαγνητικά $T_N > 290$ K
- Σιδηρομαγνητικά/Αντισιδηρομαγνητικά $T_N, T_C < 290$ K

Εικόνα 1.6 : Διάγραμμα του περιοδικού πίνακα, όπου φαίνονται τα στοιχεία χρωματισμένα ανάλογα με το είδος του μαγνητισμού που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου.

1.3.1 Διαμαγνητικά

Ο διαμαγνητισμός υπάρχει σε όλα τα υλικά, απλώς επισκιάζεται από τη μαγνητική ροπή του spin και την τροχιακή στροφορμή, για αυτό, στα συνήθη μαγνητικά υλικά η συνεισφορά αυτή είναι αμελητέα. Σε άτομα με συμπληρωμένους φλοιούς η συνολική τροχιακή στροφορμή L καθώς και η στροφορμή του spin S είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι στο σύνολό τους, τα άτομα του υλικού δεν έχουν μόνιμες μαγνητικές ροπές. Σαν αποτέλεσμα ο μοναδικός όρος που συνεισφέρει στην μαγνητική ατομική ροπή είναι ο διαμαγνητικός. Η προέλευση αυτού του όρου οφείλεται στην αλλαγή της τροχιακής στροφορμής η οποία επάγεται κατά την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Τα διαμαγνητικά υλικά έχουν αρνητική και μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα, χ_m , της τάξεως των 10^{-5} . Αρνητική επιδεκτικότητα σημαίνει ότι η διεύθυνση της μαγνήτισης είναι αντίθετη (αντιπαράλληλη) προς το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο, δηλαδή, είναι σαν το διαμαγνητικό υλικό να προσπαθεί να εκτοπίσει το εφαρμοζόμενο πεδίο και να θωρακίσει μερικώς το εσωτερικό του σώματός του από το πεδίο. Όταν ένα δείγμα διαμαγνητικού υλικού τοποθετείται μέσα σε μη-ομοιόμορφο πεδίο, τότε υφίσταται μία δύναμη που το ωθεί προς περιοχές όπου το πεδίο είναι ασθενέστερο. Λόγω αυτής, ένα διαμαγνητικό υλικό απωθείται από ένα μόνιμο μαγνήτη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.7: Απόωση ενός διαμαγνητικού υλικού από έναν μαγνήτη.

Απουσία μαγνητικού πεδίου, όλες οι μαγνητικές ροπές είναι τυχαία προσανατολισμένες και δεν υπάρχει κάποια μαγνητική συμπεριφορά, όταν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό πεδίο, τότε οι μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται με τέτοιο τρόπο στο χώρο ώστε να παράγουν μια αρνητική τιμή της επιδεκτικότητας. Διαμαγνητικά υλικά είναι τα ευγενή αέρια (με συμπληρωμένους φλοιούς), ιοντικοί και ομοιοπολικοί κρύσταλλοι καθώς και οι υπεραγωγοί που είναι τέλει διαμαγνήτες με $\chi_m = -1$. [7]

1.3.2 Παραμαγνητικά

Τα υλικά που αποτελούνται από άτομα με μόνιμες διπολικές ροπές μ οι οποίες δεν αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και έτσι μπορούν να στρέφονται ελεύθερα στον χώρο είναι *παραμαγνητικά*. Όταν δεν επιδρά εξωτερικό πεδίο και λόγω της θερμικής κίνησης, οι μαγνητικές ροπές των ατόμων έχουν τυχαίες διευθύνσεις, με αποτέλεσμα να έχουμε μηδέν μαγνήτιση. Στην περίπτωση όμως που επιδράσει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές έχουν την τάση να προσανατολίζονται παράλληλα με το πεδίο. Το εξωτερικό πεδίο προσανατολίζει μερικώς τις μαγνητικές ροπές, επειδή η θερμική κίνηση θέλει να διατηρήσει τον τυχαίο προσανατολισμό τους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας μικρής θετικής επιδεκτικότητας $\chi_m > 0$. Επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας η μαγνήτιση μειώνεται και η επιδεκτικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας (νόμος Curie), $\chi = C/T$ όπου C είναι η σταθερά Curie. Η απόκλιση από το νόμο Curie μπορεί να οφείλεται σε κάποιες αλληλεπιδράσεις ή στην ύπαρξη ανισοτροπίας, για την οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Όταν μία παραμαγνητική ουσία βρεθεί μέσα σε ένα μη ομογενές μαγνητικό πεδίο, τότε η επαγόμενη μαγνήτιση M είναι παράλληλη με το πεδίο και στην παραμαγνητική ουσία ασκείται μία ελκτική δύναμη από τον μαγνήτη, π.χ. το μοριακό οξυγόνο. Άτομα, μόρια

και ιόντα τα οποία έχουν περιττό αριθμό ηλεκτρονίων, οπότε το ολικό spin δεν είναι μηδέν, εμφανίζουν παραμαγνητισμό. Παραδείγματα είναι κάποια στοιχεία μετάβασης και σπανίων γαιών όπως το Mg, Mo, Li και το Ta. Η προέλευση του φαινομένου του παραμαγνητισμού σε αυτά τα μέταλλα είναι λόγω της ευθυγράμμισης των spin της πλειοψηφίας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας που βρίσκονται κοντά στην ενέργεια Fermi, με το επιβαλλόμενο πεδίο. Αυτή η συνεισφορά αποδεικνύεται ότι είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και αναφέρεται ως παραμαγνητισμός Pauli. [7]

1.3.3 Σιδηρομαγνητικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούν την πιο σημαντική κατηγορία μαγνητικών υλικών. Στα υλικά αυτά το διάνυσμα της μαγνήτισης έχει αρκετά μεγάλη τιμή και κατεύθυνση ίδια με αυτή του εξωτερικού πεδίου. Έχουν μαγνητική επιδεκτικότητα θετική και μεγάλη ($\chi_m \gg 0$) που εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Επίσης η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι πολύ μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu_r \gg 1$). Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μόνιμες μαγνητικές ροπές οι οποίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με θετικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής με αποτέλεσμα την παράλληλη διάταξη των μαγνητικών ροπών μεταξύ τους καθώς και με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Έτσι προκύπτει η λεγόμενη σιδηρομαγνητική τάξη και η αυθόρμητη μαγνήτιση σε μηδέν πεδίο. Το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie T_C . Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει την T_C , το υλικό χάνει την σιδηρομαγνητική του τάξη και συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό (η θερμική ενέργεια υπερσχύει της ενέργειας ανταλλαγής που κρατά τις μαγνητικές ροπές παράλληλες). Το πιο βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ο βρόχος υστέρησης στον οποίο θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στη συνέχεια. Παραδείγματα σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co) και το νικέλιο (Ni).

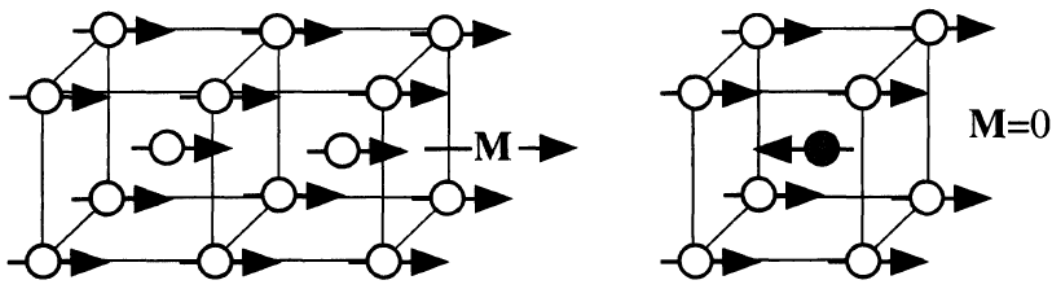
Υλικό	$\mu_0 M_s$ (T)	T_C (°C)
Fe	2.16	770
Co	1.81	1130
Ni	0.61	358

Μαγνήτισεις κόρου και θερμοκρασίες Curie στα τυπικά σιδηρομαγνητικά στοιχεία μετάπτωσης. (M_s – Μαγνήτιση κόρου – μέγιστη μαγνήτιση ενός **Σχήμα 1.8:** υλικού).

Τέλος τα σιδηρομαγνητικά υλικά, ανάλογα με την τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας χ_m ταξινομούνται σε δύο επιμέρους σημαντικές κατηγορίες υλικών: τα σκληρά μαγνητικά υλικά ($\chi_m > 10^3$) και τα μαλακά μαγνητικά υλικά ($10^2 < \chi_m < 10^3$). [7,12]

1.3.4 Αντισιδηρομαγνητικά

Το φαινόμενο του αντισιδηρομαγνητισμού λειτουργεί παρόμοια με αυτό του σιδηρομαγνητισμού, με μια διαφορά όμως, ότι στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά τα γειτονικά άτομα συνδέονται με αρνητικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής, με αποτέλεσμα να ευνοείται ενεργειακά μια κατάσταση στην οποία το κάθε spin έχει γύρω του αντιπαράλληλα διατεταγμένα spin. Τα μαγνητικά δίπολα στα υλικά αυτά έχουν ίσο μέτρο αλλά αντίθετη διεύθυνση με αποτέλεσμα να αλληλοαναιρούνται και να μηδενίζεται η συνολική εσωτερική τους ροπή. Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή και θετική μαγνητική επιδεκτικότητα και σε σύγκριση με τα σιδηρομαγνητικά δεν παρουσιάζουν παραμένονσα μαγνήτιση απουσία πεδίου. Η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά παρατηρείται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel και συμβολίζεται ως T_N . Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από την T_N το υλικό χάνει τις αντισιδηρομαγνητικές του ιδιότητες και συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό. Τα υλικά αυτά ελάχιστα επηρεάζονται από ένα εξωτερικό πεδίο. Τέτοια συμπεριφορά παρουσιάζουν τα στοιχεία μετάπτωσης όπως το Cr και το Mn καθώς και οι ενώσεις των στοιχείων αυτών με αμέταλλα όπως το MnO. [6]

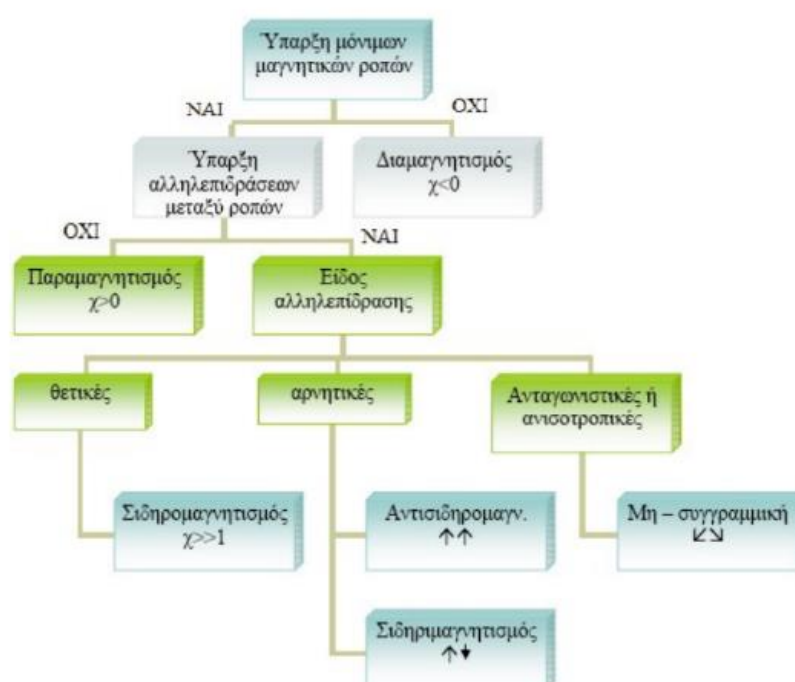


Σχήμα 1.9: Ένας σιδηρομαγνητικός και ένας αντισιδηρομαγνητικός κρύσταλλος.

1.3.5 Σιδηριμαγνητικά

Το φαινόμενο του σιδηριμαγνητισμού είναι στην ουσία μια πιο γενική περίπτωση του αντισιδηρομαγνητισμού. Όπως και στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά, οι μαγνητικές ροπές είναι αντιπαράλληλες μεταξύ τους, με τη διαφορά όμως ότι δεν έχουν ίσα μέτρα. Με άλλα λόγια οι μαγνητικές ροπές προς τη μία από τις δύο κατευθύνσεις έχουν μεγαλύτερη τιμή, άρα η αλληλοαναιρέση συμβαίνει μέχρι ένα βαθμό, με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να έχουν παραμένονσα μαγνήτιση όταν βρεθούν σε κάποιο εξωτερικό πεδίο. Αυτό μπορεί να συμβεί σε μαγνητικά υλικά που αποτελούνται από διαφορετικά άτομα ή ιόντα. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ένα σύνολο ατόμων που οι μαγνητικές τους ροπές είναι παράλληλες αποτελούν ένα υποπλέγμα. Στην περίπτωση των σιδηριμαγνητικών υλικών υπάρχουν δύο διαφορετικά υποπλέγματα A και B, που έχουν αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές αλλά με διαφορετικό μέτρο. Αυτό οδηγεί σε σημαντική διαφορά στην μαγνήτιση μεταξύ των δύο υποπλεγμάτων, με αποτέλεσμα

να έχουμε αυθόρμητη μαγνήτιση ακόμα και σε μηδενικό πεδίο. Η συνολική μαγνήτιση M είναι ίση με την διαφορά των μαγνητίσεων που αντιστοιχούν στα δύο υποπλέγματα. M_A και M_B . Πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία T_C τα σιδηρομαγνητικά υλικά συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά. Τα κυριότερα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι οι φερρίτες οι οποίοι είναι οξείδια του σιδήρου με άλλα μέταλλα. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά, λόγω της συμπεριφοράς τους, θεωρούνται μια ενδιάμεση κατηγορία μεταξύ των σιδηρομαγνητικών και αντισιδηρομαγνητικών υλικών. Τέλος, υπάρχουν και περιπτώσεις μη συγγραμμικής μαγνητικής τάξης οι οποίες προκύπτουν σαν αποτέλεσμα ανταγωνιστικών ή ανισοτροπικών αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής και μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας. Τα βασικά είδη μαγνητικής τάξης που αναφέρθηκαν συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα:[6,7]



Σχήμα 1.10: Κατηγοριοποίηση μαγνητικών υλικών.

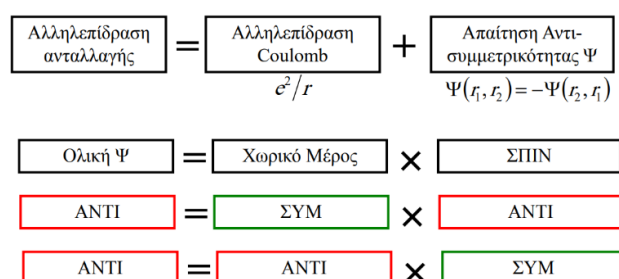
1.4 Οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής και η προέλευση τους

Ο Weiss το 1907, ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να εξηγήσει την αυθόρμητη μαγνήτιση των υλικών σαν αποτέλεσμα των μαγνητικών δυνάμεων μεταξύ των ίδιων των ροπών, όπως συμβαίνει σε μακροσκοπικό επίπεδο. Όμως αυτές οι μαγνητοστατικές αλληλεπιδράσεις που θεώρησε δεν ήταν τόσο ισχυρές ώστε να εξηγήσουν την διατήρηση της μαγνητικής τάξης σε τόσο υψηλές κρίσιμες

θερμοκρασίες (T_C). Με την ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας οι Heisenberg και Dirac μπόρεσαν να κατανοήσουν την προέλευση αυτών των αλληλεπιδράσεων και τις ονόμασαν αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής (exchange interaction). Οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής περιγράφονται από την Χαμιλτονιανή του Heisenberg που μας δίνει την ενέργεια ανταλλαγής μεταξύ δύο γειτονικών spin S_i και S_j :

$$H = -2 J_{ij} S_i S_j \quad (1.11)$$

Από τον μοντέλο Heisenberg βλέπουμε ότι η ενέργεια ανταλλαγής εξαρτάται από τον διατομικό διαχωρισμό των δύο αλληλεπιδρόντων ατόμων και από τα γειτονικά spin των δύο ηλεκτρονίων. Η σταθερά J_{ij} ονομάζεται σταθερά ανταλλαγής ή ολοκλήρωμα ανταλλαγής στην οποία συμπεριλαμβάνεται η ολοκλήρωση των κυματοσυναρτήσεων με τους διάφορους όρους της δυναμικής ενέργειας αλληλεπίδρασης. Άρα ο όρος αυτός εξαρτάται από τις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, και επομένως, από την διατομική απόσταση. Όταν το $J_{ij} > 0$ ευνοείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά (παράλληλα spin), ενώ αν $J_{ij} < 0$ προκύπτει αντιπαράλληλος αντισιδηρομαγνητικός προσανατολισμός. Ουσιαστικά, η αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων οφείλεται στην αλληλεπικάλυψη των γειτονικών ατομικών τροχιακών τους, συνεπώς και η αλληλεπίδραση ανταλλαγής. Πιο αναλυτικά, οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής είναι αποτέλεσμα της ηλεκτροστατικής άπωσης Coulomb ($e^2/2$) μεταξύ των ηλεκτρονίων και της απαίτησης της αντισυμμετρικότητας της κυματοσυνάρτησης Ψ . Είναι γνωστό ότι η κυματοσυνάρτηση Ψ που περιγράφει τα φερμιόνια, στα οποία συμπεριλαμβάνονται και τα ηλεκτρόνια, πρέπει να είναι αντισυμμετρική στην εναλλαγή των συντεταγμένων (χωρικών και spin) ενός οποιουδήποτε ζεύγους από αυτά $\Psi(1,2) = -\Psi(2,1)$. Αποτέλεσμα αυτού είναι και η απαγορευτική αρχή του Pauli, που αναφέρει ότι δύο ηλεκτρόνια δεν μπορούν να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση. Για να είναι η ολική κυματοσυνάρτηση αντισυμμετρική, αν το χωρικό μέρος είναι συμμετρικό, τότε το μέρος που έχει σχέση με τα spin πρέπει να είναι αντισυμμετρικό και αντίστροφα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.11: Σχηματικό διάγραμμα που εξηγεί την προέλευση των αντιδράσεων ανταλλαγής και την αντισυμμετρικότητα της κυματοσυνάρτησης Ψ .

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι μια καθαρά ηλεκτρικής φύσης αλληλεπίδραση όπως η Coulomb που σχετίζεται μόνο με το χωρικό μέρος, μπορεί να επηρεάζει την διάταξη των spin. Παρόλο που οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής είναι μικρής εμβέλειας (επικάλυψη γειτονικών ηλεκτρονιακών τροχιακών), τα αποτελέσματά τους όμως, είναι μεγάλης εμβέλειας (μαγνητική τάξη). Πάντως, είναι εντυπωσιακό ότι οι δυνάμεις

(απώσεις) Coulomb αποτελούν τη γενεσιουργό αιτία του μαγνητισμού (σε συνδυασμό φυσικά με την αρχή του Pauli). Η παραπάνω αλληλεπίδραση οφείλεται στην άμεση επικάλυψη των τροχιακών των γειτονικών μαγνητικών ατόμων για αυτό και ονομάζεται άμεση αλληλεπίδραση ανταλλαγής (direct exchange interaction). Σε πραγματικά υλικά εκτός από την άμεση αυτή αλληλεπίδραση, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής μεταξύ των μαγνητικών ατόμων γίνονται *έμμεσα* μέσω μη μαγνητικών ατόμων. Κάποιες από αυτές τις έμμεσες αλληλεπιδράσεις είναι οι εξής:

- Αλληλεπίδραση υπερανταλλαγής (superexchange interaction)
- Ανταλλαγή Ruderman – Kittel – Kasuya – Yoshida (RKKY)

Στην αλληλεπίδραση υπερανταλλαγής τα ηλεκτρόνια των μαγνητικών ατόμων αλληλεπιδρούν όχι μέσω άμεσης επικάλυψης των τροχιακών τους, αλλά με τη μεσολάβηση ενός μη μαγνητικού ατόμου, που παρεμβάλλεται μεταξύ τους, έτσι ώστε τα τροχιακά του να επικαλύπτονται με τα τροχιακά των μαγνητικών ατόμων. Η υπερανταλλαγή χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Kramers, όταν παρατηρήθηκε ότι μπορεί να υπάρχει ασθενής μαγνητική σύζευξη μεταξύ ιόντων, ακόμα και όταν αυτά χωρίζονται από αρκετές διαμαγνητικές ομάδες, δηλαδή, αποτελεί το βασικό μηχανισμό ανταλλαγής σε οξείδια και μονωτές. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το MnO . Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγνητικών ατόμων Mn πραγματοποιείται από το διαμαγνητικό O μεταξύ των τροχιακών του 3d του μετάλλου και του τροχιακού 2p του O. Παρ'όλο που ο δεσμός $\text{Mn}^{2+}(\text{3d}^5) - \text{O}^{2-}(\text{2p}^6) - \text{Mn}^{2+}(\text{3d}^5)$ είναι κατά βάση ιοντικός, επιτρέπει όμως κάποια ανταλλαγή ηλεκτρονίου. Οι διάφορες περιπτώσεις περιγράφονται από τους λεγόμενους κανόνες Goodenough – Kanamori – Anderson (GKA). Ο πρώτος κανόνας αναφέρει ότι: « Η ανταλλαγή σε γωνία 180° μεταξύ δύο ημι-γεμάτων τροχιακών είναι αντισιδηρομαγνητική» ενώ ο δεύτερος κανόνας ότι: «Η υπερ-ανταλλαγή σε γωνία 90° μεταξύ δύο ημι-γεμάτων τροχιακών είναι ασθενής σιδηρομαγνητική». Γενικά, η αλληλεπίδραση υπερανταλλαγής είναι πολύ ευαίσθητη στη γωνία και το μήκος του δεσμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μαζί με την σύζευξη σπιν – τροχιάς μπορεί να οδηγήσει σε όρο ανταλλαγής της μορφής $S_1 \times S_2$ που ευνοεί κάθετη σύζευξη, την λεγόμενη σύζευξη Dzyaloshinsky -Moriya). Η ανταλλαγή (RKKY) απαντάται σε μεταλλικά συστήματα των στοιχείων μετάπτωσης. Ο ενδιαμέσος είναι τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Σε αυτό το είδος ανταλλαγής θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στη συνέχεια. [6,7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής, όπως αναφέραμε, τείνουν να παραλληλίζουν τις μαγνητικές ροπές μεταξύ τους σε μικροσκοπικό επίπεδο, με αποτέλεσμα το υλικό να εμφανίζει αυθόρμητη μαγνήτιση (ακόμη και σε έλλειψη εξωτερικού πεδίου) σε μακροσκοπικό επίπεδο. Επίσης, λόγω της ενέργειας Zeeman, οι μαγνητικές ροπές τείνουν να προσανατολιστούν και με το εξωτερικό πεδίο. Και οι δύο αυτοί όροι οδηγούν στην ελαχιστοποίηση της δυναμικής ενέργειας και θα περίμενε κανείς ότι οι μαγνητικές ροπές θα υπάκουαν σε αυτούς τους όρους, αφού αυτό είναι ενεργειακά συμφέρον. Από πειραματικές παρατηρήσεις όμως, έχει διαπιστωθεί ότι δεν ισχύει ακριβώς το παραπάνω, καθώς τα μαγνητικά υλικά χωρίζονται σε μαγνητικές περιοχές και εμφανίζουν φαινόμενα υστέρησης. Τα φαινόμενα υστέρησης οφείλονται σε μετασταθείς καταστάσεις, δηλαδή είναι σαν ενεργειακοί φραγμοί που εμποδίζουν την αντιστροφή της μαγνήτισης και προέρχονται από αυτό που ονομάζουμε μαγνητική ανισοτροπία. Η λέξη *ανισοτροπία* σημαίνει ότι μια ιδιότητα δεν είναι ίδια σε όλες τις διευθύνσεις, άρα, *μαγνητική ανισοτροπία* είναι η ιδιότητα ενός υλικού να μαγνητίζεται προτιμητέα σε κάποιον άξονα και περιγράφεται από την ενέργεια ανισοτροπίας. [10] Ο προτιμημένος άξονας προσανατολισμού ονομάζεται *άξονας εύκολης μαγνήτισης*, που αντιστοιχεί σε χαμηλή ενέργεια ανισοτροπίας, ενώ ο άξονας που αντιστοιχεί σε υψηλή ενέργεια ονομάζεται *άξονας δύσκολης μαγνήτισης*. Με απλά λόγια, η ενέργεια ενός μαγνητικού υλικού (σιδηρομαγνήτη) εξαρτάται από την κατεύθυνση της μαγνήτισής του σε σχέση με τους εύκολους άξονες της δόμησής του. [13]

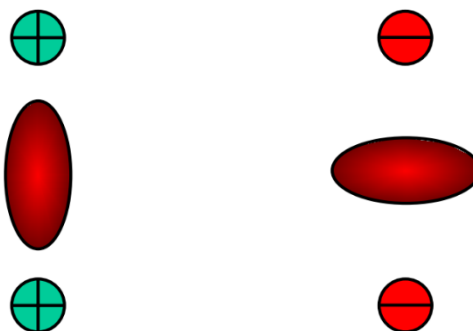
Έτσι, όταν ένα μαγνητικό υλικό βρεθεί μέσα σε ένα εξωτερικό πεδίο, πρώτα θα μαγνητιστεί στον εύκολο άξονα και μετά, όσο αυξάνουμε την ένταση του πεδίου, μπορεί να μαγνητιστεί στην κατεύθυνσή του. Επίσης, η μαγνητική ανισοτροπία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και έτσι ένα υλικό μπορεί να έχει διαφορετικά είδη ανισοτροπίας σε διαφορετικές θερμοκρασιακές περιοχές. Συνδέεται άμεσα με το συνεκτικό πεδίο και με την παραμένουσα μαγνήτιση και επηρεάζει έτσι την μορφή των βρόχων υστέρησης. Από τεχνολογική άποψη αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την μαγνητική συμπεριφορά ενός υλικού καθώς και την καταλληλότητά του για διάφορες εφαρμογές. Για τα σκληρά μαγνητικά υλικά, για παράδειγμα, είναι προαπαιτούμενο να έχουν υψηλή ανισοτροπία ενώ για τα μαλακά μαγνητικά υλικά απαιτείται σχεδόν μηδενική ανισοτροπία. Ανάλογα με τους άξονες στους οποίους αναφέρεται και τους φυσικούς μηχανισμούς που οδηγούν στην εμφάνισή της αντίστοιχα, μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω είδη ανισοτροπίας:

- *Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία*: σε σχέση με τους κρυσταλλογραφικούς άξονες
- *Ανισοτροπία σχήματος*: σε σχέση με κάποιον άξονα συμμετρίας ενός μη σφαιρικού υλικού
- *Μαγνητοελαστική ανισοτροπία*: σε σχέση με τη διεύθυνση στην οποία ασκείται μηχανική τάση
- *Επιφανειακή ανισοτροπία*: σε σχέση με κάποια επιφάνεια ή διεπιφάνεια. [6,14]

2.2 Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία

Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία αποτελεί μια ενδογενή ιδιότητα ενός σιδηρομαγνήτη, δηλαδή είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος και τη μορφή των περιοχών. [15]

Η προέλευσή της είναι ηλεκτροστατική και όχι μαγνητοστατική, (όπως και οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής) και οφείλεται στη σύζευξη ηλεκτρονιακών τροχιακών με το κρυσταλλικό πλέγμα μέσω του κρυσταλλικού πεδίου (το ηλεκτρικό πεδίο που παράγουν τα γειτονικά ιόντα) και στην αλληλεπίδραση σπιν – τροχιάς (spin – orbit). Πιο αναλυτικά, αν το τροχιακό ενός ηλεκτρονίου δεν είναι σφαιρικά συμμετρικό (μη μηδενική τροχιακή στροφορμή), τότε η κατανομή των ηλεκτρονιακών τροχιακών επηρεάζεται και προσανατολίζεται από το κρυσταλλικό πεδίο των γειτονικών ιόντων του κρυσταλλογραφικού πλέγματος. Σαν συνέπεια έχουμε τον προσανατολισμό της τροχιακής στροφορμής προς ορισμένους κρυσταλλογραφικούς άξονες (σχήμα 2.1). Επίσης, λόγω της σύζευξης σπιν – τροχιάς ($L \cdot S$) έχουμε προσανατολισμό και του σπιν και συνεπώς της συνολικής μαγνητικής ροπής του ατόμου. Η εύκολη διεύθυνση ενός κρυστάλλου είναι αυτή της αυθόρμητης μαγνήτισης όταν ο κρύσταλλος είναι απομαγνητισμένος. Όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό πεδίο σε έναν κρύσταλλο, τότε αυτό προσπαθεί να αλλάξει την κατεύθυνση του σπιν του ηλεκτρονίου και να το προσανατολίζει με την κατεύθυνσή του, η τροχιά τείνει επίσης να αλλάξει κατεύθυνση, αλλά λόγω της σύζευξής της με το πλέγμα αντιστέκεται. Ουσιαστικά, η ενέργεια ανισοτροπίας, η οποία είναι η περιστροφή του spin μακριά από τον εύκολο άξονα, είναι τελικά η ενέργεια που οφείλεται στη σύζευξη σπιν – τροχιάς. [16,17]



Σχήμα 2.1: Απλουστευτική εξήγηση του μηχανισμού εμφάνισης της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας. Το κρυσταλλικό ηλεκτρικό πεδίο τείνει να προσανατολίσει την ασφαιρική κατανομή του ηλεκτρονικού νέφους που συνδέεται με την τροχιακή στροφορμή σε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις.

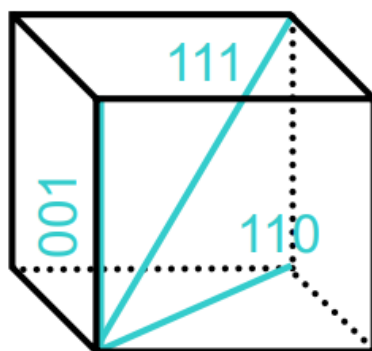
Η συμμετρία του πλέγματος καθορίζει τη συμμετρία των ηλεκτρονιακών καταστάσεων. Όποτε, όταν έχουμε υψηλή συμμετρία, έχουμε και χαμηλή ανισοτροπία. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του σιδήρου, Fe, η ανισοτροπία των 3d ατόμων είναι χαμηλή επειδή βρίσκεται σε ένα κυβικό περιβάλλον, που έχει υψηλή συμμετρία. Αν όμως βρεθεί σε ομοαξονικές κρυσταλλικές δομές, θα έχει υψηλή ανισοτροπία και αυτό

συμβαίνει στην περίπτωση κάποιων κραμάτων του Co. Η ισχύς και η διεύθυνση της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας είναι αποτέλεσμα ανταγωνισμού διαφόρων ενεργειακών όρων που προέρχονται από αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής (E_{EX}), την $\lambda L \cdot S$ σύζευξη και την σύζευξη τροχιάς – πλέγματος μέσω του κρυσταλλικού πεδίου (E_C). Στην μελέτη των υλικών, και κυρίως όσο πλησιάζουμε προς τις τεχνολογικές εφαρμογές, είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιήσουμε φαινομενολογικές εκφράσεις για την περιγραφή της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας ξεχνώντας έτσι την ατομική της προέλευση. Αυτές οι εκφράσεις περιέχουν την συμμετρία του κρυσταλλογραφικού πλέγματος, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και δίνουν την ελεύθερη ενέργεια, ανά μονάδα όγκου, σαν συνάρτηση της γωνίας που σχηματίζει η μαγνήτιση ως προς τις διάφορες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις. Περιέχουν σαν παραμέτρους τις σταθερές μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας, οι τιμές των οποίων καθορίζουν την μαγνητική συμπεριφορά του υλικού. Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία περιλαμβάνει κάποια επιμέρους είδη:

Την κυβική ανισοτροπία για κυβικά κρυσταλλογραφικά συστήματα και την μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία που αναφέρεται σε εξαγωνικά και τετραγωνικά πλέγματα. Στα πλαίσια της συμμετρίας του κυβικού πλέγματος η ανά μονάδα όγκου μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση των $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ως εξής:

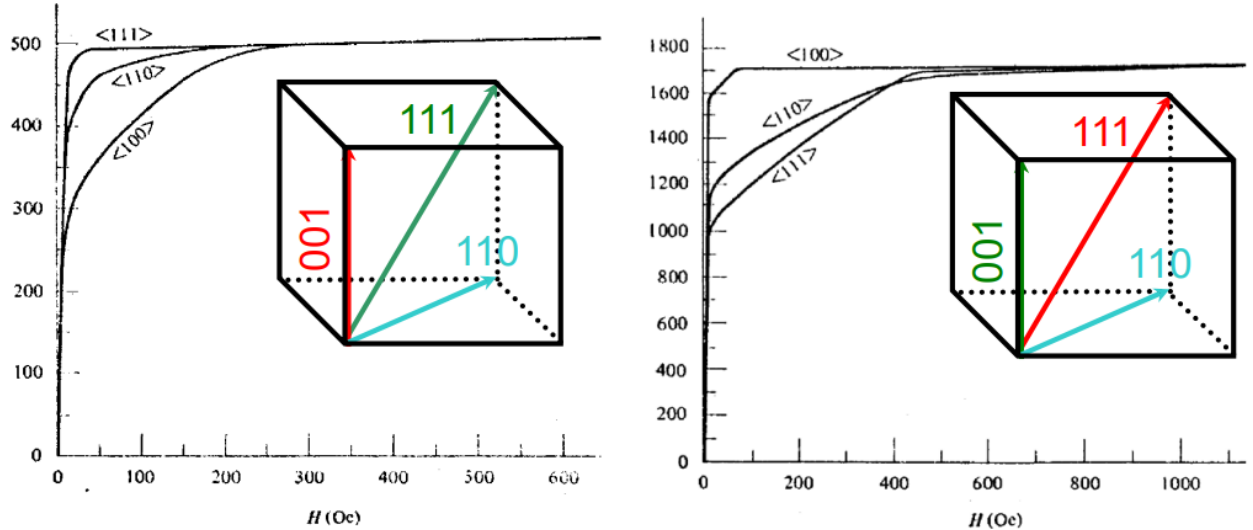
$$E = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots \quad (2.1)$$

Όπου: $\alpha_1 = \cos\theta_1$, $\alpha_2 = \cos\theta_2$ και $\alpha_3 = \cos\theta_3$ και θ_1, θ_2 , και θ_3 είναι οι γωνίες που σχηματίζει η μαγνήτιση με τους άξονες x, y, z αντίστοιχα. Συνήθως οι όροι ανώτερης τάξης δεν χρειάζονται και το K_2 είναι τόσο μικρό που μπορεί να αγνοηθεί.



Σχήμα 2.2: Οι τρεις κύριες διευθύνσεις σε ένα κυβικό πλέγμα

Όταν το K_2 είναι μηδενικό η διεύθυνση εύκολης μαγνήτισης καθορίζεται από το πρόσημο του K_1 . Για θετικές τιμές του K_1 ισχύει ότι $E_{100} < E_{110} < E_{111}$ και η εύκολη διεύθυνση μαγνήτισης είναι η $\langle 100 \rangle$ ενώ η $\langle 111 \rangle$ είναι η διεύθυνση δύσκολης μαγνήτισης. Για αρνητικές τιμές του K_1 ισχύει ότι $E_{100} > E_{110} > E_{111}$, άρα η $\langle 111 \rangle$ είναι η διεύθυνση εύκολης μαγνήτισης, ενώ η $\langle 100 \rangle$ είναι η δύσκολη διεύθυνση. Όταν το K_2 είναι διάφορο του μηδενός τότε η διεύθυνση εύκολης μαγνήτισης καθορίζεται από τις τιμές των K_1 και K_2 . [6.18]



Σχήμα 2.3: Καμπύλες μαγνήτισης για Ni (αριστερά) και Fe (δεξιά) όταν το εξωτερικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος διαφορετικών κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων.

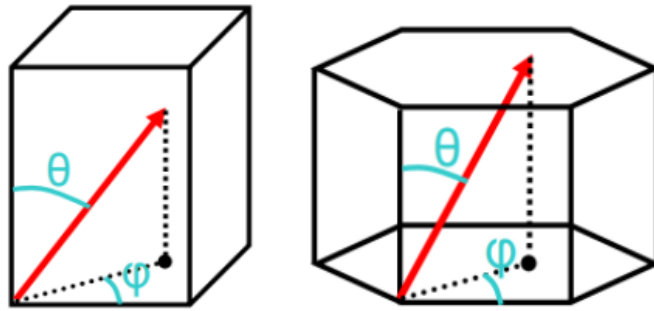
Στα παραπάνω διαγράμματα τα οποία περιγράφουν τις καμπύλες μαγνήτισης δύο σιδηρομαγνητικών υλικών του Ni και του Fe σε διαφορετικές κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις, το πράσινο χρώμα αναφέρεται στον εύκολο άξονα μαγνήτισης, το κόκκινο στον δύσκολο άξονα ενώ το γαλάζιο σε ενδιάμεσες καταστάσεις. Συνεπώς, για το Ni η εύκολη διεύθυνση είναι η $\langle 111 \rangle$ ενώ η δύσκολη η $\langle 100 \rangle$, και για τον Fe αντίστοιχα έχουμε ότι $\langle 100 \rangle$ εύκολη διεύθυνση και $\langle 111 \rangle$ είναι η δύσκολη. Επίσης, το εμβαδόν μεταξύ των καμπύλων μαγνήτισης διαφορετικών διευθύνσεων, ισούται με την ενέργεια ανισοτροπίας, δηλαδή με την ενέργεια που χρειάζεται η μαγνήτιση να αντιστραφεί από μια συγκεκριμένη διεύθυνση στην άλλη. Όσον αφορά την μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία σε εξαγωνικά ή τετραγωνικά πλέγματα, αυτή μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της γωνίας θ που σχηματίζει η μαγνήτιση ως προς τον κρυσταλλογραφικό άξονα c και της γωνίας φ πάνω στο επίπεδο μαγνήτισης, το οποίο είναι κάθετο στον άξονα c . Οι εκφράσεις για τα αντίστοιχα πλέγματα είναι:

$$\text{Για τετραγωνικό: } E = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_2 \sin^4 \theta \cos 4\varphi \quad (2.2)$$

$$\text{Για εξαγωνικό : } E = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K_3 \sin^6 \theta + K_3 \sin^6 \theta \cos 6\varphi \quad (2.3)$$

Οι εκφράσεις αυτές είναι συμβατές με την συμμετρία του κάθε πλέγματος και συνήθως οι δύο πρώτοι όροι είναι αρκετοί για να περιγράψουν την ανισοτροπία, καταλήγοντας στην κοινή έκφραση που περιγράφει εξαγωνικούς και τετραγωνικούς κρυστάλλους:

$$E = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta \quad (2.4)$$



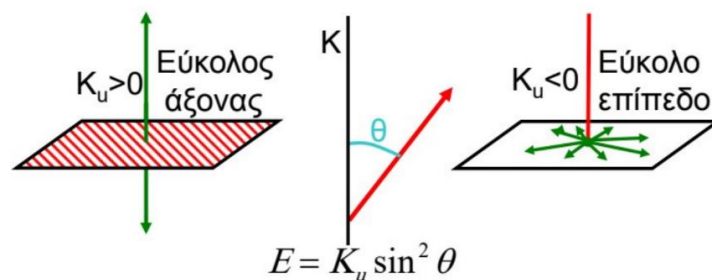
Σχήμα 2.4: Οι γωνίες θ , ϕ μέσω των οποίων εκφράζεται η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία σε εξαγωνικό και τετραγωνικό πλέγμα.

Η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση από άποψη εφαρμογών είναι αυτή που ο μόνος κυρίαρχος όρος είναι ο K_1 και δίνεται από την παρακάτω έκφραση :

$$E = K_u \sin^2 \theta \quad \text{όπου } K_u = K_1. \quad (2.5)$$

Σε αυτή την κατηγορία ανισοτροπίας περιλαμβάνονται και κυρίαρχοι όροι από άλλα είδη ανισοτροπίας (π.χ. σχήματος) εκτός της μαγνητοκρυσταλλικής. Με βάση την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- $\theta = 0$ όταν $K_u > 0$ εύκολος άξονας μαγνήτισης παράλληλα στον άξονα c και κάθετα στο επίπεδο.
- $\theta = \pi/2$ όταν $K_u < 0$ εύκολος άξονας μαγνήτισης κάθετα στον άξονα c και παράλληλα στο επίπεδο.



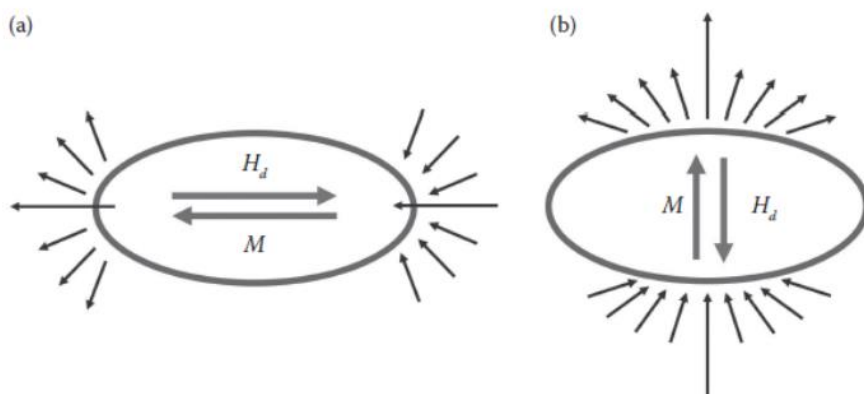
Σχήμα 2.5: Απεικόνιση των κατευθύνσεων της ανισοτροπίας στην περίπτωση ομοαξονικής ανισοτροπίας. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε εύκολο άξονα μαγνήτισης κάθετα στο επίπεδο ενώ στη δεύτερη περίπτωση εύκολο άξονα παράλληλα στο επίπεδο.

Όπως έχουμε αναφέρει, η βασική περίπτωση της ανισοτροπίας στη συμπεριφορά ενός μαγνητικού υλικού είναι η ανάπτυξη του συνεκτικού πεδίου. Η περίπτωση του εύκολου άξονα μαγνήτισης είναι η πιο χρήσιμη, εφόσον στην περίπτωση του εύκολου επιπέδου

η ανισοτροπία δεν μπορεί να εμποδίσει την αντιστροφή της μαγνήτισης και να οδηγήσει στην εμφάνιση υψηλού συνεκτικού πεδίου. [6]

2.3 Ανισοτροπία σχήματος (shape anisotropy)

Η ανισοτροπία σχήματος αναφέρεται στην εξάρτηση της μαγνητοστατικής ενέργειας από τη διεύθυνση κατά την οποία ένα δείγμα μαγνητίζεται. Αυτή δεν αποτελεί ενδογενούς ιδιότητα του υλικού (όπως η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία), καθώς εξαρτάται μακροσκοπικά από το σχήμα του δείγματος και των κόκκων που την αποτελούν. Η εφαρμογή εξωτερικού πεδίου σε ένα δείγμα το οποίο έχει σφαιρικό σχήμα, θα προκαλέσει την ίδια μαγνήτιση στο δείγμα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και αν εφαρμοστεί. Αλλά για μη σφαιρικό σχήμα υπάρχει εύκολος και δύσκολος άξονας μαγνήτισης, με τον εύκολο άξονα να είναι κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασής του και τον δύσκολο κατά τον πιο μικρό σε μήκος άξονα. Η ανισοτροπία σχήματος πηγάζει από το απομαγνητίζον πεδίο H_d , το οποίο λόγω της μη σφαιρικής συμμετρίας του δείγματος, δεν είναι ίδιο σε όλες τις κατευθύνσεις. Το πεδίο απομαγνήτισης H_d είναι το πεδίο που δημιουργείται από την ίδια την μαγνήτιση του υλικού, καθώς ένα μαγνητισμένο υλικό δημιουργεί μαγνητικούς πόλους στην επιφάνειά του.



Σχήμα 2.6: Η μαγνήτιση (M) και το πεδίο απομαγνήτισης (H_d) σε ένα ελλειψοειδές όταν το εξωτερικό πεδίο εφαρμόζεται (a) στην κατεύθυνση του μακρύτερου άξονα και (b) του κοντύτερου άξονα. Το H_d είναι μεγαλύτερο για το b λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας πόλων.

Το H_d δίνεται από την παρακάτω εξίσωση και είναι ανάλογο της μαγνήτισης M :

$$H_{di} = -N_{ij}M_j \quad i, j = x, y, z \quad (2.6)$$

Το N_{ij} ονομάζεται παράγοντας απομαγνήτισης και όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση συνδέει τη μαγνήτιση του υλικού με το απομαγνητίζον πεδίο και εξαρτάται από τη διεύθυνση που επιβάλλει το πεδίο. Ο παράγοντας απομαγνήτισης στην γενικότερη περίπτωση είναι ένας τανυστής, το οποίο αναπαρίσταται από ένα συμμετρικό πίνακα 3×3 με ίχνος 1. Κατά μήκος των κύριων αξόνων ενός ελλειψοειδούς σχήματος, οι κύριες συνιστώσες του N σε διαγώνια διάταξη (N_x, N_y, N_z) συνδέονται με τη σχέση:

$$N_x + N_y + N_z = 1 \quad (2.7)$$

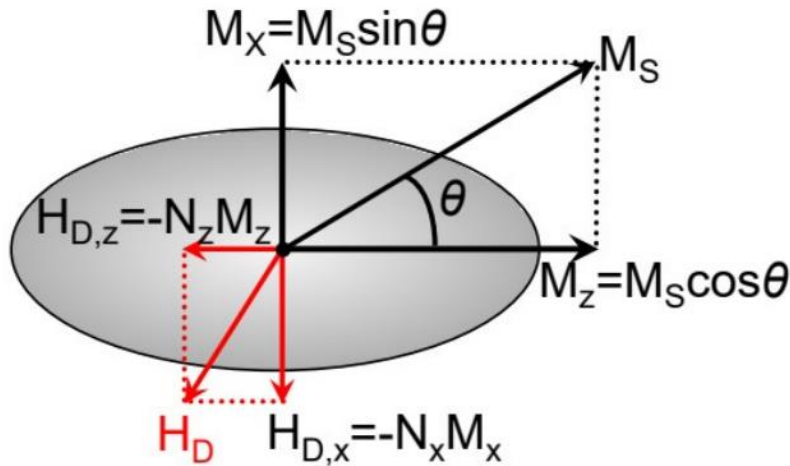
Και το πεδίο απομαγνήτισης στους κύριους άξονες x,y,z δίνεται αντίστοιχα από τις εξής εξισώσεις:

$$H_{D,x} = -N_x M_x, \quad H_{D,y} = -N_y M_y, \quad H_{D,z} = -N_z M_z \quad (2.8)$$

Σε μη σφαιρικά σχήματα το πεδίο απομαγνήτισης είναι μεγαλύτερο κατά μήκος των κοντύτερων αξόνων και αντίστοιχα μικρότερο κατά μήκος των μακρύτερων αξόνων. Η ανά μονάδα όγκου μαγνητοστατική ενέργεια της αλληλεπίδρασης του πεδίου απομαγνήτισης με τη μαγνητική ροπή του δείγματος είναι:

$$E_{ms} = \frac{1}{2} \frac{\mu(\mu_0 \mathbf{H})}{V} = -\frac{1}{2} M (\mu_0 H_D) = \frac{1}{2} \mu_0 (N_x M_x^2 + N_y M_y^2 + N_z M_z^2) \quad (2.9)$$

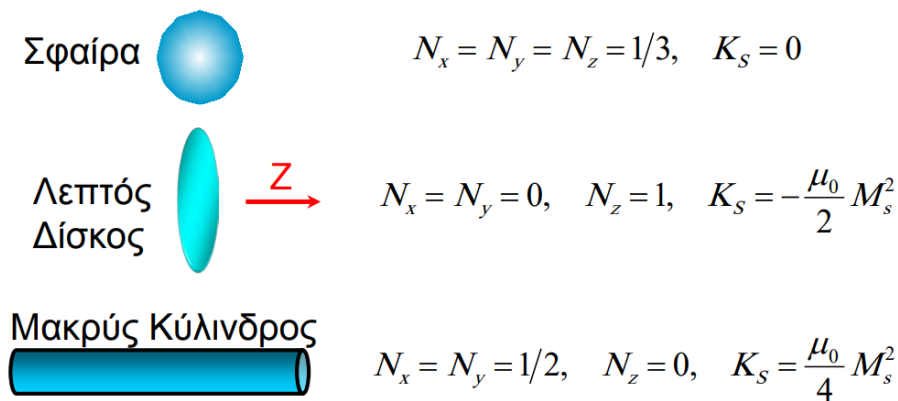
Η εξίσωση αυτή θα ελαχιστοποιείται κατά μήκος των μακρύτερων αξόνων που θα έχουν και μικρότερες τιμές του N. Ο παράγοντας 1/2 επηρεάζεται λόγω της αυτοενέργειας του υλικού, δηλαδή ότι η μαγνήτιση του υλικού παράγει η ίδια το απομαγνητίζον πεδίο και λόγω της ιδιοενέργειας, που σημαίνει ότι, κάθε αλληλεπίδραση διπόλου – διπόλου να μην συμβάλει δύο φορές στο τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 2.7: Ανισοτροπία σχήματος σε ελλειψοειδές σαν αποτέλεσμα της εξάρτησης της μαγνητοστατικής ενέργειας από την διεύθυνση μαγνήτισης. Η μαγνητοστατική ενέργεια της μαγνήτισης μέσα στο πεδίο απομαγνήτισης, όταν οι παράγοντες μαγνήτισης διαφέρουν κατά μήκος των κυρίων αξόνων, εξαρτάται από τη διεύθυνση της μαγνήτισης.

Η σταθερά της ανισοτροπίας σχήματος συμβολίζεται με K_s και δίνεται από την εξίσωση:

$$K_s = \frac{\mu_0}{2} (N_x - N_z) M_s^2 \quad (2.10)$$



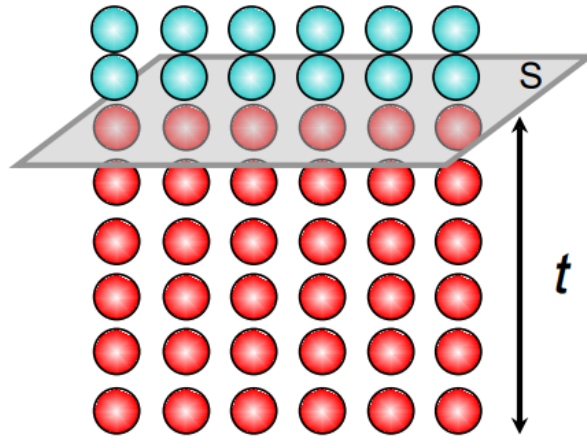
Σχήμα 2.8: Σταθερές ανισοτροπίας σχήματος για απλά σχήματα.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η σταθερά ανισοτροπίας για κάποια χαρακτηριστικά σχήματα δειγμάτων. Παρατηρείται ότι για επιμήκη σχήματα η σταθερά σχήματος είναι θετική ($K_s > 0$) ενώ για πεπλατυσμένα είναι αρνητική ($K_s < 0$). Για αυτό, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης είναι πάντα κατά μήκος των μακρύτερων αξόνων συμμετρίας του σχήματος που θα έχουν και μικρότερες τιμές N . Τέλος, από όλες τις μορφές ανισοτροπίας, η ανισοτροπία σχήματος είναι η μόνη που είναι καθαρά μαγνητοστατική. [6,19]

2.4 Επιφανειακή ανισοτροπία (surface anisotropy)

Η επιφανειακή ανισοτροπία, η οποία ονομάζεται και Neel's anisotropy μελετήθηκε για πρώτη φορά από τον Neel και οφείλεται στη μειωμένη συμμετρία της επιφάνειας (ή της διεπιφάνειας μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών) μιας και ο αριθμός (ή το είδος) των γειτόνων ενός ατόμου στην επιφάνεια ή διεπιφάνεια αντίστοιχα, διαφέρει σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στον όγκο του. [6]

Η μορφή αυτή της ανισοτροπίας πηγάζει από το γεγονός ότι τα επιφανειακά σπιν έχουν μικρότερο αριθμό γειτόνων από τα εσωτερικά σπιν, άρα, τα επιφανειακά άτομα αντιλαμβάνονται διαφορετικό περιβάλλον από αυτά στο εσωτερικό, με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικές ιδιότητες από τα άτομα που βρίσκονται στον όγκο του υλικού. Αναφερόμαστε κυρίως σε νανοδομημένα υλικά όπως είναι π.χ. τα νανοσωματίδια και τα λεπτά υμένια, τα οποία έχουν πολύ μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο τους, και έτσι ο αριθμός των επιφανειακών σπιν γίνεται σημαντικός με αποτέλεσμα η συνεισφορά της επιφανειακής ανισοτροπίας να είναι σημαντική σε αυτό το είδος υλικών σε σχέση με τα συμπαγή υλικά που είναι αμελητέα. [20]



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση της επιφανειακής ανισοτροπίας ως αποτέλεσμα της μειωμένης συμμετρίας στην επιφάνεια ή διεπιφάνεια ενός υλικού. Το πάχος του μαγνητικού στρώματος συμβολίζεται με t , ενώ το εμβαδόν της διεπιφάνειας με S .

Στα λεπτά υμένια, η συνολική μαγνητική ανισοτροπία (την οποία την ονομάζουμε και ‘δρώσα’) δίνεται από την ακόλουθη φαινομενολογική έκφραση:

$$K_{\text{eff}} = K_V + \frac{2K_S}{t} \quad (2.11)$$

Όπου K_V είναι η σταθερά ανισοτροπίας του συμπαγούς υλικού, K_S η σταθερά επιφανειακής ανισοτροπίας και t το πάχος του μαγνητικού στρώματος. Η K_V στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχει δύο συνεισφορές:

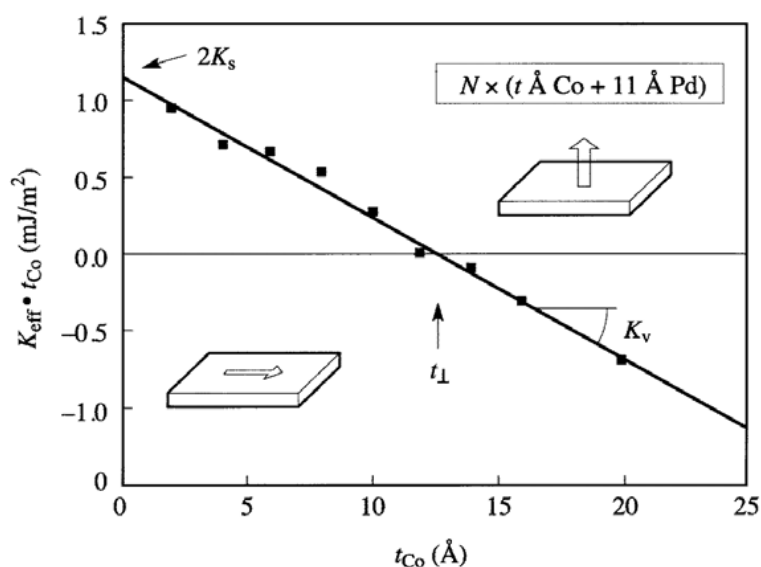
$$K_V = K_{\text{mc}} - \frac{1}{2}\mu_0 M_S^2 \quad (2.12)$$

τη μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία K_{mc} που εξαρτάται από την κρυσταλλογραφική διεύθυνση ανάπτυξης του υμενίου και την ανισοτροπία σχήματος που είναι ισχυρά αρνητική και τείνει να προσανατολίζει τη μαγνήτιση στο επίπεδο του πολυστρωματικού υμενίου. Επίσης, στον λόγο $\frac{2K_S}{t}$ παρατηρούμε ότι το $1/t$ προέρχεται από τη σχέση επιφάνειας – όγκου σε ένα λεπτό υμένιο και ο παράγοντας 2 εμφανίζεται γιατί θεωρούμε ότι κάθε μαγνητικό στρώμα βρίσκεται ανάμεσα σε δύο πανομοιότυπες διεπιφάνειες. Συχνά, είναι πιο χρήσιμο η παραπάνω εξίσωση να δίνεται στη μορφή:

$$K_{\text{eff}} = K_V t + 2K_S \quad (2.13)$$

μέσω της οποίας μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των K_V και K_S . Αν σχεδιαστεί το K_{eff} σαν συνάρτηση του πάχους t , τότε προκύπτει μια ευθεία, η κλίση της οποίας σχετίζεται με την σταθερά K_V και η τομή με τον άξονα των y δίνει την K_S . Αν τα K_S και K_V έχουν διαφορετικό πρόσημο τότε θα υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του πάχους του μαγνητικού στρώματος $t_c = -K_S/K_V$, όπου θα έχουμε αλλαγή στο πρόσημο του K_{eff} . Αυτό σημαίνει ότι για τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή t_c η συνεισφορά των διεπιφανειών επικρατεί έναντι της συνεισφοράς του όγκου, με αποτέλεσμα το σύστημα να εμφανίζει κάθετη μαγνητική ανισοτροπία (η οποία είναι πολύ σημαντική στην

κάθετη μαγνητική εγγραφή) ενώ για τιμές μεγαλύτερες του t_c εμφανίζει επίπεδη ανισοτροπία.



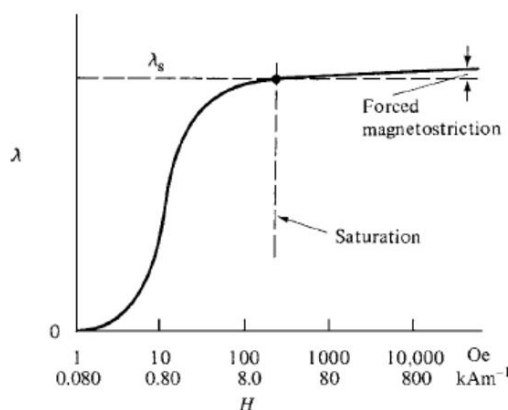
Σχήμα 2.10: Διάγραμμα K_{eff} σαν συνάρτηση του t για πολυστρωματικά υμένια Co/Pd.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι όταν η K_{eff} παίρνει θετικές τιμές, η επιφανειακή ανισοτροπία (η τιμή της οποίας είναι πάντα θετική) μπορεί να επιβάλει στο υμένιο μια κάθετη μαγνήτιση ενώ οι αρνητικές της τιμές αντιστοιχούν σε μαγνήτιση παράλληλα στο επίπεδο του υμενίου. Επίσης, από το διάγραμμα φαίνεται ότι η τιμή της K_s είναι πάντα θετική ($K_s > 0$) ενώ η τιμή της σταθεράς ανισοτροπίας όγκου είναι αρνητική ($K_v < 0$), και ειδικά η ανισοτροπία σχήματος. Οπότε, για να επιτευχθεί κάθετη μαγνητική ανισοτροπία θα πρέπει η επιφανειακή συνεισφορά να είναι μεγαλύτερη της ανισοτροπίας όγκου. [18]

2.5 Μαγνητοελαστική Ανισοτροπία

Η εξάρτηση των αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής από τις ενδοατομικές αποστάσεις των ατόμων, έχει σαν αποτέλεσμα την σύνδεση του μαγνητισμού με τις μηχανικές ιδιότητες σε ένα μαγνητικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι κάθε αλλαγή που συμβαίνει στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού έχει άμεση σχέση με την μαγνητική ανισοτροπία. Όπως γνωρίζουμε, μεταξύ των κρυσταλλικών επιπέδων ενός υλικού μπορούν να αναπτυχθούν τάσεις ή να υπάρχουν παραμένουσες τάσεις οι οποίες έχουν προκύψει από διάφορες αιτίες. Οι τάσεις αυτές οδηγούν σε ένα νέο είδος ανισοτροπίας η οποία ονομάζεται *μαγνητοελαστική ανισοτροπία*, δηλαδή, αναφέρεται στη μεταβολή της κατεύθυνσης της μαγνήτισης σαν αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης ελαστικής τάσης. [6,13]

Η μαγνητοελαστική ανισοτροπία είναι το αντίθετο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, όπου έχουμε μεταβολή των διαστάσεων του υλικού λόγω της αλλαγής της κατεύθυνσης της μαγνήτισης. Όταν ένας κρύσταλλος βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο που είναι παράλληλο προς την εύκολη διεύθυνσή του, τότε επιμηκύνεται σε αυτή τη διεύθυνση και συστέλλεται στις κάθετες διευθύνσεις. Η μία κίνηση αντιτίθεται στην κίνηση της άλλης και έτσι προκαλούνται ελαστικές τάσεις στο υλικό. Η διαμήκης παραμόρφωση $\Delta l/l$ κατά τη διεύθυνση μαγνήτισης αποκαλείται σταθερά μαγνητοσυστολής και συμβολίζεται με λ . Η σταθερά μαγνητοσυστολής εξαρτάται από την κρυσταλλική διεύθυνση και μπορεί να είναι θετική (επιμήκυνση) ή αρνητική (συστολή). Όταν η μαγνήτιση είναι παράλληλη σε μία από τις εύκολες διευθύνσεις, τότε η σταθερά λ είναι πάντα θετική. Επιπλέον, η λ εξαρτάται και από το εφαρμοζόμενο πεδίο και μπορεί να αλλάξει πρόσημο καθώς αυξάνεται το πεδίο. Όταν ο κρύσταλλος φτάσει στη μαγνήτιση κόρου ($M = M_S$) τότε η σταθερά λ φτάνει και αυτή σε κορεσμό και ονομάζεται μαγνητοσυστολή κόρου λ_{sat} . [7]



Σχήμα 2.11: Μεταβολή της μαγνητοσυστολής λ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου πεδίου H .

Όπως αναφέραμε, ο σκοπός επιβολής μιας ομοαξονικής τάσης σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό είναι η δημιουργία ανισοτροπίας λόγω παραμόρφωσης, και αν θ είναι η γωνία μεταξύ της μαγνήτισης και του άξονα της παραμόρφωσης, τότε:

$$\lambda(\theta) = \frac{3}{2} \lambda_s (\cos^2\theta - \frac{1}{3}) \quad (2.14)$$

Επίσης, η τιμή της μαγνητοελαστικής ενέργειας δίνεται από τον τύπο:

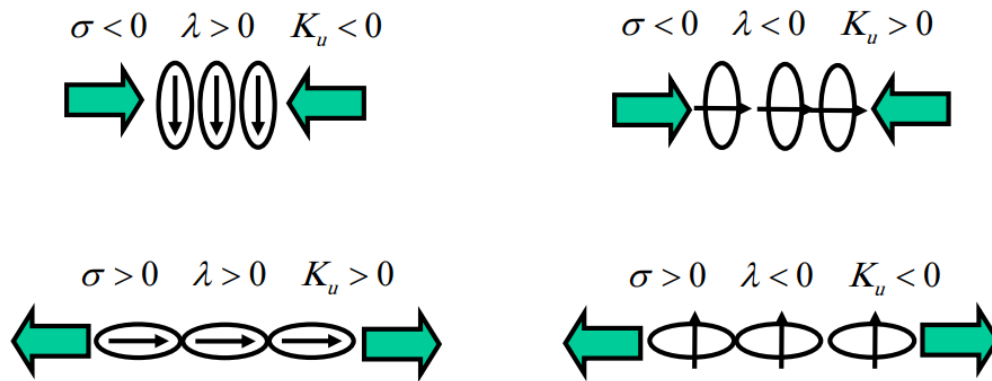
$$E_{me} = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2\theta \quad (2.15)$$

Συσχετίζοντας με τη συνηθισμένη έκφραση της ενέργειας μονοαξονικής ανισοτροπίας

$E = K_u \sin^2\theta$, συνεπάγεται ότι: [9]

$$K_u = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma = K_{me} \quad (2.16)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, ο τρόπος που ένα μαγνητικό υλικό αποκρίνεται στις ελαστικές τάσεις εξαρτάται από το γινόμενο $\lambda_s \sigma$. Δηλαδή, ένα υλικό με θετικό λ_s θα αποκρίνεται στη θλίψη με τον ίδιο τρόπο που ένα υλικό με αρνητικό λ_s θα αποκρίνεται στον εφελκυσμό.



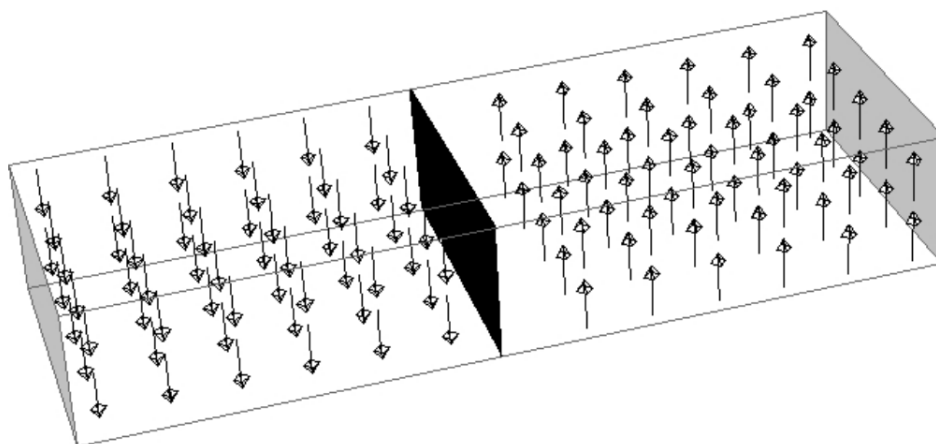
Σχήμα 2.12: Εμφάνιση μηχανικά επαγόμενης ανισοτροπίας κατά την εφαρμογή θλιπτικών τάσεων (πάνω σειρά) και εφελκυστικών (κάτω σειρά) τάσεων σε υλικά με θετική (αριστερή στήλη) και αρνητική (δεξιά στήλη) μαγνητοσυστολή.

Τέλος, η προέλευση της μαγνητοελαστικής ανισοτροπίας στα λεπτά υμένια έχει να κάνει με τις θερμικές τάσεις που προκύπτουν από θερμικές διαστολές μεταξύ του υμενίου και υποστρώματος, ενώ στις πολυστρωματικές δομές υπάρχουν οι τάσεις συνοχής που οφείλονται στις πλεγματικές διαφορές των υλικών των στρώσεων που αποτελούν την πολυστρωματική δομή.

2.6 Μαγνητικές περιοχές και μαγνητικά τοιχώματα

Είναι δυνατόν ένας μονοκρυσταλλός σιδήρου να μην έχει παραμένονσα μαγνήτιση, δηλαδή, να μην είναι μαγνητισμένο απουσία μαγνητικού πεδίου. Ο λόγος της απουσίας μαγνήτισης είναι η δημιουργία των λεγόμενων *μαγνητικών περιοχών* (*magnetic domains*) που αλληλοαναιρούνται. Πιο αναλυτικά, σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής είναι μικρής εμβέλειας και έτσι επικρατούν σε μικρές αποστάσεις, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις επικρατούν μαγνητικές διπολικές αλληλεπιδράσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το υλικό να μην είναι ομοιόμορφα μαγνητισμένο σε όλο τον όγκο του αλλά να χωρίζεται σε μαγνητικές περιοχές. Οι μαγνητικές περιοχές είναι μικροσκοπικές περιοχές μέσα στις οποίες όλες οι μεμονωμένες μαγνητικές ροπές των ατόμων είναι πλήρως προσανατολισμένες, επομένως μια τέτοια περιοχή βρίσκεται σε κατάσταση κόρου. Αντίθετα, η διεύθυνση της μαγνήτισης είναι διαφορετική από περιοχή σε περιοχή. Η βασική αρχή που οδηγεί στην παραπάνω κατάσταση είναι η απαίτηση της ελάχιστης ολικής ενέργειας ενός συστήματος, καθώς γνωρίζουμε ότι, από θερμοδυναμική άποψη, όλα τα συστήματα στη φύση τείνουν προς την ελαχιστοποίηση της δυναμικής τους ενέργειας. Από τη μια μεριά, οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής θέλουν να προσανατολίσουν όλες τις μαγνητικές ροπές προς την ίδια κατεύθυνση, καθώς αυτό είναι ενεργειακό συμφέρον για αυτές. Από την άλλη μεριά, αν υπήρχαν μόνο αυτές οι αλληλεπιδράσεις, τότε το υλικό θα αποτελούσαν από μια περιοχή μόνο και η μαγνητοστατική ενέργεια που θα είχε θα ήταν άπειρη. Το σύστημα όμως, απαιτεί ελαχιστοποίηση της συνολικής

ενέργειας, άρα θα πρέπει να μειώνεται και η μαγνητοστατική ενέργεια. Σε αυτό οφείλεται η διαίρεση ενός μαγνητικού υλικού σε πολλές περιοχές με διαφορετικό προσανατολισμό της μαγνήτισης, ώστε να ελαχιστοποιείται η μαγνητοστατική ενέργεια, η οποία είναι μακράς εμβέλειας. Αυτός ο ‘ανταγωνισμός’ μεταξύ των απαιτήσεων για την ελαχιστοποίηση των ενεργειών καθορίζει την ύπαρξη, το πλήθος και το μέγεθος των μαγνητικών περιοχών, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. [6,7,20]



Σχήμα 2.13: Σαν αποτέλεσμα του ανταγωνισμού μεταξύ των (μικρής εμβέλειας) αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής και των (μακράς εμβέλειας) μαγνητοστατικών αλληλεπιδράσεων ένα σιδηρομαγνητικό υλικό χωρίζεται σε ομογενώς μαγνητισμένες μαγνητικές περιοχές.

Γενικότερα, μπορούμε να πούμε ότι οι μαγνητικές περιοχές αποτελούν διαφορετικές διευθύνσεις του διανύσματος της μαγνήτισης $\mathbf{M}$ που είναι ενεργειακά ισοδύναμες (κατά μήκος ισοδύναμων διευθύνσεων εύκολης μαγνήτισης) και μειώνουν την μαγνητοστατική ενέργεια ενός μαγνήτη. Επεκτείνονται κατά μήκος πολλών ατομικών στρωμάτων, φτάνοντας στην τάξη των μικρόμετρων και των νανόμετρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες το υλικό δεν χωρίζεται σε περιοχές, δηλαδή, αποτελείται από μία μονή μαγνητική περιοχή (single domain particles). Αυτό συμβαίνει σε πολύ μικρά μαγνητικά σωματίδια, το μέγεθος των οποίων είναι πολύ μικρό, με αποτέλεσμα ο χωρισμός σε περιοχές να μην είναι πλέον ενεργειακά συμφέρον, καθώς χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για να δημιουργηθεί ένα τοίχωμα από το να συντηρηθεί η μαγνητοστατική ενέργεια μιας κατάστασης μονής μαγνητικής περιοχής [22].

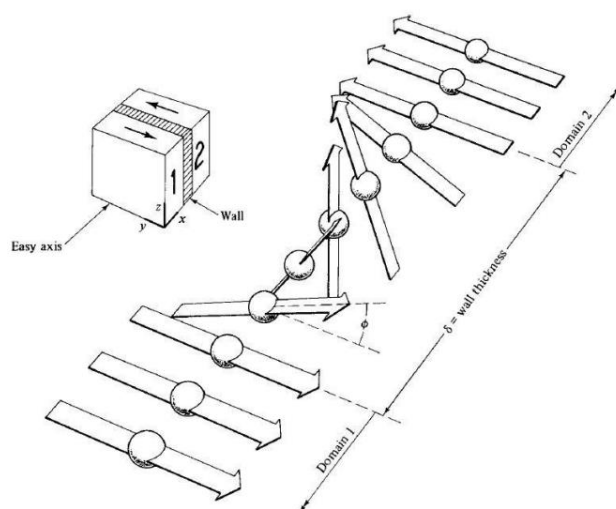
Όμως η διαίρεση σε περιοχές δεν μπορεί να είναι άπειρη καθώς απαιτεί επιπλέον κόστος σε επιφανειακή ενέργεια τοιχώματος. Τα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών είναι οι διεπιφάνειες μεταξύ περιοχών με διαφορετική μαγνήτιση. Τα μαγνητικά τοιχώματα έχουν κάποιο πεπερασμένο πάχος, μέσα στο οποίο τα spin αλλάζουν φορά ώστε να εξομαλύνεται η μετάβαση από τη μία μαγνητική περιοχή στη γειτονική. [23] Η σταδιακή στροφή της μαγνήτισης μεταξύ δύο διαφορετικών μαγνητικών περιοχών επιβάλλεται για λόγους ελαχιστοποίησης της ενέργειας ανταλλαγής. Όπως αναφέραμε παραπάνω τα τοιχώματα έχουν κάποιο πεπερασμένο πάχος, το οποίο ουσιαστικά είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ενέργεια ανταλλαγής, που απαιτεί την ύπαρξη ενός τοιχώματος μεγάλου πάχους, και την ενέργεια ανισοτροπίας, που απαιτεί την ύπαρξη

λεπτού τοιχώματος. Έτσι, το πάχος ισορροπίας είναι αυτό για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνολική δυναμική ενέργεια, η οποία είναι το άθροισμα της ενέργειας ανταλλαγής και της ενέργειας ανισοτροπίας εντός του τοιχώματος. [7]

Το πάχος του τοιχώματος θα αυξάνεται όσο ισχυρότερες είναι οι αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής και μειώνεται όσο ισχυρότερη είναι η ανισοτροπία, και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

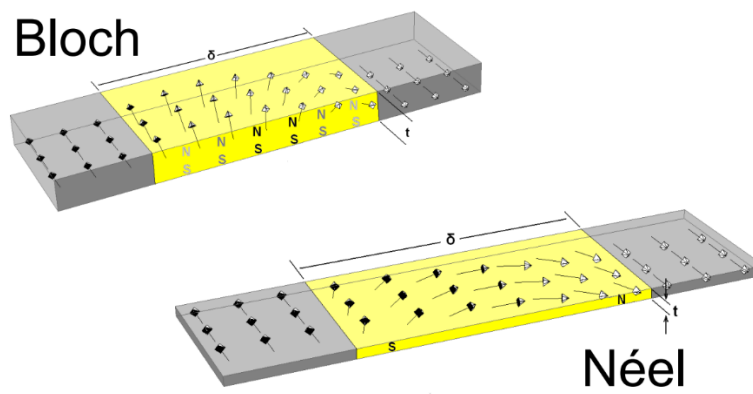
$$\delta \propto \sqrt{\frac{E_{ex}}{K_u}} \quad (2.17)$$

όπου E_{ex} είναι η ενέργεια ανταλλαγής και K_u η σταθερά μονοαξονικής ανισοτροπίας.



Σχήμα 2.14: Δομή ενός τοιχώματος μεταξύ δύο διαφορετικών μαγνητικών περιοχών.

Τα πιο διαδεδομένα τοιχώματα σε λεπτά στρώματα είναι αυτά του Bloch και του Neel, στα οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η μαγνητοστατική ενέργεια, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στους υπολογισμούς της δομής και του πάχους τους, εκτός από τους ενεργειακούς όρους της ανταλλαγής και της ανισοτροπίας. Τα τοιχώματα Bloch συναντώνται σε υλικά που έχουν σχετικά μεγάλες διαστάσεις και σε λεπτά υμένια με μεγάλα πάχη, ενώ τα τοιχώματα Neel σχηματίζονται μόνο στα λεπτά υμένια. Σε ένα τοίχωμα Bloch θεωρούμε ότι η μαγνήτιση στρίβει σταδιακά κατά μήκος του τοιχώματος παραμένοντας πάντα παράλληλη στο επίπεδο του τοιχώματος, ενώ σε ένα τοίχωμα Neel η στροφή γίνεται στο επίπεδο του υμενίου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. [6,24,27]



Σχήμα 2.15: Σύγκριση του τρόπου που πραγματοποιείται η σταδιακή στροφή κατά μήκος ενός τοιχώματος Bloch και Neel πάχους δ που χωρίζει δύο περιοχές με αντιπαράλληλη μαγνήτιση, σε υμένιο πάχους t . Με N και S συμβολίζονται οι μαγνητικοί πόλοι που δημιουργούνται στο τοίχωμα σε κάθε περίπτωση.

Η μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού μονοκρυστάλλου οφείλεται στη μετακίνηση των τοιχωμάτων των περιοχών που έχουν μαγνήτιση παράλληλη προς το επιβαλλόμενο πεδίο εις βάρος των περιοχών των οποίων η μαγνήτιση είναι αντίθετη από τη κατεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου. Η μετακίνηση όμως των τοιχωμάτων δεν είναι ομαλή αλλά επηρεάζεται από κρυσταλλικές ατέλειες και προσμίξεις, οι οποίες μπορούν 'να εγκλωβίζουν' τα τοιχώματα και να οδηγούν σε τοπική ελαχιστοποίηση της ολικής ενέργειας. Για να απομακρυνθεί τώρα το τοίχωμα από την ατέλεια αυτή απαιτείται η εφαρμογή ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου. Μόλις αποδεσμευτεί, το τοίχωμα κινείται μέχρις ότου να δεσμευτεί από μια άλλη ατέλεια, όπου και παραμένει μέχρι το πεδίο αυξηθεί ακόμα περισσότερο και το αποδεσμεύσει εκ νέου. Κάθε φορά που το τοίχωμα αποδεσμεύεται παράγονται πλεγματικές ταλαντώσεις, πράγμα που σημαίνει ότι μέρος της ενέργειας χάνεται ως θερμότητα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μη αντιστρέψιμη κίνηση των τοιχωμάτων, και άρα απώλεια ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας. Επομένως, βλέπουμε ότι η κίνηση ενός τοιχώματος εντός κρυστάλλου δεν είναι ομαλή, αλλά πραγματοποιείται με απότομα άλματα. Αυτή η βηματική μαγνήτιση του υλικού είναι γνωστή ως το φαινόμενο Barkhausen. Αν μπορούσαμε να μετρήσουμε τη μαγνήτιση με μεγάλη ακρίβεια τότε θα βλέπαμε ότι η καμπύλη της M συναρτήσει του H έχει μικρές ασυνέχειες και άλματα (σχήμα 2.16). [6,25,28]

2.7 Βρόχος υστέρησης

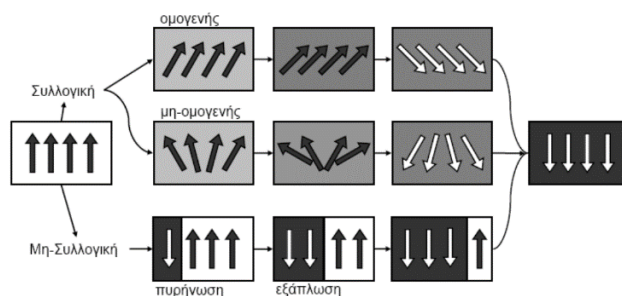
Σε ένα σιδηρομαγνητικό (ή σιδηριμαγνητικό) υλικό η σχέση μεταξύ των ποσοτήτων της μαγνήτισης M και του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H (ή μαγνητικής επαγωγής B και H) είναι μη γραμμική, μη μονότιμη και δίνει την καμπύλη του *βρόχου υστέρησης* (ο όρος υστέρηση επινοήθηκε από την ελληνική λέξη 'υστερειν'-μένω πίσω). Τα βασικά μεγέθη που υπάρχουν και μπορούν να υπολογιστούν από ένα βρόχο υστέρησης είναι: η μαγνήτιση κόρου (M_s) η παραμένουσα μαγνήτιση (M_r) και το συνεκτικό πεδίο (H_c), τα οποία καθορίζουν και την καταλληλότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών για διάφορες εφαρμογές. [10]



107 1 11 11 1 91 1 9 1 90 1 9

η μαγνήτιση. Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αρχίζει να λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή να αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνήτιση ελαττώνεται και στο σημείο E μηδενίζεται. Το πεδίο μαγνήτισης που απαιτείται για να απομαγνητιστεί πλήρως το δείγμα ονομάζεται συνεκτικό πεδίο H_C και παριστάνει την αντίσταση που παρουσιάζει το δείγμα στην απομαγνήτισή του. Κατά τη διαδικασία της απομαγνήτισης, κατά την μετάβαση από το σημείο D στο σημείο E δημιουργούνται νέες μαγνητικές περιοχές που αναιρούν την παραμένουσα (συνολική) μαγνήτιση. Αν συνεχίσουμε να αυξάνουμε το μαγνητικό πεδίο προς την κατεύθυνση $-x$, τότε η διαδικασία από το σημείο E και μετά γίνεται όμοια με τη διαδικασία της μαγνήτισης από το σημείο O μέχρι το σημείο C. [7]

Επιπρόσθετα, ένα άλλο σημαντικό μέγεθος το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από ένα βρόχο υστέρησης είναι και το ενεργειακό γινόμενο BH_{max} . Ο υπολογισμός του γίνεται μέσω της εύρεσης του μέγιστου γινόμενου στο δεύτερο τεταρτημόριο της καμπύλης υστέρησης, δηλαδή στην καμπύλη απομαγνήτισης του υλικού. Το γινόμενο αυτό αναπαριστά τη μαγνητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε έναν μόνιμο μαγνήτη. Το φαινόμενο της υστέρησης οφείλεται κυρίως στις ατέλειες που υπάρχουν σε ένα υλικό καθώς και στην ανισοτροπία που εμφανίζει και αποτελεί μια μη ενδογενή ιδιότητα καθώς εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος και το υλικό του δείγματος [26]. Επίσης, το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη του βρόχου υστέρησης, αντιστοιχεί στην ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου και ανά κύκλο εφαρμογής του εναλλασσόμενου πεδίου. Η ύπαρξη των μετασταθών καταστάσεων που μεταβαίνουν σε σταθερές είτε με τη μεταβολή του εξωτερικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου είτε με θερμική αποδιέγερση, μπορούν να εξηγήσουν το φαινόμενο της υστέρησης στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Οι μηχανισμοί με τους οποίους αντιστρέφεται η μαγνήτιση είναι: α) συλλογικοί και β) εντοπισμένοι. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι τρόποι κατά τους οποίους οι μαγνητικές ροπές αντιστρέφονται ταυτόχρονα σε όλο το υλικό (συλλογικοί τρόποι). Ο πιο απλός συλλογικός τρόπος είναι η ομογενής στροφή, όπου οι μαγνητικές ροπές παραμένουν παράλληλες μεταξύ τους. Αντίθετα, στην δεύτερη περίπτωση η στροφή γίνεται μη συλλογικά, ξεκινώντας από συγκεκριμένες περιοχές που εξαπλώνονται σταδιακά. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται η πυρήνωση αντίστροφων περιοχών καθώς και η κίνηση των τοιχωμάτων. [6]



Σχήμα 2.17: Κατάταξη των τρόπων αντιστροφής της μαγνήτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΑ ΥΜΕΝΙΑ

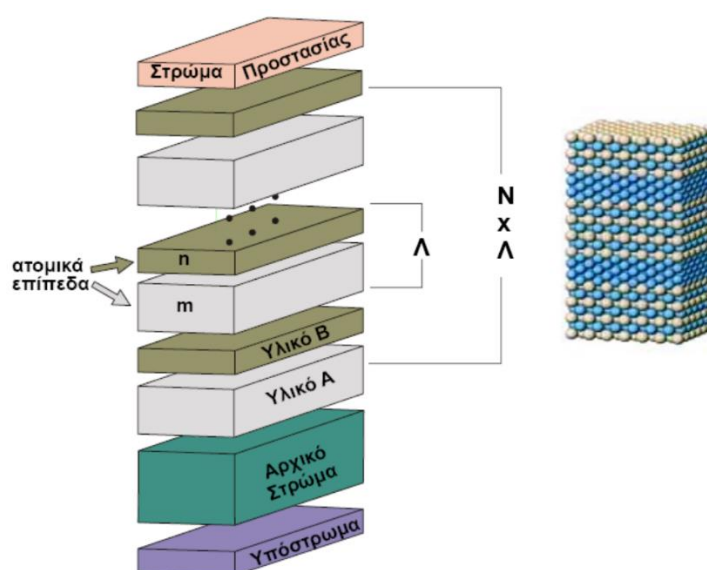
3.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη της σύγχρονης κοινωνίας, καθώς και οι αυξανόμενες τεχνολογικές ανάγκες της, οδήγησαν στην ανάπτυξη και μελέτη νέων προηγμένων υλικών με ασυνήθιστη δομική σύνθεση, και στη βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχόντων με σκοπό την χρήση και την ενσωμάτωσή τους σε υψηλής απόδοσης εφαρμογές. Προηγμένα υλικά ή υλικά υψηλής τεχνολογίας είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας ή κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας την υψηλή τεχνολογία. Επίσης, ζούμε σε μια εποχή που χαρακτηρίζεται από επανάσταση στις τεχνολογίες πληροφοριών, καθώς υπάρχει και παράγεται ένας τεράστιος όγκος δεδομένων καθημερινώς. Για τον λόγο αυτό έχει δοθεί μεγάλη βαρύτητα από τους επιστήμονες και ερευνητικές ομάδες στην ανάπτυξη διατάξεων αποθήκευσης πληροφορίας, που κυρίως βασίζεται στην μαγνητική εγγραφή. Επομένως, η ανάπτυξη των πρωτότυπων μαγνητικών υλικών αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της έρευνας, και η παρούσα διπλωματική αναφέρεται στα μαγνητικά προηγμένα υλικά. Οι συνεισφορές των μαγνητικών υλικών δεν περιορίζονται μόνο στις τεχνολογίες αποθήκευσης πληροφορίας αλλά καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως είναι: η ηλεκτρονική, η αεροναυπηγική, η μικρομηχανική, η ιατρική για διαγνωστικούς (μαγνητική τομογραφία MRI) και θεραπευτικούς (καταπολέμηση καρκινικών κυττάρων) λόγους κτλ. Επίσης, βρίσκουν εφαρμογές σε συστήματα ήχου και εικόνας, σε πιστωτικές κάρτες, αισθητήρες, ηλεκτροκινητήρες, μαγνητικά και υπεραγώγιμα τρένα κ.α. Η αύξηση της πυκνότητας πληροφορίας προϋποθέτει μεγάλη μείωση των διαστάσεων των μαγνητικών υλικών σε μεγέθη και κλίμακες των μαγνητικών περιοχών. Συνεπώς, μιλάμε για νανοδομημένα μαγνητικά υλικά, δηλαδή μαγνητικά υλικά χαμηλών διαστάσεων, στα οποία τουλάχιστον μια διάσταση βρίσκεται στην κλίμακα του νανόμετρου. Τα μαγνητικά νανουλικά εμφανίζουν ενδιαφέρουσες μαγνητικές ιδιότητες όπως είναι η γιγαντιαία μαγνητοανστίσταση, επαγόμενη μαγνήτιση σε ευγενή μέταλλα και μαγνητισμός χαμηλών διαστάσεων. Η ύλη συμπεριφέρεται διαφορετικά στον κόσμο του νάνο, στον οποίο οι κλίμακες μήκους κυμαίνονται από 1nm έως περίπου 100 nm. Αυτό συμβαίνει γιατί οι διαστάσεις των μαγνητών στην κλίμακα αυτή γίνονται συγκρίσιμες με κάποια χαρακτηριστικά μήκη, κάτω από τα οποία αλλάζουν οι φυσικές ιδιότητες. [4]

3.2 Πολυστρωματική Διαμόρφωση

Στη φύση τα υλικά συναντώνται σε στοιχειακή μορφή (καθαρά υλικά) ή ενώσεις ή κράματα μεταξύ στοιχείων. Οι δομές όμως που παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον είναι τα λεπτά υμένα διαμορφωμένης δομής ή διαμορφωμένα ως προς τη σύσταση ή

πολυστρωματικά υμένια οι οποίες δεν υπάρχουν ελεύθερα στη φύση, αλλά είναι τεχνητές. Στην παρούσα εργασία μελετώνται, κατάλληλα διαμορφωμένες τεχνητές υπερδομές - πολυστρωματικά υμένια και πιο συγκεκριμένα μεταλλικά μαγνητικά πολυστρωματικά υμένια καθώς ένα από τα στοιχεία εναπόθεσης είναι μαγνητικό (Fe, Co, Ni). Οι δομές αυτές παρασκευάζονται με διαδοχική επαναλαμβανόμενη εναπόθεση δύο ή περισσότερων διαφορετικών πηγών, που παράγουν δέσμες ή ροή αυτών των υλικών, οι οποίες κατευθύνονται σε ένα κατάλληλο υπόστρωμα με τη βοήθεια ειδικών συστημάτων (κλείστρα) διακοπής και επανεκκίνησης της ροής από την πηγή στο υπόστρωμα. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα πολυστρωματικό υμένιο που αποτελείται από δύο υλικά A και B. Κατά τη διαδικασία της εναπόθεσης, πάνω στο υπόστρωμα πρώτα σχηματίζεται ένα στρώμα A μέσου πάχους t_A και μετά ακολουθεί ο σχηματισμός του στρώματος B μέσου πάχους t_B . Το επιθυμητό πάχος των επιμέρους υλικών – στρωμάτων ρυθμίζεται από το άνοιγμα και το κλείσιμο των κλείστρων. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται N φορές. Η δομή αυτή συμβολίζεται A/B. Τα πάχη t_A και t_B αναφέρονται σαν επιμέρους πάχη ενώ το άθροισμά τους $t_A + t_B = \Lambda$ σαν περίοδος διαμόρφωσης. Τα πάχη των επιμέρους συστατικών μπορούν να μεταβάλλονται από λίγα ατομικά επίπεδα μέχρι εκατοντάδες και επίσης μπορούν να εκφραστούν και σε αριθμούς ατομικών επιπέδων m και n .



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση πολυστρωματικού υμενίου.

Το μεγάλο ενδιαφέρον υπάρχει στα μικρά πάχη, γιατί στην κλίμακα των νάνο εκδηλώνονται τα φαινόμενα που οφείλονται στη διαμόρφωση και όσο αυξάνονται οι διαστάσεις, τόσο εξασθενούν τα φαινόμενα αυτά και τα υλικά συμπεριφέρονται σαν τα επιμέρους συμπαγή υλικά. Σε ένα ιδανικό πολυστρωματικό υμένιο δεν υπάρχει ενδοδιάχυση των ατόμων ενός συστατικού στο άλλο και οι διεπιφάνειες δεν έχουν καθόλου τραχύτητα. Στην πραγματικότητα είναι πολύ σπάνιο να αναπτυχθεί ένα τέτοιο τέλει πολυστρωματικό υμένιο. Συνήθως πριν την εναπόθεση των N στρωμάτων, δηλαδή, μεταξύ του υποστρώματος και του πρώτου εναποτιθέμενου λεπτού υμενίου,

εναποτίθεται ένα λεπτό στρώμα (buffer layer) το οποίο βοηθά στην καλύτερη κρυσταλλικότητα και στην επίτευξη καλύτερης διεύθυνσης ανάπτυξης. Πάνω σε αυτό χτίζεται όλη η πολυστρωματική δομή. Στην κορυφή της πολυστρωματικής δομής, στο τέλος δηλαδή, εναποτίθεται ένα προστατευτικό στρώμα (overlayer) από το χημικά σταθερότερο υλικό μεταξύ των Α και Β, με στόχο την προστασία των δειγμάτων από τη διάβρωση και την οξείδωση. [27,31]

3.3 Φυσικές ιδιότητες και φαινόμενα

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, οι πολυστρωματικές δομές εμφανίζουν ενδιαφέρουσες, βελτιωμένες και πρωτότυπες ιδιότητες ή φαινόμενα σε σχέση με τα αντίστοιχα συμπαγή υλικά. Οι ιδιότητες που εμφανίζονται στις πολυστρωματικές δομές μπορεί να είναι ποιοτικά και ποσοτικά διαφορετικές από αυτές των επιμέρους συμπαγών υλικών (bulk) που απαρτίζουν την πολυστρωματική δομή. Αυτό οφείλεται κυρίως στην δομή τους, δηλαδή στη συμπεριφορά των επιφανειακών ή διεπιφανειακών ατόμων τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικό περιβάλλον σε σύγκριση με τα συμπαγή, στις μειωμένες διαστάσεις που τις χαρακτηρίζουν (διαστάσεις που συμπίπτουν με κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη στην κλίμακα του νάνο) και στις τάσεις που εισάγονται από το υπόστρωμα (ή από το αρχικό στρώμα – buffer layer). Οι ενδογενείς μαγνητικές ιδιότητες, όπως η μαγνήτιση, το σημείο Curie, η ανισοτροπία και η μαγνητοσυστολή, μπορεί να διαφέρουν σημαντικά στα λεπτά υμένια και στα μαγνητικά υλικά όγκου. Οι φυσικές ιδιότητες και τα φαινόμενα που εμφανίζονται στις πολυστρωματικές δομές μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ιδιότητες λεπτών υμενίων λόγω της γεωμετρίας τους.
- Φαινόμενα γειτονίας λόγω επαφής διαφορετικών υλικών σε ατομικό επίπεδο.
- Φαινόμενα σύζευξης.
- Φαινόμενα πολυστρωματικού χαρακτήρα.

Η σύζευξη μεταξύ των διαδοχικών μαγνητικών στρωμάτων τα οποία χωρίζονται από μη μαγνητικά στρώματα ονομάζεται μαγνητική σύζευξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση, η οποία είναι αποτέλεσμα της αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης κατά μήκους του ενδιάμεσου μη μαγνητικού στρώματος, στην οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Ένα φαινόμενο γειτονίας – ενδοεπιφάνειας αποτελεί η κάθετη μαγνητική ανισοτροπία, όπου η επιφανειακή ανισοτροπία υπερκαλύπτει την ισχυρότερη ανισοτροπία σχήματος. [4]

3.4 Εφαρμογές μαγνητικών πολυστρωματικών υμενίων

Οι πρώτες εφαρμογές των πολυστρωματικών δομών εμφανίστηκαν περίπου 50 χρόνια πριν και ήταν για επικαλύψεις μεγάλης ανακλαστικότητας και για οπτικά φίλτρα. Στη δεκαετία του 70 χρησιμοποιήθηκαν στους σκληρούς δίσκους των ηλεκτρονικών

υπολογιστών και η μεγάλη επιτυχία τους σημειώθηκε μεταξύ του 1970 -1980 με τη βελτίωση και την πρόοδο που έγινε στις τεχνολογίες κενού.

Τα κυριότερα πεδία τεχνολογικών εφαρμογών των μαγνητικών πολυστρωματικών υμενίων είναι δύο:

- a) Η κατασκευή μαγνητικών και μαγνητο-οπτικών μέσων αποθήκευσης πληροφορίας υψηλής πυκνότητας, εκμεταλλευόμενο το φαινόμενο της κάθετης μαγνητικής ανισοτροπίας (*high-density magnetic recording media*)
- b) Η κατασκευή ευαίσθητων αισθητήρων ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου εκμεταλλευόμενο το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (*GMR – Giant MagnetoResistace*). [29]

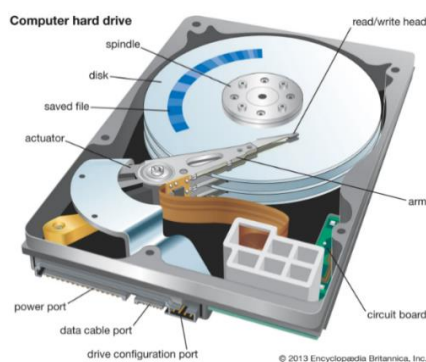
Άλλες εφαρμογές των πολυστρωματικών μαγνητικών δομών εκμεταλλεύονται την αλληλεπίδραση των μαγνητικών και μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η μαγνητοσυστολή ή το αντίστροφο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Φαινόμενα όπως είναι η συσχέτιση της μαγνήτισης με την ηλεκτρική αντίσταση (GMR) και η μαγνητική διαστρωματική σύζευξη με το ηλεκτρικό ρεύμα οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός νέου πεδίου στον μαγνητισμό, αυτό της μαγνητοηλεκτρονικής ή σπιντρονικής. Σε αυτές τις περιπτώσεις η έγχυση σπιν είναι η πιο σημαντική διαδικασία. Η έγχυση σπιν είναι σημαντική, για παράδειγμα, στις διαδικασίες GMR και διαστρωματικής σύζευξης, όπου τα ηλεκτρόνια που εγχέονται διαμέσου της διαστρωμάτωσης πρέπει να έχουν καλά καθορισμένο προσανατολισμό σπιν και ο προσανατολισμός σπιν να διατηρείται κατά τη μεταφορά μεταξύ των στρωμάτων. Το πεδίο των πολυστρωματικών μαγνητικών δομών είναι ευρύ και επεκτείνεται ακόμη, με πολλά και διάφορα ενδιαφέροντα φαινόμενα. Παραμένει ένα συναρπαστικό πεδίο, πλούσιο σε ευκαιρίες, τόσο στη βασική, όσο και στην εφαρμοσμένη έρευνα.

3.5 Μαγνητική εγγραφή – μαγνητική αποθήκευση πληροφορίας

Η μαγνητική αποθήκευση και η μαγνητική εγγραφή είναι όροι που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση δεδομένων σε ένα μαγνητικό μέσο. Οι πρώτες συσκευές μαγνητικής αποθήκευσης κατασκευάστηκαν για εγγραφή αναλογικών ηχητικών σημάτων ενώ τα σύγχρονα μέσα αποθήκευσης αποθηκεύουν ψηφιακά δεδομένα. Η πρώτη επιτυχημένη εγγραφή έγινε το 1898 από τον Δανό μηχανικό Poulsen σε μια συσκευή που την ονόμασε ‘telegraphone’, όπου ηχητικά σήματα καταγράφηκαν σε ένα σιδηρομαγνητικό σύρμα χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρομαγνήτη συνδεδεμένο με ένα μικρόφωνο. Μετά από κάποια χρόνια κατασκευάστηκε και η πρώτη μαγνητική ταινία η οποία χρησιμοποιήθηκε ως μέσο εγγραφής για σήματα ήχου και εικόνας. [30]

Το υλικό που ιστορικά έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο σε μαγνητικές ταινίες είναι μικρά σωματίδια $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ μέσα σε πλαστική μήτρα. Τα σωματίδια έχουν μορφή βελόνας με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλη ανισοτροπία σχήματος, το οποίο ‘μεταφράζεται’ σε μεγάλο σχετικά συνεκτικό πεδίο, για να μην χαθεί η εγγραφόμενη πληροφορία. Οποιοδήποτε σύστημα με δυο σταθερές διακριτές καταστάσεις

μαγνήτισης οι οποίες μπορεί να εναλλαχθούν με ελεγχόμενο τρόπο, μπορεί να αποτελέσει εν δυνάμει μέσο για εγγραφή πληροφορίας (εγγραφή και ανάγνωση). Τα μαγνητικά υλικά πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις καθώς έχουν δύο σταθερές διευθύνσεις της μαγνήτισής τους, την θετική και αρνητική μαγνήτιση κόρου που σταθεροποιούνται από το συνεκτικό πεδίο. Οι δύο διαφορετικές καταστάσεις της μαγνήτισης αντιστοιχούν στα ψηφία 0 και 1. Τα μαγνητικά αρχεία είναι σήμερα όλα σχεδόν ψηφιακά και τα δεδομένα αποθηκεύονται κυρίως σε σκληρούς δίσκους που χρησιμοποιούνται για μαζικές μνήμες στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ο σκληρός δίσκος είναι μια βασική μονάδα με μεγάλη χωρητικότητα, υψηλή σχετικά ταχύτητα πρόσβασης και θεωρητικά απεριόριστους κύκλους εγγραφής/ανάγνωσης. Ένας σκληρός δίσκος (HDD) αποτελείται από επάλληλους λεπτούς δίσκους που περιστρέφονται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον κοινό άξονά τους. Είναι καλυμμένοι με μαγνητικό υλικό που μαγνητίζεται εύκολα, οπότε κατά την εγγραφή δεδομένων, η κεφαλή εγγραφής που διαγράφει την επιφάνειά τους, μπορεί να μαγνητίσει τις μαγνητικές περιοχές σε έναν από τους δύο διακριτούς προσανατολισμούς της κατεύθυνσης που αντιστοιχούν στα ψηφιακά δεδομένα 0 και 1.

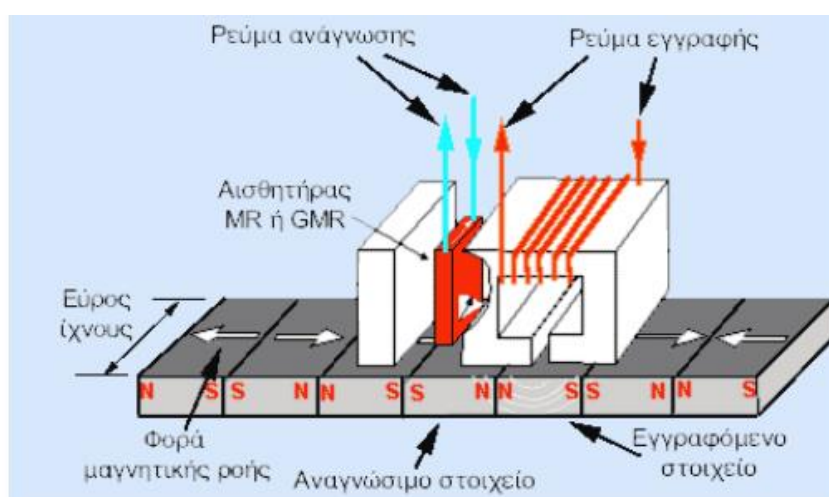


Σχήμα 3.2: Απεικόνιση ενός σκληρού μαγνητικού δίσκου (HDD)

Υπάρχουν δύο ειδών τρόποι μαγνητικής εγγραφής: α) η διαμήκης και β) η κάθετη εγγραφή. Στην α) περίπτωση που αποτελεί και την παραδοσιακή εγγραφή πληροφορίας, οι διακεκριμένες μονάδες πληροφορίας εγγράφονται ως μικρές περιοχές ανεστραμμένης μαγνήτισης με τη μαγνήτιση του υλικού να βρίσκεται στο επίπεδο του μέσου εγγραφής ενώ στη β) περίπτωση η μαγνήτιση είναι κάθετη στην επιφάνεια του μέσου. Το σύστημα αποθήκευσης πληροφορίας αποτελείται από τα παρακάτω μαγνητικά υλικά που ανάλογα με την χρήση τους ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

- i. Αυτά που χρησιμοποιούνται σε μαγνητικές κεφαλές με δυνατότητα εγγραφής.
- ii. Αυτά που χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες ανάγνωσης.
- iii. Αυτά που χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης (εγγραφής).

Το μέσο αποθήκευσης πληροφορίας ή εγγραφής είναι ένα λεπτό υμένιο μαγνητικού υλικού το οποίο παράγεται μέσω κατάλληλης μεθόδου π.χ. ιοντοβολής πάνω σε ένα υπόστρωμα σε μορφή δίσκου που περιστρέφεται μέσα στο σύστημα αποθήκευσης πληροφορίας. Κατά τη διαδικασία της ψηφιακής μαγνητικής εγγραφής τα στοιχεία πληροφορίας (bit) αποθηκεύονται πάνω στο μέσο εγγραφής/αποθήκευσης υπό τη μορφή μικροσκοπικών περιοχών των οποίων η διεύθυνση της μαγνήτισης διαφέρει μεταξύ των στοιχείων 0 και 1. Τα μαγνητικά μέσα κατασκευάζονται από ημίσκληρα υλικά με επαρκή υστέρηση που να διατηρεί μόνιμη εγγραφή δεδομένων, αλλά όχι τόσο μεγάλη ώστε να οδηγεί σε αναμαγνήτιση στο πεδίο που παράγεται από την μαγνητική κεφαλή. Η κεφαλή επαγωγικής εγγραφής αποτελείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη, δηλαδή από ένα πηνίο μαζί με έναν πυρήνα το οποίο φέρει ένα πολύ μικρό διάκενο αέρα και είναι κατασκευασμένος από λεπτό υμένιο μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού. Η κεφαλή κατασκευάζεται με τυπικές τεχνικές εναπόθεσης λεπτών υμενίων. Τα μαγνητικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται σε μια κεφαλή είναι: υψηλή μαγνήτιση, χαμηλό συνεκτικό πεδίο, υψηλή διαπερατότητα και μηδενική μαγνητοσυστολή. Το κράμα permalloy αποτελεί ένα παραδοσιακό μαγνητικό μαλακό υλικό στις κεφαλές εγγραφής. Η πληροφορία που έχει καταγραφεί πάνω στο μέσο αποθήκευσης υπό μορφή διαφορετικών προσανατολισμών (μοτίβων) ανιχνεύεται από την κεφαλή ανάγνωσης όπως είναι ένας αισθητήρας GMR (γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης) ο οποίος αποτελεί μια πολυστρωματική διάταξη λεπτών υμενίων. Η διαδικασία (διαμήκης) μαγνητικής εγγραφής και τα επιμέρους μέρη που συμμετέχουν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Η εγγραφή της πληροφορίας είναι στην ουσία μια διαδικασία μαγνήτισης που γίνεται από την κεφαλή εγγραφής, την οποία μπορούμε να την φανταστούμε σαν ένα μικροσκοπικό ηλεκτρομαγνήτη. Παλαιότερα η ανάγνωση γινόταν με επαγωγικό τρόπο, στα σύγχρονα όμως μέσα εγγραφής η ανάγνωση της πληροφορίας γίνεται με βάση το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης σε διατάξεις βαλβίδας σπιν. Η υψηλότερη ευαισθησία των κεφαλών μαγνητοαντίστασης επέτρεψε τη σημαντική αύξηση της πυκνότητας αποθήκευσης πληροφορίας. [10]



Σχήμα 3.3: Διαδικασία εγγραφής/ανάγνωσης μαγνητικού μέσου από σύνθετη κεφαλή ανάγνωσης/εγγραφής αποτελούμενη από δύο στοιχεία: Ανάγνωση: GMR, Εγγραφή: Πηνίο.

Το ζητούμενο της σύγχρονης υψηλής τεχνολογικής ανάπτυξης είναι η αποθήκευση περισσότερης πληροφορίας σε μικρότερο όγκο. Αυτό όμως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί για πολύ μικρές τιμές όγκου λόγω κάποιων ορίων που σχετίζονται με θεμελιώδεις φυσικές αρχές, όπως είναι το φαινόμενο που λέγεται SNR: λόγος σήματος προς θόρυβο, το υπερπαραμαγνητικό όριο και τα όρια των κόκκων δεν μπορούν να γίνουν απείρως μικρά. Έτσι στα μέσα αποθήκευσης επιβάλλεται η χρήση υλικών υψηλής ανισοτροπίας ώστε να υπερνικηθούν τα φαινόμενα υπερπαραμαγνητισμού και να υπάρχει θερμική σταθερότητα. Όμως η υψηλή ανισοτροπία συνδέεται με αύξηση του συνεκτικού πεδίου, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί προβλήματα εγγραψιμότητας. Το πρόβλημα επιτείνεται και από το γεγονός ότι ο απαιτούμενος χρόνος πρόσβασης είναι της τάξεως των nsec, ενώ ο απαιτούμενος χρόνος αποθήκευσης είναι δεκαετίες. Μια λύση σε αυτούς τους περιορισμούς είναι η εφαρμογή του φαινομένου της κάθετης μαγνητικής εγγραφής. Η κάθετη εγγραφή επιτρέπει υψηλότερες χωρητικές πυκνότητες των μαγνητικών αρχείων που σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύονται περισσότερα bite σε μια δεδομένη επιφάνεια και τα στοιχεία πληροφορίας 0 και 1 αντιστοιχίζονται σε διευθύνσεις πάνω και κάτω σε σχέση με το επίπεδο του σκληρού δίσκου. [31]

Τα υλικά που εμφανίζουν κάθετη μαγνητική ανισοτροπία έχουν υψηλές ταχύτητες ανάγνωσης - εγγραφής. Επίσης, αργότερα μεγάλη προσοχή δόθηκε και στην χρήση τους στις εφαρμογές που αφορούν την μαγνητοοπτική εγγραφή και προηγμένες συσκευές σπιντρονικής, όπως είναι οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και οι μνήμες τυχαίας προσπέλασης (MRAM) που χρησιμοποιούν το φαινόμενο του spin transfer torque (STT). [32,33]

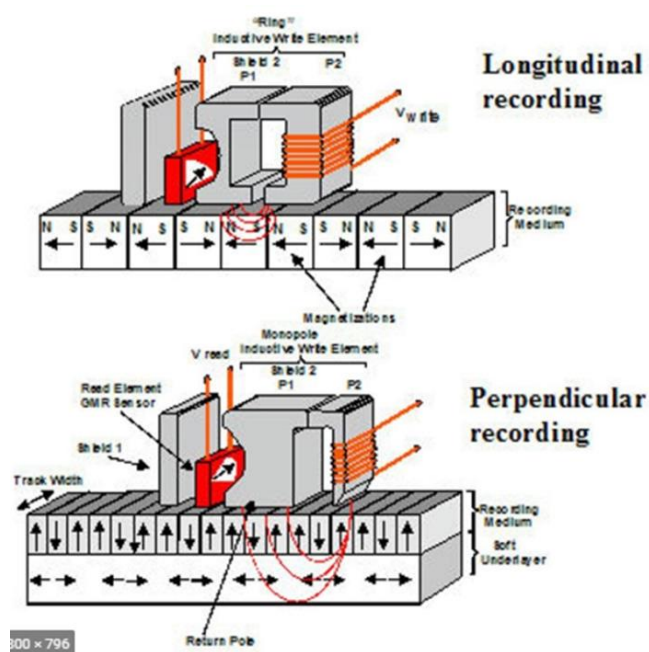
Οι απαιτήσεις για ένα διαμήκες μαγνητικό μέσο εγγραφής μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- ✓ Υψηλή μαγνήτιση κόρου (M_S), υψηλή παραμένουσα (M_r) μαγνήτιση, υψηλή τετραγωνικότητα ($S = M_r/M_S$) ώστε να υπάρχει ένα αρκετό δυνατό σήμα.
- ✓ Χαμηλή μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία ώστε να ελαττωθεί η θερμοκρασιακή εξάρτηση.
- ✓ Υψηλή ανισοτροπία σχήματος ώστε να σταθεροποιείται η κατεύθυνση της μαγνήτισης.
- ✓ Αρκετά υψηλή τιμή συνεκτικού πεδίου ώστε να σταθεροποιείται η εγγραφόμενη μαγνητική κατάσταση, αλλά αρκετή χαμηλή ώστε να είναι δυνατή η εγγραφή/επανεγγραφή/διαγραφή της πληροφορίας από το μαγνητικό πεδίο της κεφαλής.
- ✓ Αρκετό υψηλό σημείο Curie ώστε να υπάρχει θερμοκρασιακή σταθερότητα.
- ✓ Το υλικό πρέπει να έχει χαμηλό κόστος, να είναι χημικά, μηχανικά και περιβαλλοντικά σταθερό/ανθεκτικό και η διαδικασία παραγωγής του να είναι απλή. [34]

Στην κάθετη εγγραφή όλες οι παραπάνω απαιτήσεις πρέπει να ικανοποιούνται και επιπλέον ο εύκολος άξονας πρέπει να είναι κάθετος στο επίπεδο του υμενίου, δηλαδή,

$$2K_1/\mu_0 M_S > NM_S \quad (3.1)$$

το πεδίο ανισοτροπίας πρέπει να υπερβαίνει την ανισοτροπία σχήματος. Κάθετη ανισοτροπία έχει παρατηρηθεί σε πολυστρωματικά υμένια Co/Pt ή Co/Pd.



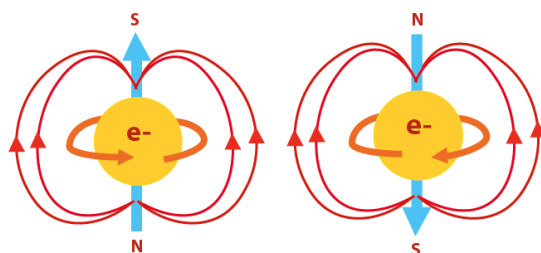
Σχήμα 3.4: Διαμήκης (πάνω) και κάθετη(κάτω) εγγραφή δεδομένων.

Τέλος, μια πολύ νέα τεχνολογία, αυτή των patterned μέσων, προβλέπεται να κατορθώσει την επίτευξη τρομερά υψηλών πυκνοτήτων από 1 έως 1.5Tb in⁻². Σε αυτή την περίπτωση το μαγνητικό μέσο είναι μια πολυστρωματική δομή υμενίων Co/Pd που εναποτίθενται μέσω ιοντοβολής πάνω σε λιθογραφικά προετοιμασμένη διάταξη από νανοκλώνες SiO₂. [7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΠΙΝΤΡΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

4.1 Εισαγωγή

Το ηλεκτρόνιο είναι ένα κβαντισμένο σωματίδιο, που εκτός από φορτίο, έχει και στροφορμή σπιν S της οποίας η προβολή στον άξονα z μπορεί να πάρει δύο τιμές $S_z = \pm\hbar/2$, ενώ η προβολή της μαγνητικής ροπής του σπιν αντίστοιχα παίρνει τις τιμές $\pm\mu_B$. Παρά το γεγονός ότι το σπιν του ηλεκτρονίου είναι γνωστό εδώ και ένα αιώνα, δεν έχει αξιοποιηθεί στις μέχρι τώρα ηλεκτρονικές εφαρμογές, οι οποίες βασίζονται μόνο στο φορτίο του. Η ηλεκτρονική του σπιν που αναφέρεται πιο σύντομα και σαν σπιντρονική (Spintronics, σαν σύντμηση του Spin Elec-tronics) ή και σαν μαγνητοηλεκτρονική αξιοποιεί τη στροφορμή του σπιν και το φορτίο του ηλεκτρονίου με στόχο να προσθέσει νέες λειτουργικότητες στις ηλεκτρονικές συσκευές.

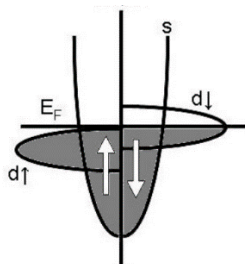


Σχήμα 4.1: Η σπιντρονική βασίζεται στην δημιουργία, τον χειρισμό και την ανίχνευση ρευμάτων με φορείς που έχουν πολωμένο spin, σε αντίθεση με τη συμβατική ηλεκτρονική που βασίζεται μόνο στο φορτίο του.

Σκοπός της ηλεκτρονικής του σπιν είναι η δημιουργία ηλεκτρονικών διατάξεων που, σε αντίθεση με τις συμβατικές ηλεκτρονικές διατάξεις, θα βασίζονται στον χειρισμό του σπιν του ηλεκτρονίου, δηλαδή, στη διαφοροποίηση μεταξύ των φορέων με σπιν πάνω και σπιν κάτω. Για να πραγματοποιηθούν τέτοιες διατάξεις θα πρέπει να δημιουργούμε, να χειριζόμαστε και να ανιχνεύουμε ρεύματα με φορείς ‘πολωμένους ως προς το σπιν’. Η στροφορμή του σπιν του ηλεκτρονίου αποτελεί τη βάση του μαγνητισμού στερεάς κατάστασης και της ηλεκτρονικής του σπιν. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι συνήθως ροή φορτίου, αλλά μπορεί να είναι και ροή στροφορμής, δηλαδή ρεύμα με φορείς πολωμένων σπιν. Με άλλα λόγια, η αποτελεσματικότητα των μαγνητοηλεκτρικών διατάξεων εξαρτάται από το κατά πόσο το σπιν των φορέων αγωγιμότητας στη στάθμη Fermi είναι συγκεκριμένου τύπου (πόλωση σπιν). Δηλαδή, στα κλασικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, οι πληροφορίες μεταφέρονται μέσω ρευμάτων φορτίου ενώ στη σπιντρονική, οι πληροφορίες μπορούν να κωδικοποιηθούν και να

επεξεργαστούν με βάση τον προσανατολισμό του σπιν των ηλεκτρονίων (π.χ. "σπιν πάνω" και "σπιν κάτω"). [6,39]

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, σε αντίθεση με τα παραμαγνητικά, υπάρχει εξ ορισμού διαφορά στον πληθυσμό των υποζωνών καταστάσεων στη στάθμη Fermi, λόγω των αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, ο σιδηρομαγνητισμός οφείλεται στο ότι οι d ζώνες διαχωρίζονται ως προς το σπιν (άνω και κάτω) ενώ η αγωγιμότητα οφείλεται στα ηλεκτρόνια τύπου s με σπιν άνω, επειδή τα s ηλεκτρόνια έχουν μικρή ενεργό μάζα και άρα μεγάλη ευκινησία.



Σχήμα 4.2: Αγωγιμότητα στα στοιχεία μετάπτωσης (Fe, Co, Ni).

Με τον όρο μαγνητοαντίσταση αναφερόμαστε στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης οποιουδήποτε υλικού (μαγνητικού και μη) σαν συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Σε όλα τα μη μαγνητικά μέταλλα παρατηρείται αύξηση της αντίστασης σαν συνάρτηση του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, και ορίζεται ως:

$$MR = [\rho(H) - \rho(0)] / \rho(0) \quad (4.1)$$

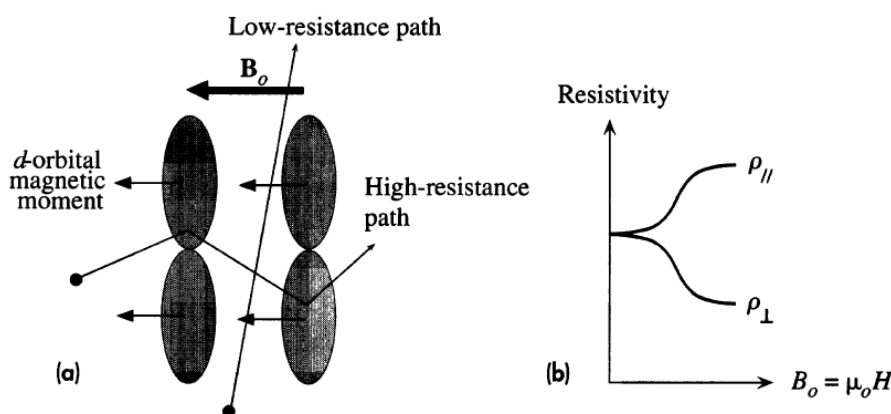
Όπου $\rho(H)$ και $\rho(0)$ είναι η αντίσταση παρουσία και μη μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα. [39]

Το είδος αυτό της μαγνητοαντίστασης αναφέρεται ως “Συνήθης (θετική) Μαγνητοαντίσταση” (Ordinary MagnetoResistance), και γενικά είναι ανάλογη του H^2 . Θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα της κίνησης των ηλεκτρονίων σε κυκλοτρονικές τροχιές παρουσία μαγνητικού πεδίου. Επειδή είναι ασθενής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς εφαρμογών. Γενικά στις εφαρμογές δεν μας ενδιαφέρει μόνο το πόσο μεγάλο είναι το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης αλλά και το πόσο ευαίσθητο είναι στην εφαρμογή πεδίου. Όπως γνωρίζουμε, η μαγνητική κατάσταση στα σιδηρομαγνητικά υλικά μεταβάλλεται πολύ εύκολα με την επιβολή ασθενών πεδίων, άρα είναι φανερό ότι τα φαινόμενα μαγνητοαντίστασης που συνδέονται με τη μαγνήτιση μπορεί να είναι πολύ πιο χρήσιμα στα υλικά αυτά. Στους σιδηρομαγνήτες παρατηρούνται και άλλα ενδογενή φαινόμενα μαγνητοαντίστασης με αξιοσημείωτα την Ανισοτροπική Μαγνητοαντίσταση και την Κολοσσιαία Μαγνητοαντίσταση. Η Ανισοτροπική Μαγνητοαντίσταση (Anisotropic Magneto Resistance, AMR), ιστορικά ήταν το πρώτο φαινόμενο που βρήκε εφαρμογή σε κεφαλή ανάγνωσης σκληρού δίσκου. Στο φαινόμενο αυτό, η μεταβολή της αντίστασης του υλικού, εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής ρεύματος σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο. Η φυσική προέλευση της μαγνητοαντίστασης βασίζεται στο γεγονός ότι το εφαρμοζόμενο πεδίο μπορεί να προκαλέσει την κλίση των 3d

ηλεκτρονιακών τροχιακών (σχήμα 4.3 α). Το πεδίο περιστρέφει τα 3d τροχιακά, πράγμα το οποίο αλλάζει τη σκέδαση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας ανάλογα με τη διεύθυνση της διάδοσής τους, για αυτό οι $\rho_{//} \neq \rho_{\perp}$ (σχήμα 4.3 β). Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας s σκεδάζονται από τα d ηλεκτρόνια, καθώς στη στάθμη Fermi οι d καταστάσεις υβριδίζονται με τις s, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού να εξαρτάται από την μαγνητική του κατάσταση. Αν ορίσουμε την αντίσταση με το πεδίο παράλληλα και κάθετα στο ρεύμα $\rho_{//}$ και $\rho_{\perp}$ αντίστοιχα, στην γενικότερη περίπτωση το $\rho_{\perp}$ μειώνεται και το $\rho_{//}$ αυξάνεται με το H. η γωνιακή εξάρτηση της αντίστασης ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\rho_{//} + 2\rho_{\perp}}{3} + (\rho_{//} - \rho_{\perp})(\cos^2\theta - \frac{1}{3}) \quad (4.2)$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ μαγνητικής ροπής και ρεύματος. Η AMR αφορά σε μικρή μεταβολή της αντίστασης, αλλά είναι χρήσιμη σε αισθητήρες, δεδομένου ότι η μεταβολή της αντίστασης σε λεπτά υμένια επιτυγχάνεται σε πολύ μικρά πεδία, της τάξης των mT.



Σχήμα 4.3: Η προέλευση της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR). Τα ηλεκτρόνια που κινούνται παράλληλα με το πεδίο υφίστανται περισσότερη σκέδαση απ'ότι εκείνα που κινούνται κάθετα στο πεδίο. (β) η ειδική αντίσταση εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος σε σχέση με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

Ένα άλλο είδος μαγνητοαντίστασης είναι και η “Κολοσσιαία Μαγνητοαντίσταση” (Colossal MagnetoResistance, CMR). Το φαινόμενο της CMR αναφέρεται στη σημαντική πτώση της αντίστασης που παρατηρείται κοντά στη θερμοκρασία Currie, σε υλικά που διέπονται από διπλή ανταλλαγή και υφίστανται την επίδραση ενός υψηλού μαγνητικού πεδίου. Παρά την εντυπωσιακή μεταβολή της αντίστασης, η CMR είναι περιορισμένης χρήσης επειδή απαιτούνται γιγαντιαία μαγνητικά πεδία. Από πρακτική άποψη, τα πιο σημαντικά είδη μαγνητοαντίστασης στα πολυστρωματικά υμένια είναι η “Γιγαντιαία Μαγνητοαντίσταση” και η “Μαγνητοαντίσταση Σήραγγας”. [7,37]

4.2 Γιγαντιαία Μαγνητοαντίσταση

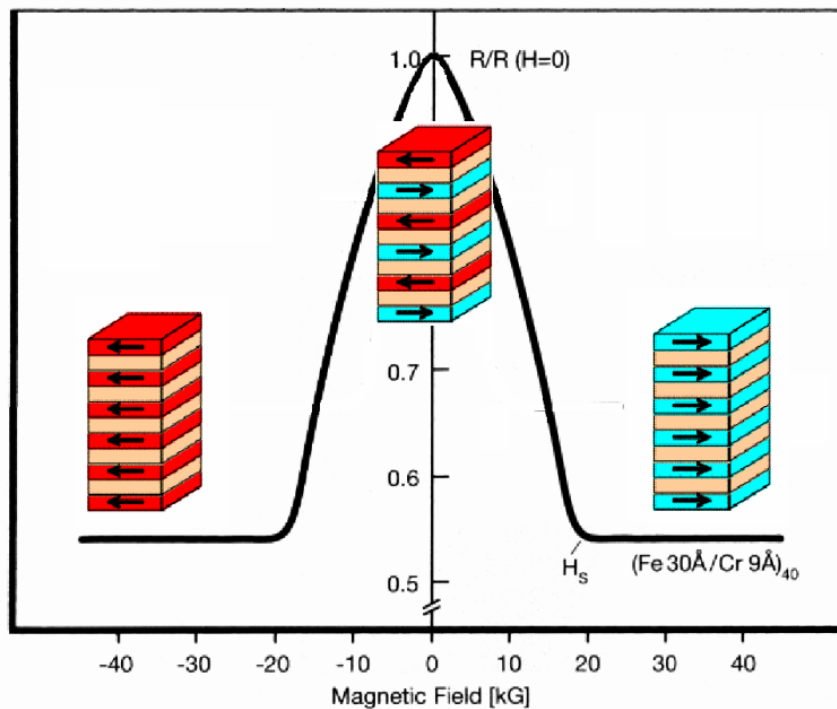
Η ανακάλυψη του φαινομένου της Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης (Giant Magnetic Resistance, GMR) έγινε το 1988 από τον Albert Fert και ανεξάρτητα από τον Peter Grunberg. Η GMR παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε πολυστρωματικά υμένια Fe/Cr, και έφερε επανάσταση σε διατάξεις που βασίζονται στη μεταφορά πληροφορίας. Οι A.Fert και P.Grunberg θεωρούνται πρωτεργάτες των spintronics και ανταμείφθηκαν με το βραβείο Nobel φυσικής το 2007, για την ανακάλυψη της βαλβίδας ιδιοπεριστροφής – σπιν (spin valve). [41]

Το φαινόμενο το οποίο παρατήρησαν ήταν μια μεγάλη αλλαγή στην αντίσταση όταν η μαγνήτιση των σιδηρομαγνητικών διεπαφών άλλαζε από παράλληλη σε αντιπαράλληλη. Στην απλούστερη μορφή της, η ειδική πολυστρωματική δομή έχει δύο στρώματα σιδηρομαγνητικού υλικού (Fe, CoFe, NiFe, κλπ.), τα οποία διαχωρίζονται από ένα στρώμα *αγώγιμο* μη μαγνητικού μετάλλου (Cr, Ru, Cu), το οποίο λειτουργεί ως διαχωριστικό. Τα μαγνητικά στρώματα είναι λεπτά (με πάχος μικρότερο από 10 nm) και το μη μαγνητικό στρώμα είναι ακόμα λεπτότερο. Οι μαγνητίσεις των δύο σιδηρομαγνητικών στρωμάτων δεν είναι αυθαίρετες, αλλά εξαρτώνται από το πάχος του διαχωριστικού, καθώς τα δύο στρώματα είναι έμμεσα συζευγμένα μέσω αυτού του λεπτού διαχωριστικού. Το πάχος του διαχωριστικού είναι κατάλληλο έτσι ώστε μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων, μέσω των αλληλεπιδράσεων RKKY, να δημιουργείται αντιπαράλληλη σύζευξη. Αυτή η διάταξη αναφέρεται και σαν <<τεχνητός αντισιδηρομαγνήτης>> (artificial antiferromagnet), στους οποίους θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Σε ένα πολυστρωματικό υμένιο π.χ. Fe/Cr, το πάχος του διαχωριστικού (Cr) προκαλεί αντισιδηρομαγνητική σύζευξη των στρωμάτων Fe, οπότε η επίδραση ενός εξωτερικού πεδίου έχει να κάνει με τον παραλληλισμό των αντιπαράλληλων στρωμάτων. Η ηλεκτρική αντίσταση της δομής αυτής είναι υψηλή όταν οι μαγνητίσεις των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων είναι αντιπαράλληλες και χαμηλή όταν αυτές είναι παράλληλες. Η διαφορά στην αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_P}\right) = \frac{R_{AP}-R_P}{R_P} \quad (4.3)$$

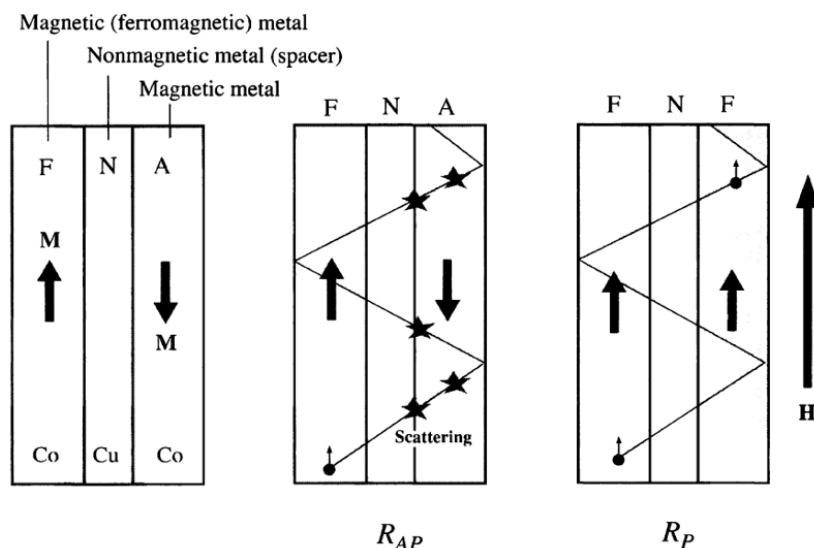
Όπου R_{AP} η αντίσταση όταν η μαγνήτιση είναι αντιπαράλληλη στα δύο σιδηρομαγνητικά στρώματα και R_P η αντίσταση όταν η μαγνήτιση είναι παράλληλη στα σιδηρομαγνητικά στρώματα. Η αλλαγή της αντίστασης είναι της τάξης 80% σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος ενώ σε χαμηλές μπορεί να ξεπεράσει και το 100% εξού και ο όρος γιγαντιαία. [42]

Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης μπορεί να παρατηρηθεί από ένα ρεύμα με ροή παράλληλα ή κάθετα στο επίπεδο που ορίζουν τα στρώματα. Τα περισσότερα πειράματα χρησιμοποιούν τον πρώτο τρόπο, δηλαδή ρεύμα παράλληλο στο επίπεδο αλλά η μεγαλύτερη μεταβολή παρατηρείται για ρεύματα κάθετα στο επίπεδο.



Σχήμα 4.4: Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης σε πολυστρωματικό υμένιο Fe/Cr.

Η θεωρητική εξήγηση της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης βασίζεται στην διαφορετική σκέδαση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας όταν οι μαγνητίσεις των στρωμάτων είναι παράλληλες και αντιπαράλληλες μεταξύ τους. Δηλαδή, όταν οι μαγνητίσεις των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων είναι παράλληλες, η πυκνότητα καταστάσεων για ηλεκτρόνια που έχουν το αντίστοιχο spin είναι σχετικά υψηλή και η σκέδαση των φορέων είναι μικρή, με αποτέλεσμα η αντίσταση της δομής να είναι μικρή. Αντιθέτως, όταν οι μαγνητίσεις των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων είναι αντιπαράλληλες, οι φορείς πλειονότητας αντιμετωπίζουν στο δεύτερο σιδηρομαγνητικό στρώμα μια χαμηλή πυκνότητα καταστάσεων, με αποτέλεσμα η σκέδαση τους σε αυτό το στρώμα να είναι ισχυρή. Αυτό συνεπάγεται ότι η δομή σε αυτή την περίπτωση εμφανίζει υψηλή μαγνητική αντίσταση. [41]



Σχήμα 4.5: Αναπαράσταση του φαινομένου της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης. (α) Η βασική, τριών στρωμάτων δομή, (β) αντιπαράλληλα μαγνητικά στρώματα με υψηλή αντίσταση R_{AP} , (γ) ένα εξωτερικό πεδίο ευθυγραμμίζει τα στρώματα, η παράλληλη ευθυγράμμιση έχει χαμηλότερη αντίσταση R_P .

Άλλο ένα σημαντικό είδος μαγνητοαντίστασης είναι και αυτό που αποκαλείται <<Μαγνητοαντίσταση Σήραγγας>> (Tunneling MagnetoResistance, TMR). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν το διαχωριστικό υμένιο, που στην περίπτωση της GMR είναι ένα μη μαγνητικό και αγωγίμο, αντικατασταθεί με ένα μονωτικό υμένιο, τόσο λεπτό ώστε να εμφανίζεται το φαινόμενο διάβασης σήραγγας. Το φαινόμενο της TMR σε θερμοκρασία περιβάλλοντος παρατηρήθηκε πρώτη φορά σε μονωτικά διαχωριστικά βασισμένα στην αλούμινα Al_2O_3 , τα οποία εμφάνιζαν τιμές TMR 20% και 50%. [37,41] Η επανάσταση όμως ήλθε το 2004 όταν ως διαχωριστικό υμένιο χρησιμοποιήθηκε το MgO , μέσω του οποίου η διάταξη έφτανε τιμές TMR μέχρι και 200% λόγω της κρυσταλλικότητας του MgO . Η διαφορά στη αντίσταση, όπως και στην GMR δίνεται από την ίδια σχέση:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_P}\right) = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \quad (4.4)$$

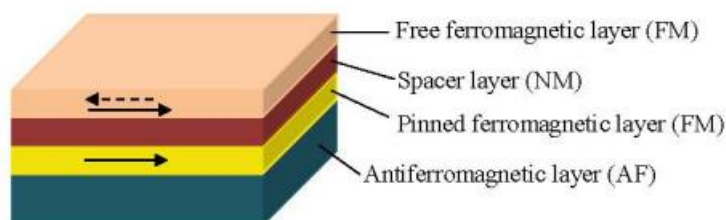
Όπου R_{AP} και R_P η αντίσταση όταν η μαγνήτιση είναι αντιπαράλληλη και παράλληλη αντίστοιχα, στα δύο σιδηρομαγνητικά στρώματα. [44]

4.3 Βαλβίδα Spin

Η βαλβίδα σπιν είναι ένα πολύ λεπτό πολυστρωματικό υμένιο. Η δομή της αποτελείται από τέσσερα μεταλλικά στρώματα: δύο διαφορετικά στρώματα μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού (FM – ελεύθερο και αγκιστρωμένο) τα οποία χωρίζονται από ένα μη μαγνητικό στρώμα (NM) και ένα αντισιδηρομαγνητικό στρώμα. Το πρώτο σιδηρομαγνητικό στρώμα είναι πακτωμένο από ένα αντισιδηρομαγνητικό, μέσω σύζευξης της πόλωσης ανταλλαγής που αναπτύσσεται μεταξύ ενός σιδηρομαγνητικού και αντισιδηρομαγνητικού στρώματος. Έτσι, λόγω αυτής της πόλωσης ανταλλαγής η

μαγνήτιση του πρώτου σιδηρομαγνητικού στρώματος είναι <<καρφωμένη>> και δεν αλλάζει εύκολα κατεύθυνση σε σχετικά μικρά εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Το δεύτερο σιδηρομαγνητικό στρώμα (το πάνω) είναι ελεύθερο να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο, δηλαδή αντιστρέφει εύκολα την κατεύθυνση της μαγνήτισής του (σχεδόν σε μηδενικά πεδία), καθώς έχει πολύ μικρό συνεκτικό πεδίο. [38]

Για την επίτευξη υψηλής ευαισθησίας σε μια βαλβίδα spin, θα πρέπει η σύζευξη ανταλλαγής μεταξύ των δύο στρωμάτων να είναι όσο το δυνατόν ασθενής. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή του κατάλληλου πάχους του διαχωριστικού στρώματος. Ένας πιο γενικός ορισμός είναι: μια οποιαδήποτε στοίβαξη υμενίων που περιλαμβάνει ελεύθερα και αγκιστρωμένα στρώματα και παρουσιάζει μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης, όταν η μαγνήτιση του ενός στρώματος αντιστρέφεται ως προς τα υπόλοιπα, μπορεί να αποτελέσει μια βαλβίδα spin.

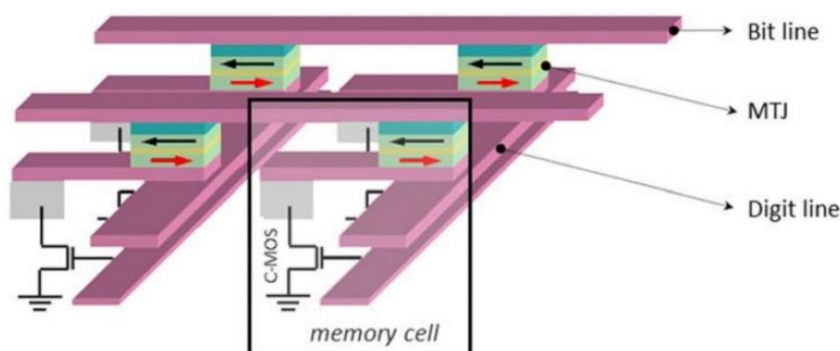


Σχήμα 4.6: Μια βαλβίδα spin με διάταξη δύο σιδηρομαγνητικών (FM) στρωμάτων, τα οποία χωρίζονται από ένα μη μαγνητικό στρώμα (NM). Το πάνω στρώμα είναι ελεύθερο και το κάτω είναι αγκιστρωμένο μέσω ενός σιδηρομαγνήτη.

Η βαλβίδα spin μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εξάρτημα που είναι ευσταθές σε δύο καταστάσεις, μια με χαμηλή αντίσταση (παράλληλη μαγνήτιση μεταξύ των στρωμάτων) και μια με υψηλή αντίσταση (αντιπαράλληλη μαγνήτιση). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αισθητήρας, η αντίσταση του οποίου μεταβάλλεται συνεχόμενα, καθώς η μαγνήτιση του ενός στρώματος στρέφεται ως προς τη μαγνήτιση του άλλου. Η βαλβίδα spin με πόλωση ανταλλαγής είναι καλύτερη στις περισσότερες εφαρμογές αισθητήρων ή διατάξεων αποθήκευσης πληροφορίας. Κάθε ευαισθησία του ελεύθερου στρώματος σε πεδία που παράγονται από το αγκιστρωμένο στρώμα μπορεί να εξαλειφθεί αντικαθιστώντας το με ένα τεχνητό αντισιδηρομαγνήτη, η μια πλευρά του οποίου είναι συζευγμένη με το αντισιδηρομαγνητικό στρώμα ώστε να υπάρχει πόλωση ανταλλαγής. Η μαγνήτιση ενός τεχνητού αντισιδηρομαγνήτη είναι μηδέν. Μια ελαφρά τροποποίηση αποτελούν οι λεγόμενες ψευδο-βαλβίδες spin στις οποίες χρησιμοποιούνται απλώς δυο σιδηρομαγνητικά στρώματα με διαφορετικό συνεκτικό πεδίο, οπότε η αντιπαράλληλη μαγνήτιση επιτυγχάνεται για αντίστροφα πεδία μεταξύ των τιμών των συνεκτικών πεδίων των δυο διαφορετικών σιδηρομαγνητικών στρωμάτων. Οι μαγνητικές επαφές σήραγγας (MTJ, magnetic tunneling junctions) είναι διατάξεις παρόμοιες με τις βαλβίδες spin, με τη διαφορά ότι τα δυο σιδηρομαγνητικά στρώματα αυτή τη φορά χωρίζονται από ένα ενδιάμεσο μονωτικό στρώμα, μέσα από το οποίο τα ηλεκτρόνια μπορούν να περάσουν μέσω του φαινομένου σήραγγας. Συστοιχίες από τέτοιες επαφές χρησιμοποιούνται σαν μόνιμες μνήμες υπολογιστών γνωστές ως MRAM. Οι επαφές σήραγγας είναι διατεταγμένες σε στήλες και σειρές η

κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη γραμμή << bit lines και digit lines>> ώστε να είναι δυνατή η διευθυνσιοδότηση. [46]

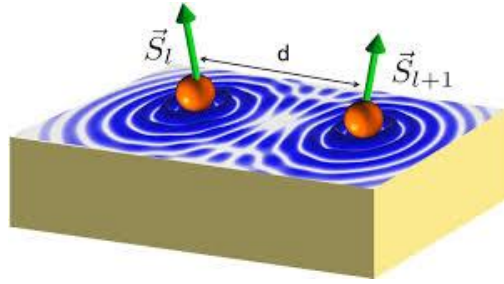
Δύο ορθογώνιοι μαγνητικοί παλμοί συνδυάζονται παρέχοντας ρεύμα σε μια από τις bit lines και μια από τις digit lines ταυτόχρονα, ενώ το αντίστοιχο τρανζίστορ είναι ανοιχτό. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η επιλογή της εγγραφής, δηλαδή περνάει αρκετά υψηλό ρεύμα ώστε να προκαλέσει αντιστροφή της μαγνήτισης στο ελεύθερο μαγνητικό στρώμα, ενώ το άλλο παραμένει σταθερό λόγω της ύπαρξης αντισιδηρομαγνητικού υποστρώματος. Η διαδικασία ανάγνωσης ενός bit είναι η εξής: παρέχεται τάση μέσω κατάλληλου κυκλώματος, σε μία από τις bit lines και τίθεται και το αντίστοιχο C-MOS τρανζίστορ σε αγωγή. Αν η MTJ έχει παράλληλες μαγνητίσεις, τότε ανιχνεύεται ρεύμα και διαβάζεται η κατάσταση '1', ενώ αντίθετα, αν οι μαγνητίσεις είναι αντιπαράλληλες, τότε δεν έχουμε ροή ρεύματος και το κελί μνήμης είναι στην κατάσταση '0'. [38]



Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση μιας συμβατικής μνήμης MRAM όπου φαίνονται δια διευκρινιστικούς λόγους τέσσερα κελιά μνήμης (4 -bits).

4.4 Αλληλεπιδράσεις RKKY

Το πρότυπο *s-d* αναφέρει πως υπάρχει μια σύζευξη μεταξύ των σπιν *s* των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας με τα σπιν των ηλεκτρονίων που βρίσκονται πιο εσωτερικά στα ιόντα ενός μετάλλου. Η σύζευξη αυτή είναι μια επιτόπια αλληλεπίδραση όπου η ζώνη αγωγιμότητας πολώνεται παράλληλα ή αντιπαράλληλα προς τα ιοντικά σπιν. Η συγκεκριμένη σύζευξη εμφανίζεται στα στοιχεία μετάπτωσης (3d) καθώς και στις σπάνιες γαίες (4f). Στα στοιχεία μετάπτωσης, τα 3d τροχιακά αλληλεπιδρούν μέσω των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας 4s ενώ στις σπάνιες γαίες τα 4f τροχιακά αλληλεπιδρούν μέσω των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας 5d/6s. Οι Ruderman – Kittel – Kasuya – Yoshida προέβλεψαν ότι μια εντοπισμένη μαγνητική πρόσμιξη προκαλεί μια ταλαντούμενη και περιοδική πόλωση του σπιν στα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, που φθίνει συναρτήσει της απόστασης R^3 .



Σχήμα 4.8: Σύζευξη ανταλλαγής μεταξύ δύο γειτονικών μαγνητικών σπιν μέσω των ταλαντώσεων των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας (RKKY oscillations in the spin relaxation rates of atomic-scale nanomagnets).

Η σύζευξη αυτή της πόλωσης με κάποια άλλη μαγνητική ροπή σε απόσταση R δημιουργεί μια έμμεση αλληλεπίδραση της οποίας το πρόσημο εμφανίζει ταλαντώσεις σαν συνάρτηση της απόστασης R των μαγνητικών ατόμων. Επίσης η πόλωση αυτή των σπιν σχετίζεται με τις ταλαντώσεις Friedel στην πυκνότητα φορτίου γύρω από μια πρόσμιξη (διαταραχή -ατέλεια), που οδηγεί σε μια μεγάλης εμβέλειας εναλλασσόμενη σύζευξη των ιοντικών σπιν. Γενικά, η RKKY σύζευξη ανήκει στην κατηγορία των έμμεσων αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής, στην οποία οι γειτονικές μαγνητικές ροπές βρίσκονται σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Αποτελεί την κυρίαρχη αλληλεπίδραση σε μέταλλα όπου υπάρχει μικρή ή καθόλου άμεση επικάλυψη μεταξύ γειτονικών μαγνητικών ηλεκτρονίων και δρα μέσω ηλεκτρονίων αγωγιμότητας. Αυτός ο τύπος ανταλλαγής προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Ruderman και Kittel και μετά από τους Kasuya και Yoshida για να δώσει τη θεωρία που σήμερα είναι γνωστή ως RKKY σύζευξη ανταλλαγής. [47]

Για σφαιρική επιφάνεια Fermi με ακτίνα k_F η σύζευξη RKKY είναι ανάλογη της ποσότητας:

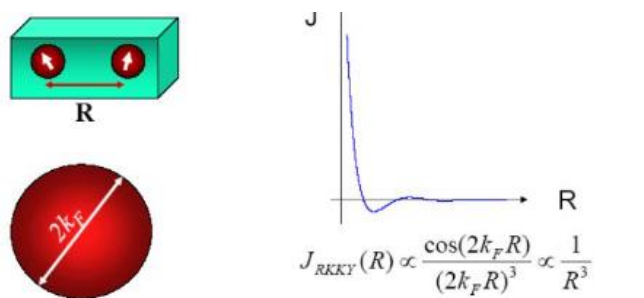
$$J_{\text{RKKY}}(R) \propto \frac{\cos(2 k_F R)}{(k_F R)^3} = \frac{1}{R^3} \quad (4.5)$$

Επίσης, αυτός ο τύπος σύζευξης, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των έμμεσων αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής, είναι ανισοτροπικός και μακράς εμβέλειας, γεγονός που συχνά οδηγεί σε περίπλοκες διατάξεις σπιν. Γενικά ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των ατόμων η αλληλεπίδραση μπορεί να είναι σιδηρομαγνητική ή αντισιδηρομαγνητική. Τέτοιου είδους ταλαντούμενη ανταλλαγή παρατηρήθηκε και σε σιδηρομαγνητικά πολυστρωματικά υμένια, όταν αυτά διαχωρίζονται από ένα μη μαγνητικό στρώμα:

(σιδηρομαγνητικό στρώμα 1) / (μη μαγνητικό στρώμα) / σιδηρομαγνητικό στρώμα 2). Με κατάλληλη προσαρμογή του πάχους του ενδιάμεσου μη μαγνητικού στρώματος (με ακρίβεια ενός ατομικού στρώματος) μπορούμε να έχουμε ελεγχόμενη (ως προς το πρόσημο και την ισχύ) σύζευξη μεταξύ των δύο μαγνητικών στρωμάτων. Παραδείγματα τέτοιων σύνθετων υλικών είναι τα Fe/Cr/Fe, Co/Cu/Co, CoCrPtTa/Ru/CoCrPtTa κλπ.

Δηλαδή, αλλάζοντας το πάχος του διαχωριστικού μη μαγνητικού στρώματος, μπορούμε να πετύχουμε σιδηρο – ή αντισιδηρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των

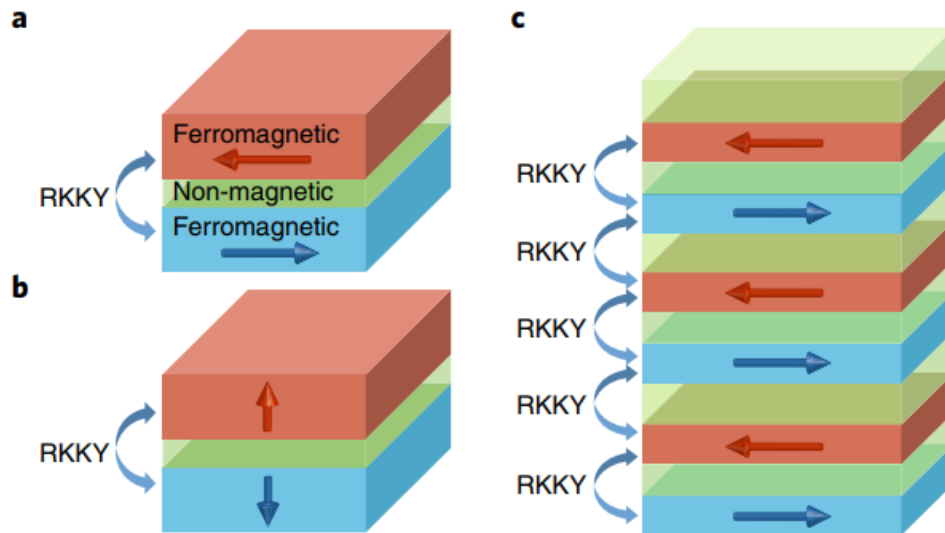
μαγνητικών στρωμάτων ενώ για παχιά διαχωριστικά στρώματα η έμμεση σύζευξη ανταλλαγής μεταξύ των στρωμάτων καταστέλλεται. [48]



Σχήμα 4.9: Ισχύς και πρόσημο της έμμεσης ανταλλαγής RKKY μεταξύ δύο μαγνητικών στρωμάτων Fe σαν συνάρτηση του πάχους του ενδιάμεσου μη μαγνητικού στρώματος.

4.5 Συνθετικοί (τεχνητοί) Αντισιδηρομαγνήτες

Οι τεχνητοί (συνθετικοί) αντισιδηρομαγνήτες (artificial or synthetic antiferromagnet) SAF, είναι πολυστρωματικές δομές σιδηρομαγνητικών στρωμάτων ή σιδηρομαγνητικών κραμάτων (Fe, CoFe, NiFe κλπ.) μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μη μαγνητικό στρώμα (όπως Cr, Ru, Cu) με κατάλληλο πάχος, ώστε μέσω των έμμεσων αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής RKKY (οι οποίες εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ των μαγνητικών ροπών) να δημιουργείται αντισιδηρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων. Αυτή η αντιπαράλληλη σύζευξη ήταν και η αιτία ανακάλυψης του φαινομένου της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης GMR και της μαγνητοαντίστασης σήραγγας TMR, οι οποίες έδωσαν το έναυσμα για τους τομείς της σπιντρονικής και του νανομαγνητισμού. [42]



Σχήμα 4.10: Σχηματική αναπαράσταση συνθετικών αντισιδηρομαγνητών. **α)** Διστρωματικό υμένιο με μαγνήτιση παράλληλα στο επίπεδο. **β)** Διστρωματικό υμένιο με μαγνήτιση κάθετα στο επίπεδο. **γ)** Πολυστρωματική δομή. Τα βέλη μέσα σε κάθε σιδηρομαγνητικό στρώμα υποδεικνύουν την κατεύθυνση της μαγνήτισης. [45]

Στα λεπτά υμένια και στις πολυστρωματικές δομές εμφανίζονται δύο ειδών ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Το πρώτο χαρακτηριστικό αναφέρεται στην εξάρτηση των ιδιοτήτων των δομών από το πολύ μικρό πάχος των στρωμάτων όπως είναι η ενίσχυση ή μείωση των μαγνητικών ροπών, η επιφανειακή και διεπιφανειακή ανισοτροπία χαμηλών διαστάσεων κλπ. Το δεύτερο χαρακτηριστικό των παραπάνω δομών αναφέρεται σε ενδιαφέροντα φαινόμενα (όπως το GMR) και ιδιότητες οι οποίες σχετίζονται με την ύπαρξη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στρωμάτων όπως είναι για παράδειγμα οι αλληλεπιδράσεις RKKY και DMI. Όπως έχουμε αναφέρει και πιο πάνω, οι έμμεσες αλληλεπιδράσεις RKKY σε τεχνητές υπερδομές λεπτών στρωμάτων, εμφανίζονται υπό τη μορφή ταλαντώσεων το πρόσημο των οποίων εξαρτάται από το πάχος του μη μαγνητικού στρώματος. Με κατάλληλη εφαρμογή του πάχους του μη μαγνητικού στρώματος μπορούμε να πετύχουμε παράλληλη ή αντιπαράλληλη (SAF) σύζευξη μεταξύ των μαγνητικών στρωμάτων. Τέτοιες αντισιδηρομαγνητικές ιδιότητες (αντιπαράλληλη σύζευξη) παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά σε τριστρωματική δομή Fe/Cr/Fe. [49]

Μεταξύ των συνθετικών αντισιδηρομαγνητών SAF και των συνήθων αντισιδηρομαγνητών σε ατομικό επίπεδο υπάρχουν κάποιες διαφορές οι οποίες αναφέρονται παρακάτω.

- Μια σημαντική διαφορά είναι ότι η σύζευξη ανταλλαγής μεταξύ των στρωμάτων στους συνθετικούς αντισιδηρομαγνήτες είναι πολύ ασθενέστερη από την άμεση ανταλλαγή η οποία απαντάται στους κρυσταλλικούς αντισιδηρομαγνήτες. Αυτή η διαφορά επιτρέπει τον έλεγχο της αντισιδηρομαγνητικής τάξης πολύ πιο εύκολα σε χαμηλά πεδία στους SAF από ότι στους κρυσταλλικούς αντισιδηρομαγνήτες.
- Επιπλέον, η μαγνητική κατάσταση στους SAF είναι εύκολα ανιχνεύσιμη με το μαγνητοοπτικό φαινόμενο Kerr και το ανώμαλο φαινόμενο Hall. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα, ότι η δυναμική της μαγνήτισης στους SAF μπορεί να μελετηθεί με τις ίδιες τεχνικές που χρησιμοποιούνται και για τους σιδηρομαγνήτες.

- Μια άλλη διαφορά είναι ότι η επαναλαμβανόμενη απόσταση της αντισιδηρομαγνητικής τάξης στους SAF είναι μεγαλύτερη από ότι στους κρυσταλλικούς αντισιδηρομαγνήτες. Στους τελευταίους, η μαγνητική τάξη εναλλάσσεται σε ατομικές κλίμακες μήκους, ενώ το πάχος των πολυστρωματικών δομών είναι μερικά νανόμετρα. [45]

4.6 Εφαρμογές SAF

Οι δυναμικές ιδιότητες των μαγνητικών συστημάτων αποκτούν συνεχώς μεγαλύτερο ενδιαφέρον, ιδίως αν ληφθεί υπόψη η προοπτική της ενσωμάτωσης μαγνητικών υλικών στην επεξεργασία δεδομένων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Ειδικότερα, η δυναμική απόκριση των συνθετικών αντισιδηρομαγνητών (SAF), μπορεί να φτάσει έως και terahertz, τάξεις μεγέθους υψηλότερες από την περιοχή των χαμηλών gigahertz που συνήθως συναντάται στους σιδηρομαγνήτες, οδηγώντας στη δυνατότητα κατασκευής διατάξεων υψηλότερων συχνοτήτων από αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η δυνατότητα συντονισμού της μαγνητικής κατάστασης σε χαμηλό πεδίο στις συγκεκριμένες πολυστρωματικές δομές άνοιξε το δρόμο για την πιθανή ενσωμάτωσή τους σε σπιντρονικές διατάξεις. [22]

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση (GMR) είναι ένα φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε πολυστρωματικές δομές, του τύπου: μαγνητικό στρώμα – μεταλλικό μη μαγνητικό στρώμα – μαγνητικό στρώμα, όπου μεταξύ των μαγνητικών στρωμάτων αναπτύσσεται αντισιδηρομαγνητική σύζευξη μέσω του μεταλλικού μη μαγνητικού στρώματος. Έτσι, μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των συνθετικών αντισιδηρομαγνητών (SAF) είναι ή χρήση τους είτε ως αισθητήρες σε μαγνητικές μνήμες τυχαίας προσπέλασης (MRAM), είτε ως κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας, αφού επιτρέπουν υψηλή μαγνητοαντίσταση για πάρα πολύ μικρά πάχη. Επίσης, μια άλλη εφαρμογή των συνθετικών αντισιδηρομαγνητών είναι στις βαλβίδες - spin, όπου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής του σπιν-πολωμένου ρεύματος. Η δυνατότητα ρύθμισης της δομής των SAF και γενικά των πολυστρωματικών υμενίων, επιτρέπει την βελτιστοποίηση ιδιοτήτων

που είναι επιθυμητές για εφαρμογές όπως είναι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου και η μαγνητική μνήμη τυχαίας προσπέλασης MRAM. Σε αυτές τις περιπτώσεις σημαντικό είναι ο χειρισμός, η ευαισθησία και η σταθερότητα των διάσπαρτων μαγνητικών πεδίων, καθώς και οι επιπλέον βαθμοί ελευθερίας που παρέχονται στο σύστημα λόγω της πολυστρωματικής δομής, σε σχέση με τα κοινά συμβατά υλικά. Ένα βασικό εμπόδιο που δεν επέτρεψε την ευρεία χρήση των MRAM μέχρι τώρα είναι οι ωμικές απώλειες. Μια λύση της είναι ο έλεγχος της μαγνητικής κατάστασης μέσω ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης και όχι ρεύματος. Αυτό αποτελεί μια ελκυστική ερευνητική κατεύθυνση που φέρνει τη δυνατότητα αντιστροφής της μαγνήτισης επί τόπου με ηλεκτρικά πεδία. Υλικά που φέρνουν τέτοιες ιδιότητες και δυνατότητες είναι οι συνθετικοί αντισιδηρομαγνήτες και κάποια υλικά που ονομάζονται μαγνητοηλεκτρονικά τα οποία εμφανίζουν ταυτόχρονα μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες (σιδηροηλεκτρικά και σιδηρομαγνητικά). Τα μαγνητοηλεκτρονικά υλικά είναι σπάνια, άρα οι SAF αποτελούν μια καλή επιλογή για τις μαγνητοηλεκτρονικές εφαρμογές. Η ανακάλυψη της GMR και οι πολλές πιθανές εφαρμογές της, οδήγησαν επίσης, σε αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για το φαινόμενο σήραγγας της TMR, με αποτέλεσμα οι περισσότερες εφαρμογές για τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η GMR να είναι επίσης υποψήφιες για TMR. Άρα, οι αισθητήρες βαλβίδων σπιν καθώς και οι επαφές μαγνητικής σήραγγας, οι οποίες λειτουργούν ως μαγνητικοί αισθητήρες, μαγνητικές μνήμες και κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας, χρησιμοποιούν συχνά συνθετικούς αντισιδηρομαγνήτες. Μια τεχνική αντισιδηρομαγνητική δομή είναι χρήσιμη, επειδή με μηδενική καθαρή μαγνητική ροπή, αλληλεπιδρά ελάχιστα με εξωτερικά μαγνητικά πεδία και μειώνει τα μαγνητοστατικά πεδία που παράγονται από το αγκιστρωμένο στρώμα, μειώνοντας έτσι και την ευαισθησία του ελεύθερου στρώματος σε αυτά τα πεδία. Οι αισθητήρες με βάση το AMR έχουν πλέον αντικατασταθεί από αισθητήρες GMR, επειδή το φαινόμενο GMR είναι μεγαλύτερο και οι αισθητήρες GMR μπορούν να είναι πιο συμπαγείς, ένα σημαντικό στοιχείο όταν προσπαθεί κανείς να συμπίεσει όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σε μια περιορισμένη επιφάνεια δίσκου. Άρα, η χρήση συνθετικών αντισιδηρομαγνητών σε σπιντρονικές διατάξεις, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων στα μέσα αποθήκευσης. Γενικά τα υλικά αυτά προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως υψηλότερη θερμική σταθερότητα, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και βελτιωμένη διατήρηση δεδομένων. Άλλες εφαρμογές της GMR καθώς και των SAF βρίσκονται στη

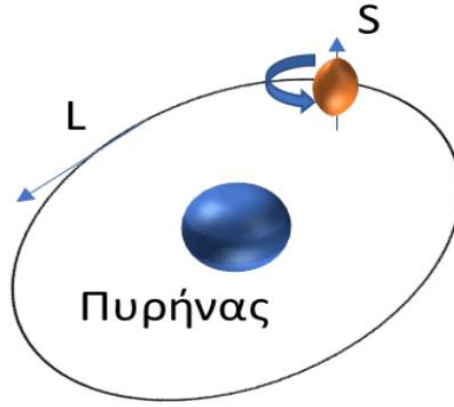
ρομποτική και σε αισθητήρες για τον έλεγχο μηχανικών κινήσεων (για παράδειγμα, στα αυτοκίνητα). Μια πολλά υποσχόμενη εφαρμογή των SAF βρίσκεται και στον τομέα της βιοϊατρικής για θεραπευτικούς και διαγνωστικούς λόγους. Τέλος, οι συνθετικοί αντισιδηρομαγνήτες θα πρέπει να θεωρούνται ως υλικά με ιδιότητες μεταξύ αυτών των σιδηρομαγνητών και των αντισιδηρομαγνητών. Μερικές από τις ιδιότητές τους προέρχονται από τα σιδηρομαγνητικά στρώματα που τα αποτελούν, ενώ άλλες ιδιότητες προέρχονται από τη σύζευξη μεταξύ αυτών των στρωμάτων. Οι δυνατότητες ρύθμισής τους θα οδηγήσουν σίγουρα σε νέο πεδίο στην επιστήμη της φυσικής και σε νέες εφαρμογές για τα επόμενα χρόνια. Επιγραμματικά, αυτός ο συγκεκριμένος σχεδιασμός κάνει τις SAF δομές πολύ σταθερές απέναντι σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία, ταχύτερες στη λειτουργία τους και οικονομικές σε ενέργεια. Για αυτούς τους λόγους, χρησιμοποιούνται σε σύγχρονες τεχνολογίες μνήμης και υπολογιστών spintronics, όπως οι μαγνητικές μνήμες (MRAM), οι συσκευές spin-orbit torque (SOT) και οι συσκευές με σκυρμιόνια. [50,51]

4.7 Επιφανειακές αντισυμμετρικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής Dzyaloshinskii – Moriya (DMI)

Η ανακάλυψη της αντισυμμετρικής αλληλεπίδρασης (SOC) πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από τους Igor Dzyaloshinskii και Toru Moriya. Οι προϋποθέσεις για την εμφάνιση της DMI είναι:

- Να υπάρχει ισχυρή σύζευξη σπιν – τροχιάς και,
- ο κρύσταλλος να μην έχει κέντρο συμμετρίας

Η σύζευξη σπιν – τροχιάς αναφέρεται στην αλληλεπίδραση της τροχιακής στροφορμής του ηλεκτρονίου (L) με το σπιν του (S – ιδιοπεριστροφή ηλεκτρονίου).

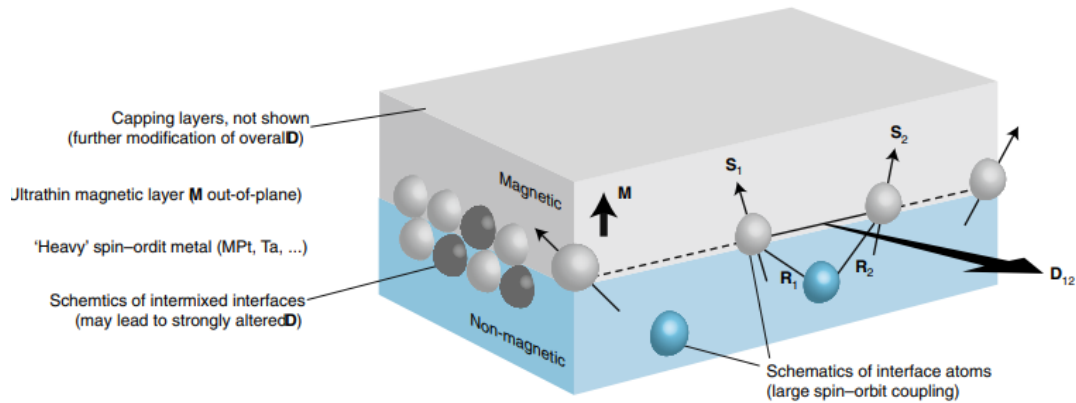


Σχήμα 4.11: Απεικόνιση της περιστροφής του ηλεκτρονίου γύρω από τον εαυτό του και από τον πυρήνα.

Η ενέργεια της σύζευξης σπιν – τροχιάς εξαρτάται από τον μαζικό αριθμό Z ενός στοιχείου, αυτό σημαίνει ότι μέταλλα όπως το W, Pt και το Ru, σε συνδυασμό με μαγνητικά μέταλλα είναι κατάλληλα για την εμφάνιση ισχυρής SOC. Η SOC θα μπορούσε να εμφανιστεί σε πολυστρωματικές δομές μέσω των κατάλληλων επιμέρους στρωμάτων και με σπάσιμο της συμμετρίας στην σειρά της εναπόθεσής τους. Η DMI εμφανίζεται ως επιφανειακή ή όγκου και η ενέργειά της δίνεται από τον τύπο:

$$E_{DM} = -D_{ij}(S_i \times S_j) \quad (4.6)$$

Όπου $S_i \times S_j$ είναι το εξωτερικό γινόμενο μεταξύ των δύο σπιν και $-D_{ij}$ η σταθερά ανταλλαγής της DMI, η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο των δύο διανυσμάτων.

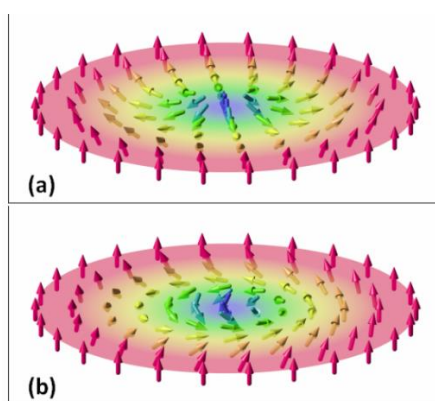


Σχήμα 4.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας δύο υλικών, ενός σιδηρομαγνητικού και ενός μη μαγνητικού. Βλέπουμε ότι το διάνυσμα της DMI είναι κάθετο στον άξονα που σχηματίζουν τα δύο σπιν.

Η DMI είναι σε ανταγωνισμό με την αλληλεπίδραση ανταλλαγής (J_{ex}) που είναι συνήθως και ο όρος που επικρατεί. Άρα η γωνία που επικρατεί μεταξύ των δύο σπιν εξαρτάται από τη σταθερά της DMI και από την σταθερά της αλληλεπίδρασης ανταλλαγής μεταξύ των σπιν, δηλαδή:

$$\tan\theta = D_{ij}/J_{ex} \quad (4.7)$$

Η DMI εμφανίζεται στις διεπιφάνειες των πολυστρωματικών δομών της μορφής: σιδηρομαγνητικό στρώμα/μη μαγνητικό στρώμα. Για παράδειγμα, σε ένα τριστρωματικό σύστημα Pt/Co/W η ισχύς της αντισυμμετρικής αλληλεπίδρασης είναι μεγάλη καθώς πληρούνται οι προϋποθέσεις για την εμφάνισή της. Το Pt έχει μεγάλο μαζικό αριθμό με αποτέλεσμα να έχουμε ισχυρή σύζευξη σπιν-τροχιάς, και επίσης έχουμε σπασμένη συμμετρία στο σύστημα. Επίσης, σε υλικά που εμφανίζουν DMI μπορούν να σταθεροποιηθούν σε 2D τοπολογικά προστατευμένες δομές, που ονομάζονται *σκυρμιόνια* και έχουν μέγεθος 5 – 100 nm.



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση σκυρμιονίων διαφορετικού τύπου.

Συνοπτικά, η εμφάνιση της αντισυμμετρικής αλληλεπίδρασης ανταλλαγής στα λεπτά υμένια είναι πολύ σημαντική στο πεδίο της σπιντρονικής. Μέσω της ενεργειακής σταθερότητας που δίνει η DMI στο σύστημα, οι δομές των σκυρμιονίων μπορούν να σταθεροποιηθούν. Τα μαγνητικά σκυρμιόνια αναμένεται να επιτρέψουν την ύπαρξη διακριτών μαγνητικών καταστάσεων που είναι ενεργειακά σταθερές. Για αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση πληροφορίας bits, όπου κάθε bit θα καθορίζεται από την ύπαρξη ή όχι των σκυρμιονίων. Επίσης, αυτά καθοδηγούνται από ρεύμα χαμηλής πυκνότητας (ή και κύματα spin), με αποτέλεσμα να συνδυάσουν ταχύτατη αποθήκευση και προσπέλαση δεδομένων με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. [52,53]

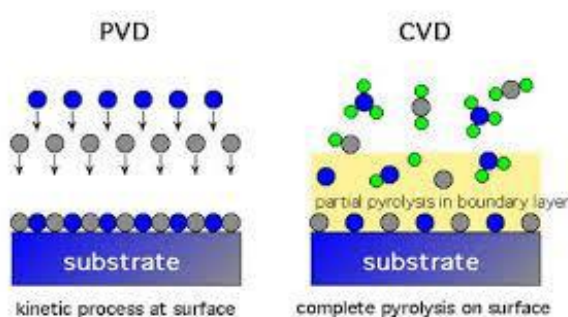
Οι περισσότερες πειραματικές έρευνες στα μαγνητικά πολυστρωματικά υμένια έχουν επικεντρωθεί σε μαγνητικές καταστάσεις, όπου η μαγνήτιση μέσα σε ένα στρώμα είναι περίπου ομοιογενής. Όμως, είναι ενδιαφέρον να απομακρυνθούμε από αυτά τα παραδείγματα και να εξετάσουμε την ανομοιογένεια, όπως είναι π.χ. τα μαγνητικά σκυρμιόνια που σταθεροποιούνται από DMI. Η δυναμική των σκυρμιονίων σε συνθετικούς αντισιδηρομαγνήτες είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρονσα. Ενώ υπάρχουν, δεν έχει γίνει ακόμη πολλή δουλειά προς αυτή την κατεύθυνση. Μια άλλη ενεργή κατεύθυνση της τρέχουσας έρευνας είναι η μαγνητική των μαγνονίων, η οποία αποσκοπεί στην εκμετάλλευση των κυμάτων σπιν για την κατασκευή διάφορων διατάξεων. Οι συνθετικοί αντισιδηρομαγνήτες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον χειρισμό των κυμάτων σπιν.

ΜΕΡΟΣ Β. ΠΕΙΡΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

5.1 Μέθοδοι Σύνθεσης Λεπτών Υμενίων

Οι πιο σημαντικές τεχνικές παραγωγής και ανάπτυξης λεπτών υμενίων είναι: α) Φυσική Εναπόθεση Ατμών PVD (Physical Vapor Deposition) και β) η Χημική Εναπόθεση Ατμών CVD (Chemical Vapor Deposition), επίσης μπορεί να υπάρχει και συνδυασμός αυτών των δύο. Κύρια διαφορά των δύο τεχνικών, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, αποτελεί η εκκίνηση της διεργασίας εναπόθεσης, όπου στην PVD πραγματοποιείται με φυσική μεταφορά ατόμων, ενώ στην CVD γίνεται μέσω χημικής αντίδρασης. Η επιλογή της τεχνικής που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την εφαρμογή του υλικού που πρόκειται να παραχθεί, καθώς και από κάποιους παράγοντες όπως είναι το είδος του υλικού προς εναπόθεση και η καθαρότητά του, οι περιορισμοί που προκύπτουν από το υπόστρωμα, ο ρυθμός εναπόθεσης κτλ. Και οι δύο κατηγορίες χρησιμοποιούνται ευρέως, ανάλογα με την εφαρμογή του τελικού υλικού κάθε φορά, όμως η PVD είναι κατάλληλη για πολύ μεγαλύτερο εύρος υποστρωμάτων και εφαρμογών, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που απαιτεί σε σχέση με την CVD που απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες και επίσης είναι πιο φιλική στο περιβάλλον. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και στην οποία θα αναφερθούμε αναλυτικά είναι το sputtering και ανήκει στην κατηγορία της φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD).

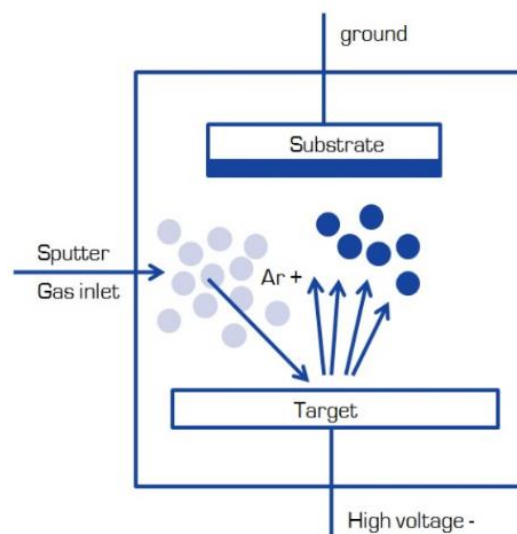


Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση φυσικής και χημικής εναπόθεσης ατμών.

5.2 Εναπόθεση λεπτών υμενίων με την Μέθοδος της Καθοδικής Ιοντοβολής (Sputtering)

Όταν μια επιφάνεια ακτινοβολείται ή βομβαρδίζεται από ενεργητικά σωματίδια (ιόντα) τότε διαβρώνεται και απομακρύνονται επιφανειακά άτομα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται <<sputtering>> ενώ στα ελληνικά μεταφράζεται ως <<καθοδική ιοντοβολή>>. Το φαινόμενο του sputtering αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον φυσικό Grove το 1853 και θεωρήθηκε αρχικά ως ένα μη επιθυμητό φαινόμενο καθώς προκαλούσε την καταστροφή των επιφανειών. Η τεχνική sputtering, σήμερα χρησιμοποιείται ευρύτατα για την βιομηχανική παραγωγή ημιαγωγών, ημιαγωγικών και φωτοβολταϊκών διατάξεων, CDs, οπτικών συσκευών, αισθητήρων, διακοσμητικών γυαλιών κ.α. Ως τεχνική ανήκει στην κατηγορία της φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD) και δεν οφείλεται σε θερμικά φαινόμενα, αλλά αποτελεί μια διαδικασία μεταφοράς ορμής και ενέργειας. [61]

Κατά την διάρκεια του sputtering, εφαρμόζεται υψηλό δυναμικό σε αέριο χαμηλής πίεσης που βρίσκεται στο κενό (συνήθως Ar), με αποτέλεσμα την δημιουργία πλάσματος. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα Ar^+ του πλάσματος, επιταχύνονται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, βομβαρδίζουν την επιφάνεια του στόχου (κάθοδος), με αποτέλεσμα τα άτομα από το υλικό του στόχου να κινούνται και να εναποτίθενται στο υπόστρωμα (άνοδος).



Σχήμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος ιοντοβολής.

Η απόδοση του sputtering είναι ο ρυθμός απομάκρυνσης επιφανειακών ατόμων του υλικού του στόχου κατά τον βομβαρδισμό της επιφάνειάς του με ιόντα. Ως απόδοση του sputtering ορίζεται ο λόγος του μέσου αριθμού των ατόμων που απομακρύνονται από την επιφάνεια του στόχου ανά προσπίπτον ιόν και δίνεται από την σχέση:

$$S = \text{atoms removed} / \text{incident io}$$

Η απόδοση του sputtering μπορεί να επηρεάζεται από παράγοντες όπως είναι: η ενέργεια των προσπιπτόντων ιόντων, το υλικό του στόχου, οι γωνίες πρόσπτωσης των σωματιδίων και η κρυσταλλική δομή της επιφάνειας του στόχου. [56]

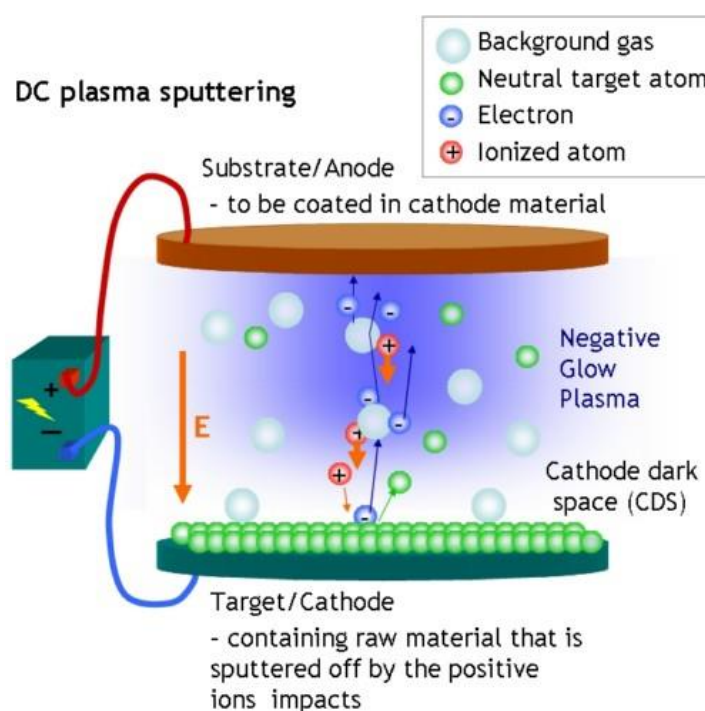
5.3 Τεχνικές sputtering

Σήμερα οι τεχνικές sputtering είναι από τις πιο γνωστές και διαδεδομένες μεθόδους εναπόθεσης λεπτών υμενίων και πολυστρωματικών δομών. Σύμφωνα με τον τρόπο που πραγματοποιείται η παραγωγή ιόντων αερίου (πλάσματος), διακρίνονται δύο βασικοί τύποι sputtering: το Direct Current (DC) και Radio – Frequency (RF). Η αρχή λειτουργίας των δύο διατάξεων είναι παρόμοια, με την διαφορά ότι στην περίπτωση της DC sputtering εφαρμόζεται μια συνεχής τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων και ο στόχος είναι πάντα αγώγιμος, ενώ στην δεύτερη περίπτωση της RF sputtering εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (RF) και ο στόχος μπορεί να είναι και ηλεκτρικώς μη αγώγιμος. [57]

5.3.1 Διοδικό DC Sputtering

Η πιο απλή μέθοδος εναπόθεσης λεπτών υμενίων είναι η DC sputtering. Ένα DC διοδικό σύστημα αποτελείται από ένα ζεύγος επίπεδων ηλεκτροδίων. Ένα από τα ηλεκτρόδια αποτελεί την ψυχρή κάθοδο, στην επιφάνεια της οποίας τοποθετείται ο στόχος που πρόκειται να εναποτεθεί, και το άλλο είναι η άνοδος, όπου βρίσκεται το υπόστρωμα στο οποίο πρόκειται να γίνει εναπόθεση. Αρχικά, ο θάλαμος βρίσκεται σε συνθήκες υψηλού κενού το οποίο πραγματοποιείται διαμέσου συστήματος άντλησης. Ύστερα, στον θάλαμο κενού εισάγεται ένα αδρανές αέριο συνήθως το αργό (Ar, το οποίο χρησιμοποιείται για την δημιουργία και την διατήρηση του πλάσματος) με πίεση περίπου 0,1 Torr και παράλληλα, εφαρμόζοντας μια υψηλή τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων (1kV – 5kV), ξεκινάει η εκκένωση αίγλης και η παραγωγή πλάσματος. Το πλάσμα είναι μια ενδιάμεση κατάσταση της ύλης που αποτελείται από ουδέτερα άτομα αερίου και από ίσο αριθμό θετικών (Ar^+) και αρνητικών (ηλεκτρόνια) φορτίων, συνεπώς είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Τα Ar^+ υπό την επίδραση του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται, επιταχύνονται και έλκονται προς την κάθοδο, βομβαρδίζοντας έτσι την επιφάνεια του στόχου. Επίσης, τα ηλεκτρόνια λόγω του πεδίου, επιταχύνονται προς την άνοδο και αυξάνουν το βαθμό ιονισμού (δημιουργούν δηλαδή επιπλέον ιόντα) μέσω αλληπάλληλων συγκρούσεων με άτομα του αερίου. Τα επιταχυνόμενα Ar^+ συγκρουόμενα με τα επιφανειακά άτομα του στόχου, μεταφέρουν σε αυτά την κινητική τους ενέργεια και την ορμή, με αποτέλεσμα τα τελευταία να αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να διαφύγουν από το στόχο στον θάλαμο κενού. Κάποια από αυτά τα άτομα γυρνάνε πίσω στο στόχο, μερικά προσκολλώνται στα τοιχώματα του θαλάμου, ενώ τα υπόλοιπα συγκρούονται με τα μόρια του αερίου και ύστερα εναποτίθενται στο υπόστρωμα, σχηματίζοντας έτσι το λεπτό υμένιο. Κατά τη διαδικασία του βομβαρδισμού, εκτός από τα άτομα του στόχου δημιουργούνται και άλλα σωματίδια

όπως τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, αρνητικά ιόντα, εκπομπή φωτονίων και ακτίνων X κτλ. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι πολύ σημαντικά στο να έχουμε ένα αυτοσυντηρούμενο πλάσμα, δηλαδή τα δευτερογενή ηλεκτρόνια που διαφεύγουν από τον στόχο κατά τον βομβαρδισμό του από τα ιόντα αερίου, συγκρουόμενα με αυτά (Ar^+) μπορούν να παράγουν ικανοποιητικό αριθμό νέων ιόντων και με την σειρά τους αυτά να παράγουν νέα ηλεκτρόνια από την επιφάνεια του στόχου. Επίσης, τα ιόντα του Ar καθώς προσκρούουν στην επιφάνεια του στόχου, προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια, ουδετεροποιούνται, επιστρέφουν προς τα πίσω και επαναϊοντίζονται, καθιστώντας έτσι την όλη διαδικασία αυτοσυντηρούμενη. Κάποια από τα ιόντα μπορούν να εισχωρήσουν και μέσα στο στερεό και τότε έχουμε την εμφύτευσή του. Ως αέριο πλάσματος χρησιμοποιείται ένα ευγενές αέριο το οποίο είναι αδρανές (όπως είναι το αργό) και δεν οδηγεί στον σχηματισμό των ανεπιθύμητων ενώσεων. Επίσης, το Ar βρίσκεται σε αφθονία και είναι φτηνό καθώς και τα ιόντα του έχουν συγκρίσιμο μέγεθος με τα άτομα των περισσότερων μετάλλων (στόχων), οδηγώντας έτσι σε αποτελεσματικές κρούσεις μεταξύ τους. [38,58]



Σχήμα 5.3: Αρχή λειτουργίας DC sputtering.

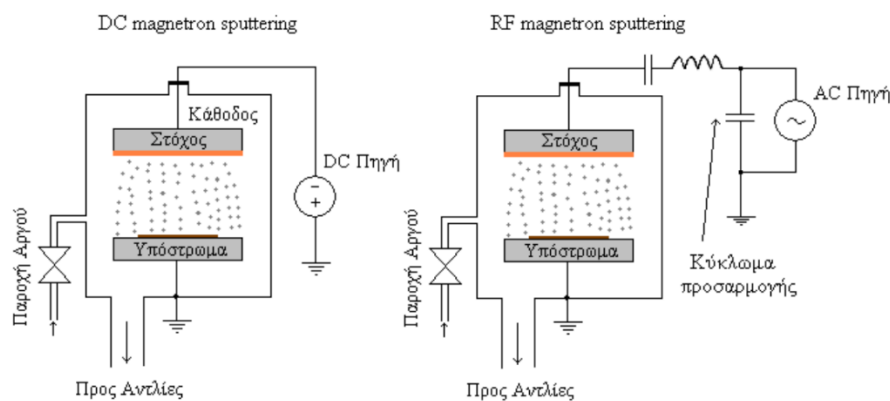
Τέλος, η DC sputtering είναι μια ελεγχόμενη διαδικασία και αποτελεί μια επιλογή χαμηλού κόστους για εναπόθεση μετάλλων, όμως το βασικό μειονέκτημά της είναι ότι οι στόχοι περιορίζονται μόνο σε αγωγικά υλικά. Η λύση σε αυτό είναι η RF sputtering.

5.3.2 RF sputtering

Για την εναπόθεση των μονωτικών υλικών, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, χρησιμοποιείται το RF sputtering. Σε αυτή τη μέθοδο εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση ac στο στόχο. Η λογική πίσω από αυτή την τεχνική βρίσκεται στην εφαρμογή ενός μικρού εναλλασσόμενου σήματος στα ηλεκτρόδια. Η συχνότητα που έχει καθιερωθεί από διεθνείς κανονισμούς, για την αποφυγή παρεμβολών στις τηλεπικοινωνίες, και χρησιμοποιείται στο RF sputtering είναι τα 13,56 MHz (περιοχή ραδιοσυχνοτήτων). Ο βασικός λόγος που χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή είναι ότι δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η διαδικασία του sputtering σε μη αγώγιμους στόχους, χρησιμοποιώντας συνεχές ρεύμα, επειδή συμβαίνει επιφανειακή φόρτιση του στόχου. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση που ο στόχος είναι μονωτής, το αγώγιμο ηλεκτρόδιο της καθόδου στην επιφάνεια της οποίας βρίσκεται ο στόχος, έλκει τα Ar^+ , τα οποία συσσωρεύονται στην επιφάνεια του στόχου, με αποτέλεσμα να γίνει πλήρη διακοπή της διαδικασίας του sputtering. Αυτό συμβαίνει επειδή τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τον στόχο κατά τη διάρκεια του DC sputtering, τώρα δεν υπάρχουν καθώς ο στόχος είναι μονωτής. Για να αρχίσει πάλι η διαδικασία, θα πρέπει να εξουδετερωθεί το θετικό φορτίο που έχει συσσωρευτεί στην επιφάνεια του στόχου. Αυτό επιτυγχάνεται με την αναστροφή της πολικότητας της πηγής, ώστε η κάθοδος να γίνει άνοδος και να έλξει αρκετά ηλεκτρόνια. Η επιλογή της συχνότητας της εναλλασσόμενης τάσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για μία τέτοια διαδικασία είναι πολύ σημαντική. Όταν η συχνότητα είναι ≤ 50 kHz δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ του DC και RF sputtering, ενώ για συχνότητες >50 kHz (περιοχή ραδιοσυχνοτήτων) οι ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων μπορούν να προκαλέσουν μεγάλο ποσοστό ιονισμού του αερίου, χωρίς να είναι απαραίτητη η εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων για την διατήρηση της εκκένωσης. [59]

Αυτό γίνεται γιατί τα ηλεκτρόνια, επειδή έχουν μικρότερη μάζα από τα θετικά ιόντα, επιταχύνονται πιο γρήγορα από αυτά, και για να μην προλάβουν να αλλάξουν κατεύθυνση τα ιόντα από το ανάστροφο πεδίο, (αφού αυτό τα απομακρύνει από τον στόχο), θα πρέπει η συχνότητα που θα εφαρμόσουμε να είναι της τάξης των MHz. Τέλος, δύο σημαντικά πλεονεκτήματα του RF σε σχέση με το DC sputtering είναι ότι:

- πρώτον, δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στον στόχο, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μονωτικά και αγώγιμα υλικά,
- και δεύτερον, η εναλλασσόμενη τάση αυτής της μεθόδου δίνει ηλεκτρόνια ρεύματος με μεγαλύτερη κινητικότητα, κάτι που προκαλεί αυξημένες κρούσεις με το ευγενές αέριο, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο βαθμό ιονισμού. [60]



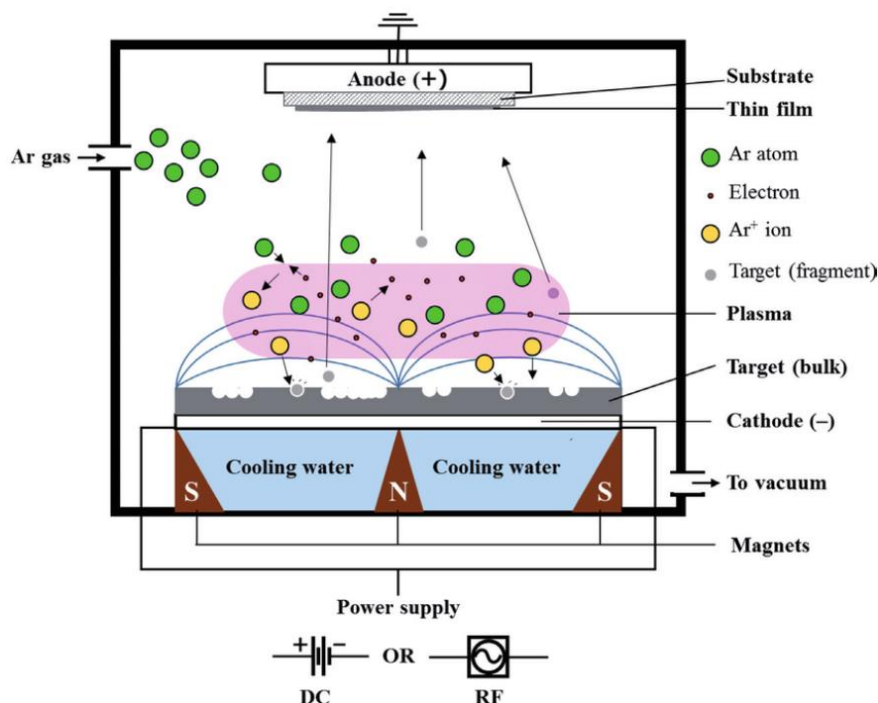
Σχήμα 5.4: Απλοποιημένα διαγράμματα DC και RF magnetron sputtering.

5.3.3 Magnetron Sputtering

Η χρήση ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα sputtering σύστημα, κάνει πιο αποδοτική την χρήση των ηλεκτρονίων στον ιονισμό του αερίου. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην περιοχή ανάμεσα στον στόχο και το υπόστρωμα, εκτός από τη δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου E , τώρα δέχονται και τη δύναμη Lorentz από το μαγνητικό πεδίο B , το οποίο είναι κάθετο στο E . Η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου, έχει ως αποτέλεσμα την παγίδευση των ηλεκτρονίων κοντά στην επιφάνεια του στόχου, οδηγώντας έτσι σε περισσότερο ιονισμό και σε χαμηλότερη πίεση λειτουργίας. Πιο αναλυτικά, η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου, οδηγεί τα ηλεκτρόνια σε ελικοειδή κίνηση, ενώ σε σημεία που το E και το B είναι κάθετα μεταξύ τους, τα ηλεκτρόνια αναγκάζονται σε κυκλοειδή κίνηση, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο το μήκος διαδρομής τους που χρειάζεται να φτάσουν στην άνοδο. Αυτό έχει ως συνέπεια, την αύξηση των συγκρούσεων μεταξύ ηλεκτρονίων και μορίων αερίου, και άρα εντονότερο και αποτελεσματικότερο ιονισμό. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο, αλλάζει την πορεία κίνησης και μειώνει την ταχύτητα των ηλεκτρονίων, έτσι ώστε αυτά να βρίσκονται μακριά από τα τοιχώματα του θαλάμου, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των απωλειών από επανασύνδεση. Στην τεχνική magnetron sputtering η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου οδηγεί στην αύξηση του ρεύματος στο στόχο της καθόδου, άρα και στην αύξηση του ρυθμού με τον οποίο γίνεται το sputtering του στόχου. Επιπλέον, λόγω της χαμηλής πίεσης, τα σωματίδια τα οποία έχουν γίνει sputtered από τον στόχο διανύουν τον χώρο του πλάσματος χωρίς να συγκρούονται με αυτό. Το γεγονός αυτό, έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης στο υπόστρωμα, καθώς τα sputtered άτομα που φτάνουν σε αυτό είναι περισσότερα. [61]

Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα σύνολο μόνιμων μαγνητών με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι γραμμές πεδίου να αναδύονται από την επιφάνεια του στόχου να κάμπτονται πάνω από την επιφάνεια και να εισέρχονται μέσα στη βάση του στόχου. Το magnetron sputtering, ανάλογα με την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων (στόχου – υποστρώματος), χωρίζεται σε *επίπεδο* και *κυλινδρικό magnetron sputtering*. Στην πρώτη περίπτωση τα ηλεκτρόδια του στόχου (κάθοδος) και του υποστρώματος (άνοδος) είναι παράλληλες μεταξύ τους, ενώ στη δεύτερη βρίσκονται σε μια

κυλινδρική διάταξη. Το μειονέκτημα της τεχνικής του magnetron sputtering είναι η μικρή ποσότητα υλικού που χρησιμοποιείται, καθώς σε ένα μικρό τμήμα του στόχου αλληλεπιδρούν το μαγνητικό πεδίο (B), το ηλεκτρικό (E) και το πλάσμα. [59]



Σχήμα 5.5: Απεικόνιση της λειτουργίας του magnetron sputtering.

5.4 Μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος VSM (Vibrating Sample Magnetometer)

Υπάρχουν πολλές τεχνικές για την μέτρηση της μαγνήτισης και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μέθοδοι που βασίζονται στη μαγνητική επαγωγή χρησιμοποιώντας πηνία, όπως το VSM
- και μέθοδοι που αφορούν αλλαγές σε διάφορες ιδιότητες ενός μαγνητικού υλικού που προκαλούνται από ένα εξωτερικό πεδίο, π.χ. το Hall effect, μαγνητοοπτικές μέθοδοι Faraday και Kerr κ.α.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του δονούμενου δείγματος (VSM), οπότε αναλύεται εκτενέστερα. Το μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος χρησιμοποιείται ευρέως για την μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών. Η αρχή λειτουργίας του μαγνητόμετρου δονούμενου δείγματος βασίζεται στον

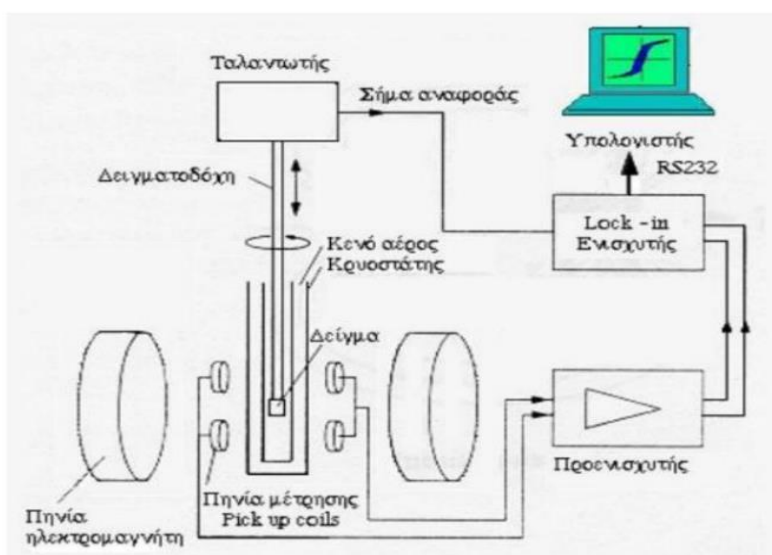
νόμο του Faraday περί ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, μέσω μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V = -NA \frac{dB}{dt} \quad (5.1)$$

όπου B είναι η μαγνητική επαγωγή, N ο αριθμός των σπειρών του πηνίου, A η διατομή του πηνίου, V η προκληθείσα τάση. Όπως σε όλες τις επαγωγικές μεθόδους έτσι και στο VSM, το προς μέτρηση δείγμα βρίσκεται εντός μίας δειγματοδοχής, ανάμεσα σε δύο ηλεκτρομαγνήτες (οπλισμοί του VSM) που παράγουν ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο σταθερής έντασης, μέσω του οποίου μαγνητίζεται το δείγμα. [22]

Συγκεκριμένα, το ένα άκρο της δειγματοδοχής είναι κεντραρισμένο ως προς τέσσερα μικρά πηνία, τα λεγόμενα πηνία μέτρησης (pick up coils), τα οποία ανιχνεύουν τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους ηλεκτρομαγνήτες είναι κάθετο στην επιφάνεια των πηνίων μέτρησης. Το άλλο άκρο της δειγματοδοχής είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρομηχανικό ταλαντωτή χαμηλών συχνοτήτων (60Hz), με αποτέλεσμα το δείγμα να ταλαντώνεται κάθετα στη διεύθυνση του ομογενούς μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική ροή που διέρχεται από τα πηνία μέτρησης προέρχεται αφενός από το πεδίο του ηλεκτρομαγνήτη το οποίο είναι χρονικά σταθερό, αφετέρου από το ταλαντούμενο μαγνητισμένο δείγμα. Το μαγνητισμένο πλέον δονούμενο δείγμα λειτουργεί ως δίπολο, προκαλώντας διαταραχές στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο του δονούμενου δείγματος επάγει μία εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (Electro-Magnetic Force, EMF) στα πηνία ανίχνευσης (pick-up coils) της οποίας το πλάτος είναι ανάλογο με τη μαγνητική ροπή του δείγματος. [62,63]

Επειδή το σήμα αυτής της δύναμης είναι ασθενές, προενισχύεται και κατόπιν οδηγείται σε ένα Lock-In Amplifier μαζί με ένα σήμα αναφοράς από τον ηλεκτρομηχανικό ταλαντωτή. Ο ενισχυτής αυτός εκτός από την ενίσχυση του αρχικά παραγόμενου σήματος έχει επιπλέον την ιδιότητα να απομονώνει τον ανεπιθύμητο θόρυβο του συνολικού σήματος και να ενισχύει μονάχα το σήμα εκείνο το οποίο έχει την ίδια φάση και συχνότητα με το σήμα αναφοράς του ηλεκτρομηχανικού ταλαντωτή. Στην έξοδο του ενισχυτή το σήμα, αφού ολοκληρωθεί, είναι ανάλογο της μαγνητικής ροπής του δείγματος. Επίσης, επειδή στα πηνία του μαγνήτη παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινόμενο Joule, χρησιμοποιείται ένα σύστημα ψύξης. Τέλος, με την εφαρμογή του VSM, λαμβάνεται ένα διάγραμμα μαγνήτισης συναρτήσεως του πεδίου και δίνεται ο χαρακτηριστικός βρόχος υστέρησης από τον οποίο εξάγονται χρήσιμες ιδιότητες του υλικού. [15,54]



Σχήμα 5.6: Το μαγνητόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό των υμενίων και σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός μαγνητόμετρου.

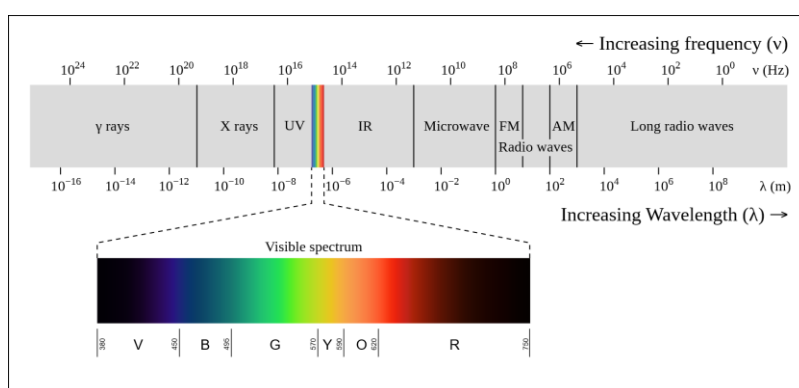
5.5 Εισαγωγή στις ακτίνες X

Οι ακτίνες - X ανακαλύφθηκαν το 1895 από τον Γερμανό φυσικό Wilhelm Roentgen (Βίλχελμ Ραίντγκεν, 1845 – 1923). Ο Roentgen, διαπίστωσε ότι, όταν μια δέσμη ηλεκτρονίων μεγάλης ταχύτητας προσπέσει σε ένα μεταλλικό στόχο, παράγει μια νέα και πολύ διεισδυτική μορφή ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό, ονόμασε το άγνωστο είδος ακτινοβολίας "ακτίνες - X". Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι ακτίνες - X είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα παρόμοιες με το φως, αλλά με πάρα πολύ μικρά μήκη κύματος και με μεγάλη ικανότητα διείσδυσης. Χαρακτηριστικά μήκη κύματος των ακτίνων X είναι από 0.01 έως 10nm (10 μέχρι 100 Å, $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$), δηλαδή, αποτελούν

εκείνο το μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος το οποίο βρίσκεται μεταξύ του υπεριώδους φωτός και των ακτίνων γ, με εύρος ενεργειών από 0.1 έως 100keV. Οι ακτίνες X παράγονται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας επιβραδύνονται και η κινητική τους ενέργεια μετατρέπεται σε εκπομπή φωτονίων (ακτινοβολία πέδησης – συνεχές φάσμα) ή όταν αυτά μεταπίπτουν στις εσωτερικές στιβάδες των ατόμων, κατά τον ιονισμό τους (γραμμικό φάσμα). Για αυτό, ανήκουν στην ιονίζουσα ακτινοβολία και ιονίζουν τα σώματα που διαπερνούν, προκαλώντας έτσι βλάβες σε ζωντανούς οργανισμούς. Το μήκος κύματος λ και η συχνότητα f της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συνδέονται με τη σχέση:

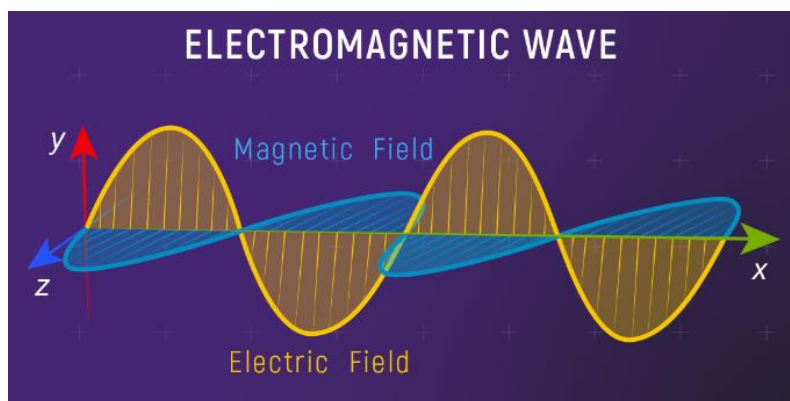
$$\lambda f = c \quad (5.2)$$

όπου $c=299.792.458\text{m/sec}$, η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό.



Σχήμα 5.7: Φάσμα Η/Μ ακτινοβολίας.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους και στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος (στον άξονα x), και διαδίδεται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός. Οι ακτίνες-X διακρίνονται σε μαλακές και σκληρές ακτίνες-X. Οι μαλακές ακτίνες-X (soft X-rays) χαρακτηρίζονται από μικρότερη ενέργεια φωτονίου, με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 2 Å και απορροφώνται εύκολα από την ύλη. Οι σκληρές ακτίνες -X (hard X-rays) έχουν μήκος κύματος μικρότερο από 1 Å και είναι πιο διεισδυτικές στην ύλη, καθώς η ενέργεια είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

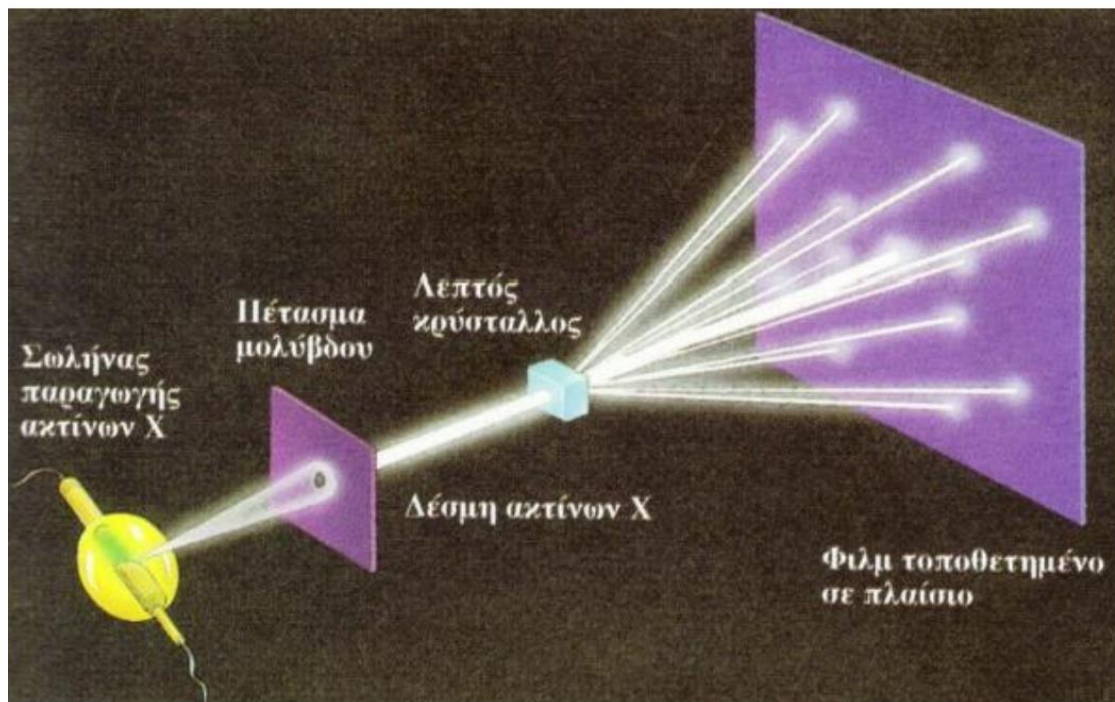


Σχήμα 5.8: Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελεί ενεργειακή μορφή καθώς μεταφέρει ενέργεια και ορμή, και αλληλοεπιδρώντας με ηλεκτρόνια, άτομα, μόρια, γενικά με την ύλη, μεταβάλλει την ενεργειακή τους κατάσταση. Τέλος, οι ακτίνες-X χρησιμοποιήθηκαν στην ιατρική ως διαγνωστικό εργαλείο με τη μορφή της ακτινογραφίας και από τη φυσική και τη χημεία με τη μορφή της κρυσταλλογραφίας. [64]

5.6 Περίθλαση ακτίνων X – XRD

Μια από τις σημαντικές χρήσεις της περίθλασης των ακτίνων - X είναι η μελέτη της δομής και ο χαρακτηρισμός των πολυστρωματικών υμενίων. Η τεχνική αυτή είναι μη καταστροφική, απαιτείται ελάχιστη έως καθόλου προετοιμασία του δείγματος, και παρέχει πληροφορίες για τη δομή σε ατομική κλίμακα. Οι πληροφορίες που μπορούν να αντληθούν είναι: το πάχος της περιόδου διαμόρφωσης καθώς και το ολικό πάχος του πολυστρωματικού υμενίου, οι σταθερές πλέγματος των συμμετεχόντων υλικών, η τραχύτητα, η ενδοδιάχυση κ.α. Η εικόνα περίθλασης που προκύπτει χαρακτηρίζει μονοσήμαντα το υλικό και χρησιμοποιείται για τη δομική ταυτοποίηση των δειγμάτων. Η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο συμβολής, όπου μια δέσμη παράλληλων ακτίνων κάμπτεται καθώς διέρχεται ενός πολύ λεπτού εμποδίου ή μιας μικρής σχισμής, και το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την έντονη σκέδαση ακτινοβολίας σε συγκεκριμένες διευθύνσεις.



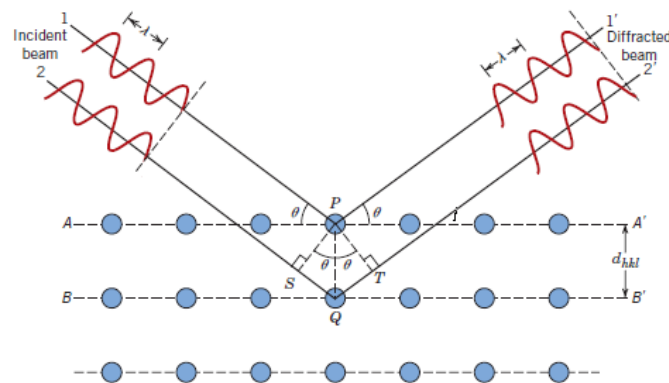
Σχήμα 5.9: Απεικόνιση πειράματος περίθλασης ακτίνων Χ.

Σε ένα πείραμα περίθλασης ακτίνων Χ όπως αυτό της παραπάνω εικόνας, οι περισσότερες ακτίνες Χ διέρχονται διαμέσου του κρυστάλλου χωρίς να σκεδαστούν, ορισμένες όμως υφίστανται σκέδαση, σχηματίζοντας ένα διαμόρφωμα συμβολής. Με τον τρόπο αυτόν το φιλμ εκτίθεται σε ένα διαμόρφωμα που σχετίζεται με τη διάταξη των σχετικών θέσεων των ατόμων μέσα στον κρύσταλλο, το οποίο και αποτυπώνει. [65]

Η περίθλαση είναι ένα κυματικό φαινόμενο το οποίο συμβαίνει όταν ένα κύμα προσπίπτει σε δομή η οποία είναι: α) ικανή να σκεδάσει το κύμα σύμφωνα, και β) έχει διαστάσεις συγκρίσιμες με αυτές του μήκους κύματος. Περίθλαση συμβαίνει όταν έχουμε ενισχυτική συμβολή, δηλαδή όταν η διαφορά δρόμων των σκεδασμένων κυμάτων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος. Στους κρυστάλλους οι αποστάσεις μεταξύ των κρυσταλλικών επιπέδων καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ των ατόμων είναι της ίδιας τάξης με το μήκος κύματος των ακτίνων Χ. Η συνθήκη ενισχυτικής συμβολής από τα διαδοχικά πλεγματικά επίπεδα δίνεται από τον νόμο του Bragg ο οποίος συσχετίζει το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας, την απόσταση μεταξύ πλεγματικών επιπέδων d_{hkl} και την γωνία πρόσπτωσης θ (σχήμα 5.10)

$$SQ + QT = n\lambda \quad (5.3)$$

$$n\lambda = d_{hkl}\sin\theta + d_{hkl}\sin\theta = 2 d_{hkl}\sin\theta \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.10: Περίθλαση ακτίνων Χ από διαδοχικά πλεγμιακά επίπεδα ατόμων.

Από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι ο νόμος του Bragg ικανοποιείται όταν η διαφορά δρόμου που ακολουθεί η ακτινοβολία μεταξύ δύο διαδοχικών πλεγμιακών επιπέδων είναι ίση με ακέραιο αριθμό μηκών κύματος της ακτινοβολίας. Επίσης το n παίρνει μόνο ακέραιους αριθμούς (1,2,3,...) και δηλώνει την τάξη της περίθλασης. Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών και παράλληλων ατομικών επιπέδων (δηλαδή η απόσταση d_{hkl}) είναι συνάρτηση των δεικτών Miller (h , k και l) καθώς και παραμέτρων του πλέγματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κρυσταλλικών δομών οι οποίες έχουν κυβική συμμετρία, ισχύει:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (5.5)$$

Αφού κάνουμε την αντικατάσταση $d = d_{hkl}$ στη συνθήκη Bragg, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2) \quad (5.6)$$

όπου, a : σταθερά κυψελίδας (Å). Γνωρίζοντας τις γωνίες θ των ανακλάσεων από το ακτινογράφημα και το μήκος κύματος λ , είναι δυνατό να υπολογιστεί η σταθερά της κυψελίδας, (a) προσδιορίζοντας τα επίπεδα hkl του κρυστάλλου.

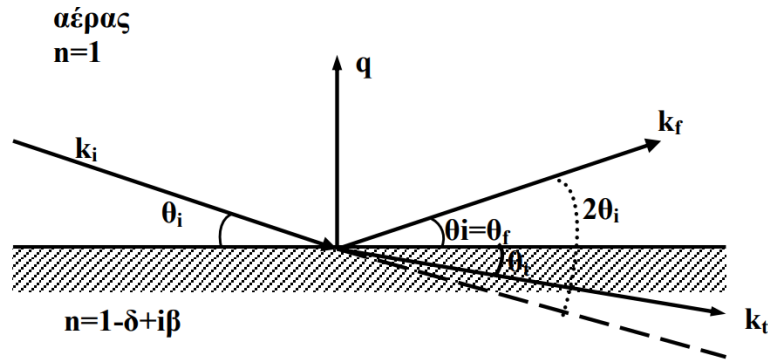
Με τη μέθοδο XRD είναι δυνατή η εξέταση της συμμετρίας των κρυστάλλων και η ερμηνεία της δομής τους, καθώς και η κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πολυκρυσταλλικών υλικών και σκονών.

Το φάσμα περίθλασης ακτίνων Χ περιέχει τις τιμές της έντασης I ως συνάρτηση των γωνιών 2θ και μπορεί να διαιρεθεί σε δύο επιμέρους τμήματα:

- I. Στο Φάσμα μικρών γωνιών, που εκτείνεται συνήθως μέχρι περίπου την τιμή $2\theta = 15^\circ$.
- II. Και στο Φάσμα μεγάλων γωνιών, που εκτείνεται σε γωνίες 2θ μεγαλύτερες των 20° . [12]

5.7 Ανακλαστικότητα ακτίνων X (XRR)

Η XRR η όπως λέγεται αλλιώς κατοπτρική Ανακλαστικότητα είναι μια δυναμική τεχνική τόσο για την μελέτη των ιδιοτήτων των επιφανειών όσο και των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών των λεπτών υμενίων. Αποτελεί μια μη καταστροφική τεχνική με ένα βασικό πλεονέκτημα, ότι τα δείγματα μελετώνται στο περιβάλλον χωρίς την δημιουργία κενού. Κατά την μέτρηση της ανακλαστικότητας, η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης. Από άποψη της γεωμετρίας σάρωσης, δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ ανακλαστικότητας ακτίνων-X (XRR) και της περίθλασης ακτίνων-X (XRD) σε σάρωση θ - 2θ , απλώς καλύπτουν διαφορετικές περιοχές γωνιών σκέδασης. Η Ανακλαστικότητα ακτίνων X (XRR) αναφέρεται στην σκέδαση σε μικρές γωνίες όπου το υλικό περιγράφεται ως εάν συνεχές οπτικό μέσο. Η XRD αναφέρεται σε εύρος γωνίας $2\theta > 10^\circ$ και δίνει πληροφορία για την κρυσταλλική δομή ενώ η XRR σε $0^\circ < 2\theta < 10^\circ$ και μπορεί να δώσει πληροφορία για τα πάχη, τις πυκνότητες, τη δομή και την επιφανειακή τραχύτητα των στρωματικών νανοδομών. Με την Ανακλαστικότητα ακτίνων - X μελετάμε επιφάνειες στις οποίες έχει προσροφηθεί κάποιο υλικό (όπως για παράδειγμα κάποιο πολυμερές) ή υλικά τα οποία έχουν τη μορφή λεπτών υμενίων και τα οποία παρουσιάζουν αυξημένο τεχνολογικό ενδιαφέρον. Οι ιδιότητες των επιφανειών εξαρτώνται από τον τρόπο που προσροφάται το υλικό επάνω τους καθώς επίσης και από την τραχύτητά τους. Επίσης οι ιδιότητες των υλικών που βρίσκονται σε μορφή υμενίου εξαρτώνται από το πάχος του υμενίου, την πυκνότητα του, και την τραχύτητα των επιφανειών που σχηματίζονται από αυτά. Συνεπώς, ο καθορισμός του πάχους ενός υμενίου με μεγάλη ακρίβεια, αλλά και των άλλων χαρακτηριστικών του είναι πολύ κρίσιμο σημείο για τις ευρύτερες τεχνολογικές εφαρμογές που μπορεί να παρουσιάσει. Η Ανακλαστικότητα των ακτίνων -X δίνει αρκετά ακριβείς πληροφορίες για όλες τις παραπάνω παραμέτρους των επιφανειών και των υμενίων. Η Ανακλαστικότητα από μια επιφάνεια ή μια διεπιφάνεια είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών ηλεκτρονικών πυκνοτήτων των μέσων που βρίσκονται εκατέρωθεν της επιφάνειας, γεγονός το οποίο είναι αντίστοιχο των διαφορετικών δεικτών διάθλασης στην κλασική οπτική. Έτσι, με την τεχνική αυτή εκτός από την τραχύτητα των επιφανειών προσδιορίζεται όχι μόνο η ηλεκτρονική πυκνότητα των υμενίων αλλά και η μεταβολή της κάθετα στη διεπιφάνεια με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Σε ένα πείραμα ανακλαστικότητας χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ακτίνων X, η οποία προσπίπτει πλάγια σε επιφάνεια που διαχωρίζει δύο διαφορετικής οπτικής πυκνότητας υλικά. Η προσπίπτουσα δέσμη υφίσταται ανάκληση και διάθλαση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.11: Ανάκλαση και διάθλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από μια επιφάνεια.

Το k_i και το k_f είναι η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη δέσμη αντίστοιχα, ενώ το k_t είναι η διαθλώμενη. Το διάνυσμα q ισούται με τη διαφορά των $k_f - k_i$ και ονομάζεται διάνυσμα σκέδασης. Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας του φωτός στο κενό (c) προς την ταχύτητά του στο υλικό (v) και δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{c}{v} \quad (5.7)$$

Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού, είναι στην πιο γενική περίπτωση ένας μιγαδικός αριθμός ο οποίος μπορεί να δώσει την πληροφορία για την μετατόπιση φάσης και την μείωση πλάτους εξαιτίας των φαινομένων απορρόφησης:

$$v = 1 - \delta + i\beta = 1 - \frac{N_A r_e \lambda^2}{2\pi M} \rho (f_0 + \Delta f' - i\Delta f'') \quad (5.8)$$

όπου δ και β είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος αντίστοιχα. Το δ εκφράζει τη διασπορά των ακτίνων X μέσα στο μέσο ενώ ο β εκφράζει την απορρόφηση των ακτίνων X . Οι f' και f'' εκφράζουν τις διορθώσεις διασποράς και απορρόφησης, N_A είναι ο αριθμός του Avogadro, r_e ακτίνα του ηλεκτρονίου, ρ η πυκνότητα του υλικού και M η ατομική μάζα. Προκειμένου για ενώσεις, το M και ο ατομικός παράγοντας σκέδασης που λαμβάνεται σαν ο μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών του κάθε ατόμου που υπάρχει στην ένωση με στατιστικό βάρος το ατομικό ποσοστό.

Η διόρθωση διασποράς δ είναι ανάλογη με το πραγματικό μέρος του μέσου συντελεστή ατομικής σκέδασης:

$$\delta = \frac{N_A r_e \lambda^2}{2\pi M} \rho (f_0 + \Delta f') \quad (5.9)$$

για μικρές γωνίες σκέδασης $f_0 \cong Z$, όπου Z είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων του ατόμου.

Επίσης, η διόρθωση απορρόφησης β μπορεί να εκφραστεί βάσει του γραμμικού συντελεστή απορρόφησης μ :

$$\beta = \frac{N_A r_e \lambda^2}{2\pi M} \rho \Delta f'' = \frac{\lambda \mu}{4\pi} \quad (5.10)$$

Το δ είναι της τάξης των 10^{-6} , οπότε ο δείκτης διάθλασης σε ένα μέσο είναι ελαφρά μικρότερος της μονάδας, αυτό σημαίνει ότι για τις ακτίνες X, ο αέρας είναι οπτικά πυκνότερο μέσο από οποιοδήποτε υλικό και έχει φανταστικό μέρος όταν το μέσο διάδοσης απορροφά τις ακτίνες X. Επειδή το β είναι πολύ μικρότερο του δ , πολλές φορές την αγνοούμε όταν αναφερόμαστε σε ελαφριά υλικά, χωρίς να έχουμε σημαντικό σφάλμα. Η ολική ανάκλαση των ακτίνων - X παρατηρείται για γωνίες πρόσπτωσης κάτω από μια κρίσιμη γωνία θ_c

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} = \sqrt{\frac{N_A r_e \lambda^2}{2\pi M} \rho (f_0 + \Delta f')} \quad (5.11)$$

Παρατηρούμε ότι η κρίσιμη γωνία εξαρτάται μόνο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και την ηλεκτρονική πυκνότητα του υλικού. [52,59,66]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ

6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική μας ενδιαφέρει η επίτευξη αντιπαράλληλης σύζευξης μεταξύ των μαγνητικών στρωμάτων Fe μέσω του κατάλληλου πάχους μη μαγνητικού στρώματος Cr, με αποτέλεσμα την δημιουργία <<συνθετικών αντισιδηρομαγνητών>> (SAF). Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η σύνθεση των αντισιδηρομαγνητικών πολυστρωματικών υμενίων του συστήματος $[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8$ (οι δείκτες μέσα στις αγκύλες υποδηλώνουν πάχος σε Å, ο δείκτης 8 αναφέρεται στον αριθμό επαναλήψεων του διστρώψματος). Δηλαδή η σειρά έχει σταθερό πάχος του Fe και σταθερό αριθμό επαναλήψεων, και διαφορετικό πάχος του Cr κάθε φορά. Συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αυτό, περιγράφει τον τρόπο παρασκευής των δειγμάτων καθώς και τον μαγνητικό και δομικό χαρακτηρισμό τους. Όλα τα δείγματα παρασκευάστηκαν με την τεχνική της μαγνητικά υποβοηθούμενης καθοδικής ιοντοβολής και μη μαγνητικό διαχωριστικό στρώμα επιλέγεται για να παράγει μια διαμόρφωση όπου οι μαγνητισμοί των στρωμάτων FM ευθυγραμμίζονται αντιπαράλληλα. Ο μαγνητικός χαρακτηρισμός τους

πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του μαγνητόμετρου παλλόμενου δείγματος (VSM) με το οποίο καταγράφονται οι βρόχοι υστέρησης. Οι βρόχοι υστέρησης όλων των δειγμάτων καταγράφηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $T=300\text{ K}$ σε γεωμετρία παράλληλα στην επιφάνεια του υμενίου, με μέγιστο εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο 18 kGauss . Από τη μελέτη τους, μπορούμε να εξάγουμε σημαντικές πληροφορίες για τη μαγνητική συμπεριφορά των υμενίων όπως η μαγνήτιση κόρου (M_s), το πεδίο κόρου (H_s), το πεδίο ανταλλαγής (H_{ex} exchange field), η παραμένουσα μαγνήτιση (M_r) και το συνεκτικό πεδίο (H_c). Στόχος του μαγνητικού χαρακτηρισμού αποτελεί η συσχέτιση των παραμέτρων διαμόρφωσης με τη μαγνητική απόκριση των πολυστρωματικών υμενίων. Ο δομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων έγινε με την τεχνική της ανακλαστικότητας ακτίνων-X (XRR) από την οποία υπολογίζουμε το ολικό πάχος της δομής. Όλα τα δείγματα έχουν αναπτυχθεί πάνω σε υπόστρωμα Si, στην επιφάνεια του οποίου έχει σχηματιστεί ένα στρώμα SiO_2 λόγω της αντίδρασής του με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

6.2 Αντισιδηρομαγνητική σύζευξη σε πολυστρωματικές δομές Fe/Cr

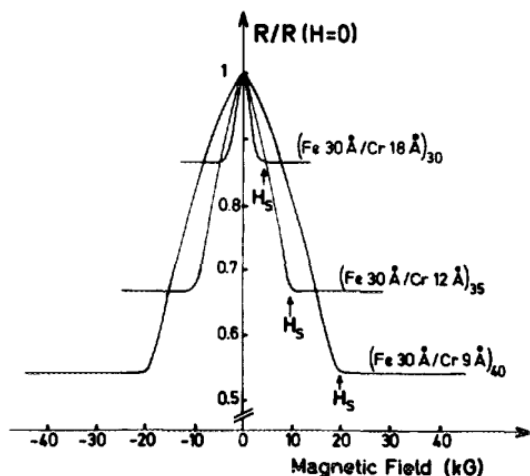
Αντισιδηρομαγνητική σύζευξη έχει βρεθεί σε πολλά μέταλλα μετάπτωσης και σε ορισμένα ευγενή μέταλλα, καθώς και στο Cu. Η σύζευξη αυτή εντοπίζεται σε πολυστρωματικές δομές οι οποίες αποτελούνται από σιδηρομαγνήτες των στοιχείων μετάπτωσης όπως Fe, Co, Ni καθώς και από τα κράματά τους. Η περίοδος ταλάντωσης φαίνεται να είναι ίδια σε όλα τα μέταλλα περίπου $10\text{\AA}$ με εξαίρεση το Cr όπου η περίοδος είναι περίπου διπλάσια σε σχέση με τα άλλα μέταλλα. Οι πρώιμες εικασίες για την προέλευση της αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης σε πολυστρωματικές δομές Fe/Cr βασίστηκαν στον μοναδικό μαγνητικό χαρακτήρα του Cr αλλά αυτό καταρρίφθηκε καθώς ανακαλύφθηκε παρόμοια και ισχυρότερη αντισιδηρομαγνητική σύζευξη σε πολυστρωματικές δομές Co/Ru. Επίσης, η σύζευξη ανταλλαγής εξαρτάται από τη θερμοκρασία καθώς και από το υλικό των μαγνητικών και μη μαγνητικών στρωμάτων. Το πεδίο κορεσμού είναι ανάλογο της ισχύος της σύζευξης ανταλλαγής, και αναφέρεται ως το πεδίο που χρειάζεται για την ευθυγράμμιση των μαγνητικών στρωμάτων και είναι μεγαλύτερο στο σύστημα Fe/Cr από ότι στο σύστημα Co/Cr, ενώ η θερμοκρασιακή εξάρτηση της σύζευξης ανταλλαγής είναι μεγαλύτερη για το σύστημα Co/Cr σε σχέση με το Fe/Cr. Η ισχύς της σύζευξης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και με την αύξηση του πάχους του μη μαγνητικού στρώματος. [67]. Στην συγκεκριμένη εργασία των Parkin και συνεργατών το μέγιστο της αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης σε Fe/Cr επιτυγχάνεται για πάχος χρωμίου $7\text{\AA}$ σε θερμοκρασία εναπόθεσης 125C και $N=20$. Για θερμοκρασία εναπόθεσης 40C και $N=30$ τα δεδομένα ακολουθούν μια παρόμοια συμπεριφορά αλλά δίνουν και μια δεύτερο μικρότερο μέγιστο σε πάχος $25\text{\AA}$.

Επίσης, ένα πρόσθετο και εξαιρετικά ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των πολυστρωματικών δομών Fe/Cr είναι και η εμφάνιση του φαινομένου της “γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης” GMR. Το φαινόμενο της GMR παρατηρήθηκε για πρώτη φορά

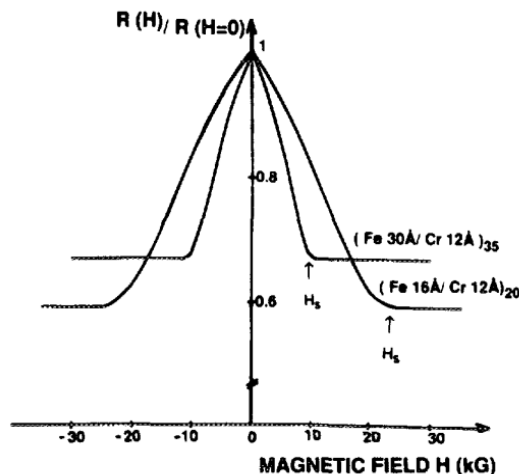
σε ένα επιταξιακό πολυστρωματικό σύστημα Fe (001)/Cr (001), το οποίο παρασκευάστηκε με τη μέθοδο επιταξίας μοριακής δέσμης (MBE) πάνω σε υπόστρωμα GaAs. Τα κύρια χαρακτηριστικά που εμφανίστηκαν στα υπερπλέγματα Fe(001)/Cr(001) είναι:

- I. Μια αντισιδηρομαγνητική (AF) σύζευξη εμφανίζεται για πάχος στρώματος χρωμίου $t_{Cr} < 20$, και παρατηρείται αύξηση της ισχύος της καθώς το πάχος του Cr μειώνεται.
- II. Η σύζευξη AF μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και παραμένει ισχυρή, πολύ πιο πάνω και από τη θερμοκρασία Neel του συμπαγούς Cr, $T_N = 310K$.

Η διαστρωματική σύζευξη AF των Fe/Cr είναι πολύ ισχυρή για να οφείλεται σε διπολικές αλληλεπιδράσεις και πρέπει να αποδοθεί σε σύζευξη ανταλλαγής μέσω των στρωμάτων Cr. Αυτή η σύζευξη είναι η αλληλεπίδραση RKKY όπου η μεταφορά της αλληλεπίδρασης μεταξύ των στρωμάτων γίνεται μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Στα σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται οι καμπύλες μαγνητοαντίστασης, σε θερμοκρασία $T = 4,2K$, με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα να εφαρμόζονται στο επίπεδο της πολυστρωματικής δομής. Βλέπουμε ότι υπάρχει μια μεγάλη τιμή της μαγνητοαντίστασης για δείγματα που εμφανίζουν αντισιδηρομαγνητική σύζευξη AF μεταξύ των στρωμάτων σε σχέση με τα άλλα δείγματα που δεν έχουν AF σύζευξη. Επίσης, παρατηρείται ότι κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης η αντίσταση της δομής πέφτει μέχρι που γίνεται σταθερή όταν όλες οι μαγνητίσεις των στρωμάτων Fe είναι προσανατολισμένες προς την ίδια κατεύθυνση. Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι κάθετο στο ρεύμα, δηλαδή η GMR δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της GMR παρατηρείται για το μικρότερο πάχος του Cr που αντιστοιχεί σε $t_{Cr} = 9\text{\AA}$. Επίσης, φαίνεται καθαρά ότι η μαγνητοαντίσταση μειώνεται απότομα καθώς αυξάνεται το πάχος του Cr ενώ το πάχος των μονοστρωματικών του Fe (t_{Fe}) διατηρείται σταθερό. Αντίστροφα όταν το t_{Cr} διατηρείται σταθερό και αλλάζει μόνο το t_{Fe} , παρατηρείται πάλι μια μείωση της αντίστασης αλλά πολύ πιο μικρή σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί όταν αλλάζει το t_{Cr} (σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Μαγνητοαντίσταση τριών δειγμάτων Fe/Cr συναρτήσει του εξωτερικού πεδίου με σταθερό πάχος Fe και διαφορετικό t_{Cr}



Σχήμα 6.2: Ίδια λεζάντα με το σχήμα 6.1 αλλά το t_{Cr} διατηρείται σταθερό και αλλάζει μόνο το t_{Fe} .

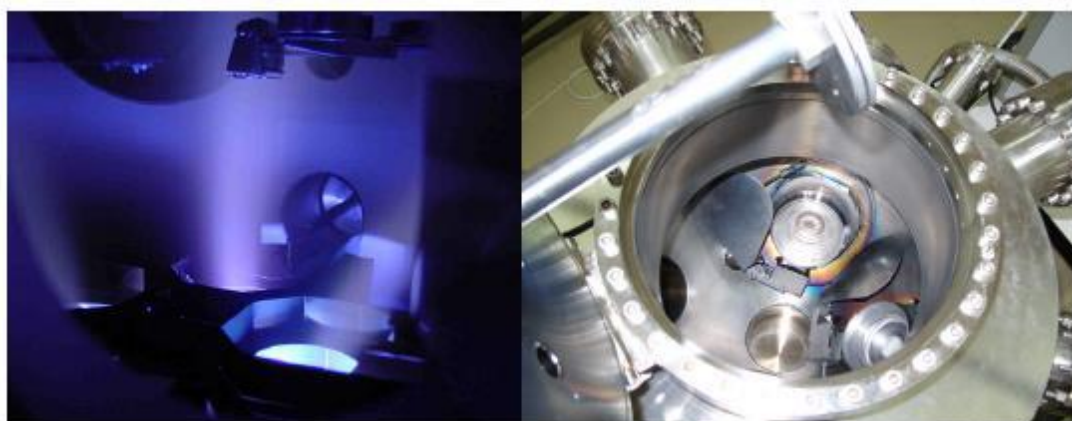
Έχει παρατηρηθεί ότι οι θερμικές επεξεργασίες μειώνουν τη μαγνητοαντίσταση χωρίς να επηρεάσουν σημαντικά τη μαγνητική κατάσταση του δείγματος. Επίσης, η μαγνητοαντίσταση επηρεάζεται και από της συνθήκες και τις παραμέτρους ανάπτυξης. Τέλος, η τεράστια μεταβολή της αντίστασης κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης των πολυστρωματικών δομών οφείλεται στην διαφορετική σκέδαση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας με spin up και spin down μέσα στα στρώματα Fe καθώς και στις διεπιφάνειες Fe/Cr. [68]

6.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας ιοντοβολής

Στη παρούσα εργασία για την παρασκευή λεπτών υμενίων χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή καθοδικής ιοντοβολής της εταιρίας MANTIS (εικόνα 5.1, 5.2). Αποτελείται από ένα ημισφαιρικό θάλαμο κενού, από ανοξείδωτο χάλυβα 316, με διάμετρο 500mm και συμβατό με τεχνολογία υπερύψηλού κενού, το οποίο αντλείται από αντλία στροβίλου, υποστηριζόμενη από μηχανική αντλία τύπου scroll με ταχύτητα άντλησης 12.6 m³/h. Διαθέτει τρεις πηγές καθοδικής ιοντοβολής τύπου Magnetron- Sputtering σε συνεστιακή γεωμετρία. Η τροφοδοσία γίνεται από δυο τροφοδοτικά RF/DC. Οι πηγές διαθέτουν πνευματικά ελεγχόμενα διαφράγματα, με αυτοματοποιημένο χρονικό έλεγχο, που επιτρέπει την εναπόθεση πολυστρωματικών διατάξεων.



Σχήμα 6.3: Μονάδα DC/RF Magnetron Sputtering

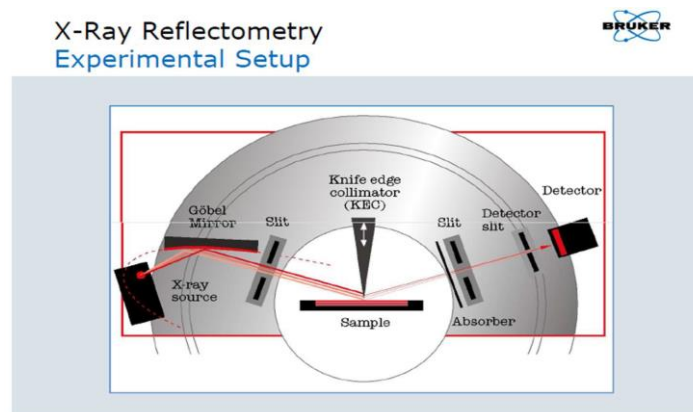


Σχήμα 6.4: Εσωτερικό όψη του οργάνου.

6.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μονάδας Περίθλασης Ακτίνων –X Παράλληλης Δέσμης (XRR)

Τα δεδομένα περίθλασης ακτίνων-X (XRR) συλλέχθηκαν με περιθλασίμετρο τύπου D8 του Οίκου Bruker. Συγκεκριμένα η μονάδα μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά:

- Άνοδος χαλκού με ισχύ 3.0 kW (20-60 kV).
- Γωνιόμετρο υψηλής ακριβείας με χωριστή κίνηση για γωνίες λυχνίας θ_i και ανιχνευτή θ_D .
- Παραβολικός καθρέπτης (Goebel mirror) για παραλληλισμό της δέσμης.
- Ανιχνευτής LYNXEYE XE 1D της Bruker με υψηλής ποιότητας το φίλτράρισμα του φθορισμού και της ακτινοβολίας Κβ.
- Σύστημα διαφραγμάτων προσπίπτουσας δέσμης (Divergence slits) και περιθλώμενης δέσμης (Scattering slits) και εισερχόμενης δέσμης (Receiving slits) φίλτρο για την ακτινοβολία Κβ του χαλκού από Νικέλιο και συστοιχίες διαφραγμάτων Soller.
- Τράπεζα δείγματος με μικρομετρική ρύθμιση ύψους και δυνατότητα άντλησης από αντλία διαφράγματος για σταθεροποίηση του δείγματος.
- Μαχαίρι αποκοπής της αρχικής δέσμης με μικρομετρική ρύθμιση ύψους.



Σχήμα 6.5: Η πειραματική διάταξη του περιθλασιμέτρου παράλληλης δέσμης τύπου D8.

Χάρη στην παράλληλη δέσμη, την ακρίβεια της τοποθέτησης του δείγματος και της ανεξάρτητης κίνησης των γωνιομέτρων το όργανο είναι πολύ χρήσιμο για τις εξής μετρήσεις:

- Μέτρηση ανακλαστικότητας ακτίνων-X: Μπορεί να δώσει πληροφορία για τα πάχη, τις πυκνότητες και την επιφανειακή τραχύτητα λεπτών υμενίων και στρωματικών νανοδομών. Η σάρωση είναι « $\theta, 2\theta$ » (δηλαδή $\theta = \theta_D = \theta_i$).
- Μέτρηση περίθλασης ακτίνων-X σε εφαιτομενική πρόσπτωση (δηλαδή με σταθερό θ_i σε μικρές γωνίες που πλησιάζουν κοντά στην γωνία ολικής ανάκλασης) ώστε να υπάρχει επιφανειακή ευαισθησία. Κατάλληλες για τον κρυσταλλογραφικό χαρακτηρισμό υμενίων και διάκριση του βάθους στο οποίο βρίσκεται η κάθε φάση με προσαρμογή της γωνίας πρόσπτωσης (depth profile).

- Μέτρηση “rocking curve”: Μεταβάλλονται οι γωνίες του ανιχνευτή και της πηγής αλλά με τρόπο ώστε να διατηρείται σταθερή η γωνία Bragg $\theta = (\theta_D + \theta_I)/2$, κατάλληλη για εύρεση της γωνιακής κατανομής προσανατολισμού των κρυσταλλινών.
- Γενική μέτρηση “Unlock coupled”: Μεταβάλλονται οι γωνίες του ανιχνευτή και της πηγής αλλά με τρόπο ώστε να διατηρείται σταθερή η γωνία $\psi = (\theta_D - \theta_I)/2$ του ανύσματος σκέδασης με το δείγμα.



Σχήμα 6.6: Περιθλασίμετρο ακτίνων X Τμήματος Επιστήμης Υλικών Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

6.5 Παρασκευή Δειγμάτων

Τα πολυστρωματικά υμένια $[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8$ (όπου $x=8-20 \text{ \AA}$) εναποτέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ιοντοβολής πολλών πηγών της εταιρείας MANTIS. Η διάμετρος των στόχων είναι 7.62 cm για το Fe και το Cr και 5.08 cm για το Ru. Η γεωμετρία των στόχων είναι συνεστιακή στις 45° ως προς το επίπεδο του υποστρώματος, το οποίο κατά την διάρκεια της εναπόθεσης περιστρέφεται. Η απόσταση του υποστρώματος από τους στόχους είναι στα 15cm, ενώ πριν την εναπόθεση έχει δημιουργηθεί κενό στο εσωτερικό του θαλάμου, με την πίεση να είναι χαμηλότερη από $7 \times 10^{-7} \text{ Torr}$, ενώ το αέριο αργό (Ar) που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια της εναπόθεσης έχει πίεση 3.5 mTorr. Το Ru εναποτέθηκε με ρυθμό $2.6 \text{ \AA/s}$ χρησιμοποιώντας 220 W RF, ο Fe με $0.7 \text{ \AA/s}$ εφαρμόζοντας DC ισχύ 110 W

και το Cr με 0.846 Å/s με 105 W DC. Τα δείγματα εναποτέθηκαν σε θερμικά οξειδωμένα μονοκρυσταλλικά υποστρώματα Si(100). Η πλήρης μορφή του συστήματος $[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8$ είναι $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8\text{Ru}_{10}$ το οποίο έχει εναποτεθεί πάνω σε υπόστρωμα Si. Το πρώτο στρώμα Cr, που εναποτίθεται πάνω στο υπόστρωμα πριν από τις επαναλήψεις $[\text{Fe}/\text{Cr}]$, έχει συγκεκριμένο λειτουργικό ρόλο στη δομή. Αυτό το συγκεκριμένο στρώμα Cr πάνω στο υπόστρωμα Si χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει σωστή ανάπτυξη της πολυστρωματικής δομής. Λειτουργεί ως στρώμα πρόσφυσης, βελτιώνει την ομαλότητα της επιφάνειας, περιορίζει τη διάχυση και τον σχηματισμό ανεπιθύμητων ενώσεων στη διεπιφάνεια Si/Fe, και δρα ως seed layer που σταθεροποιεί τη μικροδομή και την υφή των επόμενων στρωμάτων $[\text{Fe}/\text{Cr}]$. Το στρώμα του Ru που τοποθετείται στο τέλος της πολυστρωματικής δομής, χρησιμοποιείται ως προστατευτικό (capping) στρώμα, καθώς παρουσιάζει υψηλή χημική σταθερότητα και αποτρέπει την οξείδωση των υποκείμενων μαγνητικών στρωμάτων. Παράλληλα, ενισχύει τη μηχανική αντοχή της επιφάνειας, περιορίζει φαινόμενα διάχυσης και συμβάλλει στη διατήρηση της μορφολογικής και δομικής σταθερότητας της πολυστρωματικής δομής. Οι μαγνητικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός μαγνητόμετρου παλλόμενου δείγματος Lakeshore 7300 (VSM) σε θερμοκρασία δωματίου. Για την ανάλυση της δομής των υμενίων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική ανακλαστικότητας ακτίνων – X (X-Ray Reflectivity – XRR), με ακτινοβολία Cu-Kα και παράλληλη δέσμη από έναν Gobel Mirror.

6.6 Αποτελέσματα – Συζήτηση

Οι μαγνητικές ιδιότητες των υμενίων μελετήθηκαν με μετρήσεις μαγνήτισης συναρτήσει του εφαρμοσμένου πεδίου που έγιναν σε μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζονται οι μαγνητικοί βρόχοι υστέρησης (M-H) των δειγμάτων $[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8$ για $x = 8, 12.5, 15, 17.5, 20$ Å με πεδίο που εφαρμόζεται παράλληλα στο υπόστρωμα. Πιο αναλυτικά τα δείγματα είναι $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_8]_8/\text{Ru}_{10}$, $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_{12.5}]_8/\text{Ru}_{10}$, $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_{15}]_8/\text{Ru}_{10}$, $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_{17.5}]_8/\text{Ru}_{10}$, $\text{Cr}_{50}/[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_{20}]_8/\text{Ru}_{10}$. Από τους M-H βρόχους υπολογίσαμε το πεδίο ανταλλαγής H_{ex} το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με το πεδίο κορεσμού H_{sat} . Πιο αναλυτικά, το H_{sat} είναι το πεδίο που χρειάζεται ένα υλικό να φτάσει στη μαγνήτιση κόρου, όπου όλες οι μαγνητικές ροπές είναι προσανατολισμένες προς την ίδια κατεύθυνση. Το πεδίο ανταλλαγής H_{ex} σε μια πολυστρωματική δομή SAF είναι το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που απαιτείται για να υπερνικήσει την RKKY αντισιδηρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των μαγνητικών στρωμάτων. Με άλλα λόγια, είναι το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που απαιτείται για να ξεπεραστεί αυτή η αντιπαράλληλη σύζευξη μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων Fe (λόγω του λεπτού στρώματος Cr) και να αναστρέψει τη σχετική τους διεύθυνση, δηλαδή η μαγνήτιση στα δύο στρώματα Fe να είναι παράλληλη. Το πεδίο ανταλλαγής είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη σταθερότητα, τη δύναμη και τον τύπο της ενδοδιαστρωματικής μαγνητικής σύζευξης. Πιο συγκεκριμένα, το H_{ex} μας πληροφορεί για το μέτρο της RKKY σύζευξης (δύναμη αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης), όσο

μεγαλύτερο είναι το H_{ex} τόσο ισχυρή είναι η αντισιδηρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των στρωμάτων. Επίσης, μας δείχνει τη σταθερότητα της συνθετικής αντισιδηρομαγνητικής διάταξης, δηλαδή, μεγαλύτερη τιμή $H_{ex} \Rightarrow$ δυσκολότερη αντιστροφή $\Rightarrow$ μεγαλύτερη σταθερότητα των αντίθετων μαγνητικών διευθύνσεων. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές όπως MRAM (spin valves), GMR (head sensors), SAF (pinning layers). Τελικά, το H_{ex} είναι το πεδίο στο οποίο γίνεται η μετάβαση στους SAF από αντιπαράλληλη σε παράλληλη κατεύθυνσή. [54,55]

Στη γραμμική προσέγγιση της μαγνήτισης, δηλαδή στην περιοχή μικρών γωνιών, ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$m = \frac{H}{H_{ex} + H_K} \quad (6.1)$$

όπου m είναι η κανονικοποιημένη μαγνήτιση η οποία ισούται με: $m = \frac{M}{M_S}$ (6.2)

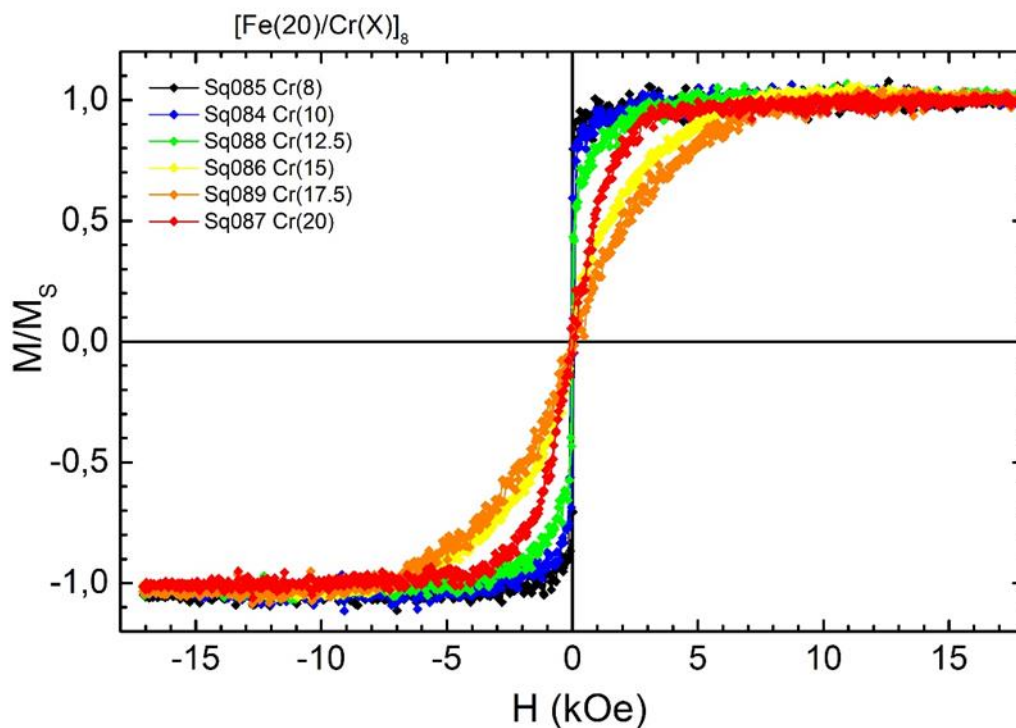
Στους συνθετικούς αντισιδηρομαγνήτες (SAF), το πεδίο ανισοτροπίας (H_K) είναι συνήθως πολύ μικρό σε σύγκριση με το πεδίο ανταλλαγής (H_{ex}). Αυτό οφείλεται στο ότι τα στρώματα Fe στους SAF είναι εξαιρετικά λεπτά ($\sim 1-2$ nm), με αποτέλεσμα η ανισοτροπία όγκου (K_u) και η επιφανειακή ανισοτροπία να έχουν πολύ μικρές τιμές σε σχέση με την ισχυρή αντισιδηρομαγνητική σύζευξη η οποία παράγει ένα πεδίο H_{ex} της τάξης αρκετών kOe, πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο (H_K). Αφού $H_K \ll H_{ex}$ τότε η συνεισφορά της H_K είναι αμελητέα με αποτέλεσμα η εξίσωση (πιο πάνω) να πάρει τη μορφή:

$$m = \frac{H}{H_{ex}} \quad (6.3)$$

Στη μαγνήτιση κόρου το m ισούται με 1, άρα η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$H = H_{sat} = H_{ex} \quad (6.4)$$

Συνεπώς, το πεδίο κορεσμού του κάθε δείγματος ισούται με το πεδίο ανταλλαγής του. Παρακάτω φαίνονται οι βρόχοι υστέρησης των υμενίων που παρασκευάστηκαν και από αυτούς έχουμε υπολογίσει το πεδίο ανταλλαγής H_{ex} , για κάθε δείγμα, το οποίο όπως αναφέραμε παραπάνω ισούται με το πεδίο κορεσμού H_{sat} .



Σχήμα 6.7: Βρόχοι υστέρησης όλων των δειγμάτων για παράλληλο εφαρμοζόμενο πεδίο.

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται οι τιμές των πεδίων ανταλλαγής του κάθε δείγματος με συγκεκριμένο πάχος Cr.

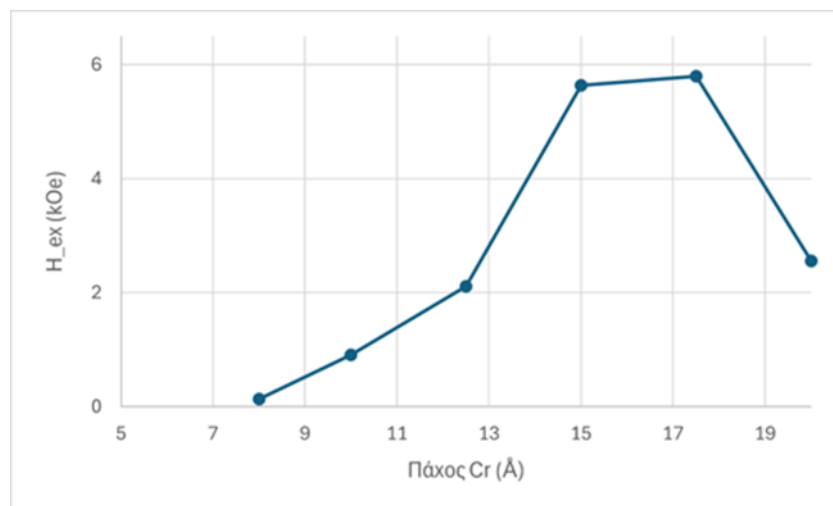
Πάχος Cr (Å)	H _{ex} (kOe)
8	0.13
10	0.91
12.5	2.11
15	5.64
17.5	5.8
20	2.56

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι το μέγιστο πεδίο ανταλλαγής παρουσιάζει το δείγμα $[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_{17.5}]_8$, δηλαδή αυτό με πάχος Cr 17.5 Å. Συνεπώς, το δείγμα αυτό εμφανίζει την ισχυρότερη αντισιδηρομαγνητική σύζευξη ανταλλαγής (RKKY), γεγονός που συνεπάγεται ότι απαιτείται το υψηλότερο εξωτερικό πεδίο κορεσμού

H_{sat} για να παραλληλιστούν τα σιδηρομαγνητικά στρώματα Fe. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πάχος του Cr, αυξάνεται αντίστοιχα και το πεδίο ανταλλαγής H_{ex} , μέχρι την τιμή των 17,5 Å. Για το μεγαλύτερο πάχος (20 Å), παρατηρείται μείωση του H_{ex} , η οποία λαμβάνει την τιμή 2,56 kOe. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται από τη συνημιτονοειδή φύση της RKKY αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση του πάχους του μη μαγνητικού στρώματος, η οποία περιγράφεται από τη σχέση:

$$J_{\text{RKKY}}(R) \propto \frac{\cos(2k_F R)}{(k_F R)^3} \sim \frac{1}{R^3}.$$

Τέλος, για πολύ μεγάλα πάχη του μη μαγνητικού στρώματος ή, γενικότερα, για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των μαγνητικών ατόμων, η RKKY αλληλεπίδραση τείνει στο μηδέν. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή του πεδίου ανταλλαγής H_{ex} συναρτήσει του πάχους του Cr.



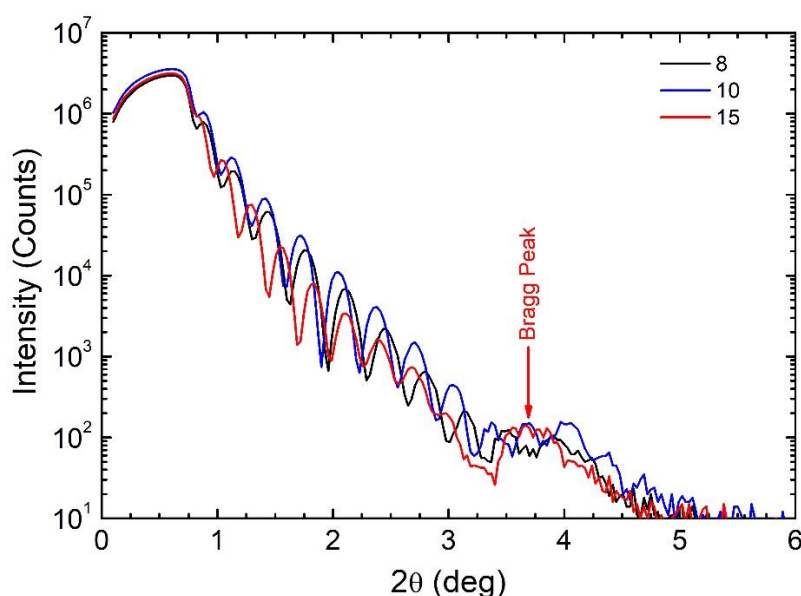
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα απεικόνισης του πεδίου ανταλλαγής H_{ex} σαν συνάρτησης του πάχους του Cr.

Από το διάγραμμα παρατηρείται η συνημιτονοειδή μορφή της συνάρτησης, η οποία απορρέει από τις αλληλεπιδράσεις RKKY, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Από τα φάσματα XRR (reflectivity συναρτήσει του 2θ) που προέκυψαν από τα συγκεκριμένα δείγματα, μπορούμε να εξάγουμε τις ακριβείς τιμές του πάχους του κάθε δείγματος. Οι αντίστοιχες τιμές των παχών συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2 : Συγκεντρωτικός πίνακας όπου παρουσιάζονται οι τιμές των πειραματικών και των θεωρητικών παχών για κάθε δείγμα.

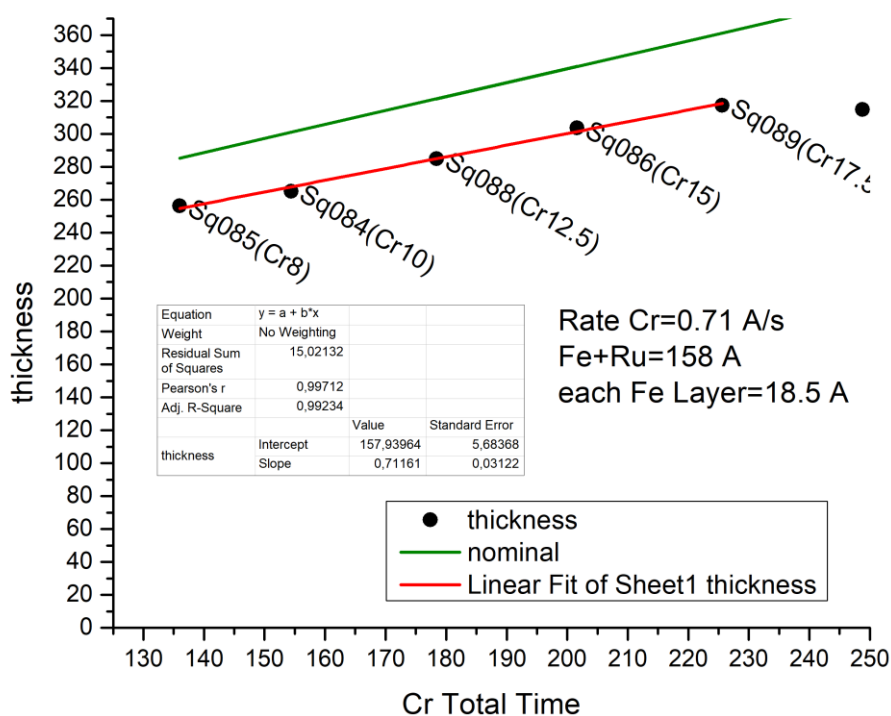
Αριθμός Δείγματος	Δείγματα	Πάχος Cr (Å)	Λ nominal (Å)	Λ XRR (Å)	σ (%)
Sq084	Cr(50)/[Fe(20)/Cr(10)] ₈ Ru(10)	10	300	265.2	11.6
Sq085	Cr(50)/[Fe(20)/Cr(8)] ₈ /Ru(10)	8	284	256.2	9.8
Sq086	Cr(50)/[Fe(20)/Cr(15)] ₈ /Ru(10)	15	340	303.6	10.7
Sq087	Cr(50)/[Fe(20)/Cr(20)] ₈ /Ru(10)	20	380	314.8	17.2
Sq088	Cr(50)/[Fe(20)/Cr(12.5)] ₈ /Ru(10)	12.5	320	284.9	10.9
Sq089	Cr(50)/[Fe(20)/Cr(17.5)] ₈ /Ru(10)	17.5	360	317.4	11.8

Από τον υπολογισμό του πάχους της δομής βάσει των διαγραμμάτων ακτίνων-X, παρατηρείται ότι υπάρχει γενική συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Στο ακόλουθο συγκεντρωτικό διάγραμμα παρουσιάζονται όλα τα δείγματα: στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο συνολικός χρόνος εναπόθεσης του Cr σε ολόκληρη την πολυστρωματική δομή, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το αντίστοιχο πάχος της δομής.



6.9 Ενδεικτικά διαγράμματα XRR για τα δείγματα Fe(20)/Cr(8)]₈, Fe(20)/Cr(8)]₈ και Fe(20)/Cr(8)]₈ διακρίνονται οι κροσσοί του συνολικού πάχους και σε μερικές περιπτώσεις οι Bragg.

Ενδεικτικά διαγράμματα XRR για τα δείγματα $\text{Fe}(20)/\text{Cr}(8)]_8$, $\text{Fe}(20)/\text{Cr}(10)]_8$ και $\text{Fe}(15)/\text{Cr}(8)]_8$ παρουσιάζονται στο σχήμα 6.9. Η κορυφή της Bragg της υπερδομής διακρίνεται για $\text{Fe}(15)/\text{Cr}(8)]_8$ και κάπως για το $\text{Fe}(20)/\text{Cr}(10)]_8$. Αυτό πρέπει να αποδοθεί στο ότι η επιφανειακή τραχύτητα και ενδοδιάχυση είναι συγκρίσιμη με $10\text{\AA}$. Επομένως θα λέγαμε ότι έχουμε μια στοιχειομετρικά διαμορφωμένη δομή και όχι ένα τέλειο πολυστρωματικό υλικό.



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα που παρουσιάζει τη μεταβολή του συνολικού πάχους της πολυστρωματικής δομής σε σχέση με τον συνολικό χρόνο εναπόθεσης του Cr.

Στο διάγραμμα παρουσιάζονται τα ονομαστικά (nominal, όπως υπολογίζονται από την βαθμονόμηση ρυθμών εναπόθεσης του Sputtering) και πειραματικά (XRR thickness) πάχη των πολυστρωματικών δομών όπως υπολογίζονται από τους κροσσούς του συνολικού πάχους. Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο πραγματικό πάχος όπως προσδιορίστηκε μέσω της τεχνικής XRR, ενώ η πράσινη καμπύλη απεικονίζει τις ονομαστικές τιμές με βάση τους χρόνους εναπόθεσης. Δεδομένου ότι το πάχος των στρωμάτων Fe παραμένει σταθερό, η μεταβολή του συνολικού πάχους οφείλεται αποκλειστικά στο Cr, με αποτέλεσμα η κλίση να αποτυπώνει άμεσα την ταχύτητα ανάπτυξης του διαχωριστικού στρώματος Cr και να επιβεβαιώνει την ομοιομορφία της διαδικασίας εναπόθεσης. Η κλίση της γραμμικής προσαρμογής στο διάγραμμα thickness–time προκύπτει ίση με $0.71 \text{ \AA/s}$ και συμφωνεί με τον ονομαστικό ρυθμό εναπόθεσης του Cr $0.7 \text{ \AA/s}$. Από την προσαρμογή των XRR δεδομένων προέκυψε επίσης ότι το πάχος κάθε στρώματος Fe είναι $18.5 \text{ \AA}$. Επομένως, το συνολικό πάχος που προέρχεται από τα στρώματα Fe και το τελικό στρώμα Ru παραμένει σταθερό και ισούται με $158 \text{ \AA}$, ενώ η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται μεταξύ των δειγμάτων

είναι το πάχος του στρώματος Cr, το οποίο καθορίζεται από τον αντίστοιχο χρόνο εναπόθεσης. Οι αποκλίσεις της τάξης 10% μεταξύ του αναμενόμενου και του πειραματικά προσδιορισμένου πάχους στις πολυστρωματικές δομές πρέπει να αποδοθούν στην διεπιφανειακή διάχυση και τις διαφορές μορφολογίας στην ανάπτυξη μεταξύ των Fe/Cr σε σύγκριση με τα απλά υμένια Fe ή Cr. Σε μια στοιχειομετρικά διαμορφωμένη δομή η πυκνότητα είναι αναμενόμενο να διαφέρει από τον μέσο όρο των υλικών που την αποτελούν και επομένως το πάχος να είναι διαφορετικό από αυτό του απλού αθροίσματος των παχών των υλικών αν είχαν εναποτεθεί ξεχωριστά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ανάπτυξη και η βελτιστοποίηση της αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης ανταλλαγής σε λεπτά πολυστρωματικά υμένια τύπου $[\text{Fe}_{20}/\text{Cr}_x]_8$ για $x = 8, 12.5, 15, 17.5, 20 \text{ \AA}$, με στόχο τον προσδιορισμό των συνθηκών που οδηγούν στη μέγιστη RKKY σύζευξη μεταξύ των σιδηρομαγνητικών στρωμάτων Fe. Τα υμένια εναποτέθηκαν με τη μέθοδο sputtering πάνω σε υποστρώματα Si/SiO₂, ενώ ο μαγνητικός και δομικός τους χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε με τις τεχνικές VSM και XRR, αντίστοιχα. Κύριο εύρημα της εργασίας αποτελεί η ισχυρή εξάρτηση της αντισιδηρομαγνητικής σύζευξης από το πάχος του μη μαγνητικού στρώματος Cr. Καθώς όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της δομής διατηρήθηκαν σταθερά (πάχος Fe, αριθμός επαναλήψεων και στρώμα σποράς Cr), το πάχος του Cr αποτέλεσε τον αποκλειστικό ρυθμιστικό παράγοντα της σύζευξης. Από τη μελέτη των βρόχων υστέρησης προέκυψε ότι το πεδίο κορεσμού, και κατά συνέπεια το πεδίο ανταλλαγής H_{ex} , παρουσιάζει έντονη διακύμανση με το πάχος του Cr. Η τάση αυτή συμφωνεί με την θεωρητική περιγραφή της RKKY αλληλεπίδρασης Η μέγιστη τιμή του H_{ex} παρατηρήθηκε για πάχος $17.5 \text{ \AA}$, όπου καταγράφηκε η ισχυρότερη αντισιδηρομαγνητική RKKY σύζευξη, γεγονός που υποδηλώνει τη μέγιστη σταθερότητα και αντοχή της συνθετικής αντισιδηρομαγνητικής διάταξης (SAF)., η οποία εμφανίζει συνημιτονοειδή εξάρτηση από το πάχος του μη μαγνητικού στρώματος και μεταβάλλεται περιοδικά μεταξύ ζωνών ισχυρής αντισιδηρομαγνητικής και ασθενέστερης σύζευξης. Για πάχος Cr ίσο με $20 \text{ \AA}$ παρατηρείται σημαντική μείωση του πεδίου ανταλλαγής, γεγονός που επιβεβαιώνει τη θεωρητική πρόβλεψη για εξασθένηση της RKKY σύζευξης σε μεγαλύτερα πάχη, λόγω του όρου $1/R^3$ που οδηγεί σε απόσβεση της αλληλεπίδρασης σε μεγάλες αποστάσεις. Η δομική ανάλυση μέσω XRR επιβεβαίωσε την επιτυχή ανάπτυξη των πολυστρωματικών δομών, καθώς οι πειραματικά προσδιορισμένες τιμές πάχους βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με τις ονομαστικές, με αποκλίσεις της τάξεως 10–12%. Από την προσαρμογή των δεδομένων προσδιορίστηκε ο ρυθμός εναπόθεσης του Cr ίσος με $0.71 \text{ \AA/s}$, καθώς και πραγματικό πάχος Fe περίπου $18.5 \text{ \AA}$, τιμές που επιβεβαιώνουν την επαναληψιμότητα και σταθερότητα της διαδικασίας εναπόθεσης. Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η βέλτιστη αντισιδηρομαγνητική σύζευξη Fe/Cr επιτυγχάνεται για πάχος Cr = $17.5 \text{ \AA}$, ενώ ταυτόχρονα επιβεβαιώνεται ο θεωρητικός συνημιτονοειδής χαρακτήρας της RKKY αλληλεπίδρασης. Η κατανόηση και ο έλεγχος του πάχους του Cr αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για τη σχεδίαση συνθετικών αντισιδηρομαγνητών υψηλής

σταθερότητας, με άμεση εφαρμογή σε τεχνολογίες spintronics, όπως MRAM, spin valves και GMR αισθητήρες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Forrester, D. M., & Kusmartsev, F. V. (2014, January 17). The nano-mechanics and magnetic properties of high moment synthetic antiferromagnetic particles.
2. Kurdi, S., Zilske, P., Xu, X. D., Frentrop, M., Vickers, M. E., Sakuraba, Y., Reiss, G., Barber, Z. H., & Koo, J. (2020, April 22). Optimization of ruthenium as a buffer layer for non-collinear antiferromagnetic Mn₃X films.
3. Rössler, U., & Bogdanov, A. N. (2006, October 1). Finite-size effects and “surface spin-flop” phenomena in antiferromagnetically coupled multilayers.
4. Coey, J. M. D. (2013). *Μαγνητισμός και μαγνητικά υλικά*. CopyCity Publish.
5. Hewitt, P. G. (2005). *Οι έννοιες της φυσικής*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
6. Παναγιωτόπουλος, Ι.Μ. (2010). *Μαγνητικά Υλικά*. Α. Γ. Πνευματικός.
7. Kasap, S. O. (2018). *Ηλεκτροτεχνικά υλικά* (4th ed.). Τζιόλα.
8. Στεφανή, Χ. (2015). *Προσομοίωση διαδικασίας μαγνήτισης με τεχνικές μικρομαγνητισμού* [Μεταπτυχιακή διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών].
9. Γιαννακόπουλος, Α. Θ. (2021). *Μέτρηση μαγνητικής επιδεκτικότητας μαγνητικά τροποποιημένων κυττάρων μικροάλγων* [Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών].
10. Jiles, D. C. (1991). *Introduction to magnetism and magnetic materials* (1st ed.). London, UK: Chapman and Hall.
11. Krishnan, K. M. (2016). *Fundamentals and applications of magnetic materials*. Oxford, UK: Oxford University Press.
12. Callister, W. D. (2008). *Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών*.
13. Coey, J. M. D. (2001). *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge University Press.
14. Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2009). *Introduction to magnetic materials* (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.
15. Κανατσιόπουλος, Δ. (n.d.). *Μελέτη των μαγνητικών και δομικών ιδιοτήτων του συστήματος MnFeGa* [Πτυχιακή εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής].
16. Ελευθέριος, Ν. (2020). *Εναπόθεση και Χαρακτηρισμός Λεπτών Υμενίων Co/W*.
17. Alderop, G. H. O., Kelly, P. J., & Schuurmans, M. F. H. (1990). First-principles calculation of the magnetocrystalline anisotropy energy of iron, cobalt, and nickel. *Physical Review B*, 41(17), 11919–11937.
18. Getzlaff, M. (1965). *Fundamentals of Magnetism*. Springer.
19. Zhang, S., & Zhao, D. (2017). *Advances in Magnetic Materials: Processing, Properties, and Performance*. Taylor & Francis Group.
20. O’Handley, R. C. (2000). *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*. John Wiley & Sons Inc.

21. Coey, J. M. D. (2009). *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge University Press.
22. Ντέτσικα, Π. (2019). *Εναπόθεση και χαρακτηρισμός πολυστρωματικών υμενίων (X/CoFeB/Y), όπου X,Y=MgO, Pt, Ru, Ta*.
23. Zhang, D. Z. S. (2017). *Advances in Magnetic Materials: Processing, Properties, and Performance*. CRC Press.
24. Τέγγερης, Χρ. (2015). *Αλληλεπιδράσεις μεταξύ μαγνητικών σκίρμιον* [Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Κύπρου].
25. O'Handley, R. C. (1999). *Modern Magnetic Materials Principles and Applications*. Wiley Interscience.
26. Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2008). *Introduction to Magnetic Materials*. John Wiley & Sons, Inc.
27. Wikipedia. (2000). Magnetic Domain Walls. pp. 1–20. Available: papers2://publication/uuid/2758C727-681E-4B3A-AC2A-893C41729C32
28. Bozorth, R. M. (1929). Barkhausen effect in iron, nickel and permalloy. I. Measurement of discontinuous change in magnetization. *Physical Review*, 34(5), 772–784. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.34.772>
29. Jiles, D. C. (1991). *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*.
30. Krishnan, K. M. (2016). *Fundamentals and Applications of Magnetic Materials*.
31. Angelakeris, M.-E., & Kalogirou, K.-O. (2014). *Μαγνητισμός και Μαγνητικά Υλικά*.
32. Coey, J. M. D. (2013). *Μαγνητισμός και μαγνητικά υλικά*. CopyCity Publish.
33. Παπαϊωάννου, Ε. (2006). *Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Φυσικής Α.Π.Θ.*
34. Poulsen, V. (1905). Danish patent No. 2653; US Patent No. 789,336.
35. Perpendicular magnetic recording-Its development and realization. (2009). *Proc. Jpn. Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci.*, 85, 37–54.
36. Ikeda, S., Miura, K., Yamamoto, H., Mizunuma, K., Gan, H. D., Endo, M., Kanai, S., Hayakawa, J., Matsukura, F., & Ohno, H. (2010). A perpendicular-anisotropy CoFeB/MgO magnetic tunnel junction. *Nature Materials*, 9, 721–724.
37. Mangin, S., Ravelosona, D., Katine, J. A., Carey, M. J., Terris, B. D., & Fullerton, E. E. (2006). Current-induced magnetization reversal in nanopillars with perpendicular anisotropy. *Nature Materials*, 5, 210–215.
38. Σπυρίδωνα, Π. (2008). *Παρασκευή με τη μέθοδο sputtering, χαρακτηρισμός και ιδιότητες λεπτών μαγνητικών υμενίων τεχνολογικού ενδιαφέροντος*. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.
39. Wolf, A., Awschalom, D. D., & Buhrman, R. A., et al. (2001). Spintronics: A spin-based electronics vision for the future. *Science*, 294(5546).
40. Baibich, M. N., et al. (1988). Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. *Physical Review Letters*, 61.
41. Julliere, M. (1975). Tunneling between ferromagnetic films. *Physics Letters A*, 54, 225–226.
42. Fert, A., & Grünberg, P. (2007). The discovery of Giant Magnetoresistance (GMR) [Nobel Prize Lecture].

43. Coey, J. M. D. (2009). *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge University Press.
44. Lavrijsen, R. (2006). *MgO based Magnetic Tunnel* (December), 1–98.
45. Duine, R. A., Lee, K.-J., Parkin, S. S. P., & Stiles, M. D. (2018). *Synthetic antiferromagnetic spintronics*. *Nature Physics*, 14(3), 217–219. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0050-7>
46. Joshi, V. K. (2016). Spintronics: A contemporary review of emerging electronics devices. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3), 1503–1513. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.05>.
47. Du Trémolet de Lacheisserie, É., Gignoux, D., & Schlenker, M. (Eds.). (2002). *Magnetism: Fundamentals, Materials and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-23062-7>
48. Levy, P. M., Ounadjela, K., Zhang, S., Wang, Y., Sommers, C. B., & Fert, A. (1990). Theory of magnetic superlattices: Interlayer exchange coupling and magnetoresistance of transition metal structures (invited). *Journal of Applied Physics*, 67(9), 5908–5913. <https://doi.org/10.1063/1.345380>
49. Barthélémy, A., Fert, A., Baibich, M. N., Hadjoudj, S., Petroff, F., Etienne, P., Cabanel, R., Lequien, S., Nguyen Van Dau, F., & Creuzet, G. (1990). Magnetic and transport properties of Fe/Cr superlattices (invited). *Journal of Applied Physics*, 67(9), 5908–5913. <https://doi.org/10.1063/1.345380>
50. Guedes, A., Mendes, M. J., Freitas, P. P., & Martins, J. L. (2006). Study of synthetic ferrimagnet–synthetic antiferromagnet structures for magnetic sensor application. *Journal of Applied Physics*, 99, 08B703. <https://doi.org/10.1063/1.2162817>
51. Huang, D., Zhang, D., Kim, Y., Wang, J.-P., & Wang, X. (2020). Magnetization dynamics in synthetic antiferromagnets with perpendicular magnetic anisotropy. *Applied Physics Letters*, 116(13), 132404. <https://doi.org/10.1063/1.5143253>
52. Μούρκας, Α. (2021). Αντιστροφή και δυναμική της μαγνήτισης σε υμένα X/Co/Y (X=Pt, Ru, Y=W, ZnO) με ανισοτροπικές αλληλεπιδράσεις [Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών]. Ιωάννινα.
53. Zhang, X., Ezawa, M., & Zhou, Y. (2015). Magnetic skyrmion logic gates: Conversion, duplication and merging of skyrmions. *Scientific Reports*, 5, 9400. <https://doi.org/10.1038/srep09400>
54. Bruno, P. (1995). Theory of interlayer magnetic coupling. *Physical Review B*, 52(1), 411–439. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.411>
55. Schäfer, R., Hubert, A., Grimm, H., & Mönch, I. (1999). Magnetic switching in antiferromagnetically coupled multilayers. *Journal of Applied Physics*, 85(8), 5082–5084. <https://doi.org/10.1063/1.370452>
56. Heitmann, S. (2004). *Cobalt / Copper multilayers: Interplay of microstructure and GMR and recrystallization as the key towards temperature stability* [Thesis].
57. Ohring, M. (2001). *Materials science of thin films: Deposition and structure* (2nd ed.). Academic Press.
58. Depla, D., & Mahieu, S. (2008). *Reactive sputter deposition*. Springer Series in Materials Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
59. Σιάδου, Γ. Ν. (2014). Εναπόθεση και χαρακτηρισμός μαγνητο-ηλεκτρικών υμενίων [Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών]. Ιωάννινα.

60. Αθανασίου Κολιογιώργου, Α. (2015). Μαγνητικές νανοδομές – Μελέτη με μικροσκοπία AFM/MFM [Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Σχολή Θετικών Επιστημών]. Ιωάννινα.
61. Φίλιος, Κ. Ν. (2012). Δομικές και μαγνητικές ιδιότητες μαγνητικών πολυστρωματικών υμενίων ρουθηνίου – νικελίου (Ru/Ni) για πιθανές ενεργειακές εφαρμογές [Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών].
62. Jiles, D. C. (1991). *Introduction to magnetism and magnetic materials* (1st ed.). London, UK: Chapman and Hall.
63. Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2008). *Introduction to magnetic materials*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
64. Moyer, S. R., A. C. J., & M. C. A. (2000). *Σύγχρονη φυσική*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
65. Young, H. D. (1994). *Πανεπιστημιακή φυσική – Τόμος Β: Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική, Σύγχρονη Φυσική*. Εκδόσεις Παπαζήση. ISBN 978-960-02-1088-0
66. Chason, E., & Mayer, T. M. (1997). Thin film and surface characterization by specular X-ray reflectivity. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 22(1), 1–67. <https://doi.org/10.1080/10408439708205935>
67. Parkin, S. S. P. (1991). Oscillatory interlayer exchange coupling through Cu and various transition metals. IBM Research Division, Almaden Research Center, San Jose, CA, USA.
68. Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Nguyen Van Dau, F., Petroff, F., Etienne, P., Creuzet, G., Friederich, A., & Chazelas, J. (1990). *Magnetic and transport properties of Fe/Cr superlattices*. *Journal of Applied Physics*, 67(9), 5908–5913. <https://doi.org/10.1063/1.345350>