



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ 2D
ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ ΓΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»**

ΑΝΤΩΝΑΚΗΣ ΣΕΡΑΦΕΙΜ (Α.Μ. 7278)

ΤΖΑΡΙΜΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ(Α.Μ. 7034)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

Ακαδημαϊκός Υπότροφος

ΠΑΤΡΑ, Ιούλιος 2020

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη Μελέτη Μηχανικής Συμπεριφοράς 2D Κρυστάλλων για Τεχνολογικές Εφαρμογές και ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2020. Εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μας στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, υπό την επίβλεψη του Δρ. Γραμματικόπουλου Σπυρίδων.

Θα θέλαμε λοιπόν να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας κ. Γραμματικόπουλο, καθώς και τους κ. Τσίρκα και τον κ. Τσινόπουλο για την ευκαιρία που μας έδωσαν και την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν, ώστε να ασχοληθούμε με ένα τόσο ενδιαφέρον και μοναδικό θέμα. Δεν ξεχνάμε την βοήθεια και την συμπαράσταση τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης. Οι οδηγίες του καθηγητή μας ήταν απολύτως σαφείς και διευκρινιστικές για να ολοκληρώσουμε τη μελέτη μας.

Σημαντική υπήρξε η συμβολή και στήριξη των γονιών μας, κατά τη διάρκεια των σπουδών μας. Η ενθάρρυνσή τους αποτέλεσε και αποτελεί σημαντικό στοιχείο της μέχρι τώρα διαδρομής μας. Δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε και την συμπαράσταση των φίλων και αδερφών μας σε όλη την πορεία μας αυτή.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Φοιτητές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι Φοιτητές

(Όνοματεπώνυμο)

(Όνοματεπώνυμο)

.....

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της μηχανικής απόκρισης πολυστρωματικών υλικών που στηρίζονται στη δομή του γραφενίου, όπως επίσης και ο σχεδιασμός κατάλληλης διάταξης κάμψης τριών σημείων σε δύο διευθύνσεις.

Τα εξεταζόμενα δείγματα παρασκευάστηκαν με συγκεκριμένες μεθόδους, όπως μικρομηχανική αποφλοίσωση και χημική εναπόθεση ατμών CVD, αλλά και σύνθεση μικροκυμάτων και ταχεία ψύξη. Τα δείγματα αυτά μας παραχωρήθηκαν από το Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ)

Στην παρούσα πτυχιακή, αρχικά έγινε ανάλυση των οπτικών, μηχανικών, ηλεκτρικών και θερμικών ιδιοτήτων για τα εξής υλικά: α) Γραφένιο, β) Δισουλφίδιο του Βολφραμίου και γ) Δισουλφίδιο του Μολυβδαίνιου. Επιπλέον, έγινε αναφορά της χρήσης τους σε εφαρμογές τεχνολογικού ενδιαφέροντος.

Δεύτερον αναφερθήκαμε στον χαρακτηρισμό και στη ερμηνεία του φαινομένου Raman, καθώς και στα ηλεκτρονικά μικροσκόπια: α) Σάρωσης (SEM), β) Διέλευσης (TEM) και γ) στο μικροσκόπιο ατομικών δυνάμεων (AFM).

Τρίτον σταθήκαμε στη συμπεριφορά των δισδιάστατων υλικών και παρουσιάσαμε την νέα πειραματική διάταξη που διαδέχτηκε την υπάρχουσα, η οποία έχει να κάνει με την διαξονική καταπόνηση δισδιάστατων κρυστάλλων. Προχωρήσαμε σε αναλυτική περιγραφή της διάταξης αυτής και παρουσιάσαμε τις νέες καινοτομίες της. Έπειτα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έγινε προσομοίωση των δυνάμεων που αναπτύχθηκαν.

Τέλος, με την χρήση των Strain Gages, προχωρήσαμε σε βαθμονόμηση της συσκευής έτσι ώστε να εξαλειφθούν τυχόν σφάλματα.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the mechanical response of bilayered materials based on the structure of graphene, as well as the designing of a suitable three point bending model in two directions.

The test samples were prepared by specific methods, such as micromechanical peeling and chemical deposition of CVD vapors, as well as microwave synthesis and rapid cooling. These samples were provided to us by the Institute of Chemical Engineering (FORTH/ICE).

First, in the present paper the optical, mechanical, electrical and thermal properties were analyzed for the following materials: a) Graphene, b) Molybdenum Disulfide MoS_2 , c) Tungsten Disulfide WS_2 . In addition, their use in applications of technological interest was reported.

Secondly, in the course we referred to the characterization and interpretation of the Raman phenomenon, as well as to the electron microscopes, scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and the microscope of atomic forces (AFM).

Thirdly, we mentioned to the behavior of two-dimensional materials and presented the new experimental device, which succeeded the existing, for axial stress of two-dimensional crystals. We proceeded to a detailed description of this provision and presented its new innovations. Then, the Finite Element Method used to simulate the developed forces.

Finally, the strain gages, we proceeded to calibrate the device, so as to eliminate any fault.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>	<u>- 2 -</u>
------------------------	---------------------

<u>ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ</u>	<u>- 3 -</u>
-------------------------------	---------------------

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	<u>- 4 -</u>
------------------------	---------------------

<u>ABSTRACT</u>	<u>- 5 -</u>
------------------------	---------------------

<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</u>	<u>- 12 -</u>
------------------------------------	----------------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΡΑΦΕΝΙΟ

1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΓΡΑΦΕΝΙΟ	2
1.2	ΓΡΑΦΕΝΙΚΗ ΔΟΜΗ	3
1.3	ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ	5
1.3.1	ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΑΧΕΙΑ ΨΥΞΗ	6
1.3.2	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ (CHEMICAL VAPOR DEPOSITION, CVD)	6
1.4	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ	8
1.4.1	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	8
1.4.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	10
1.4.3	ΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	11
1.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ	12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΣΟΥΛΦΙΔΙΟ ΤΟΥ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟΥ

2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ MoS_2.	14
2.2	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΜΟΝΟΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ MoS_2.	14
2.3	ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ MoS_2.	17
2.3.1	ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ.	17
2.3.2	ΧΗΜΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΩΝ CVD	18
2.4	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ MoS_2	19
2.4.1	ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.	19
2.4.2	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.	20
2.4.3	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	21
2.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 2D-MoS_2 ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΣΟΥΛΦΙΔΙΟ ΤΟΥ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ WS_2.	23
3.2	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ WS_2.	24
3.3	ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ WS_2.	25
3.4	ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ WS_2.	26
3.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ WS_2.	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

RAMAN

4.1	ΣΚΕΔΑΣΗ RAMAN ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ.	28
4.1.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ RAMAN ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ.	29
4.1.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ RAMAN MoS_2 .	31
4.1.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ RAMAN WS_2 .	32
4.2	ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ.	32
4.3	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ.	33
4.4	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ SEM.	34
4.5	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ TEM.	37
4.6	ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ (AFM)	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ 2D ΥΛΙΚΩΝ

5.1	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΥΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ.	42
5.1.1.	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ, MoS_2 , WS_2 .	42
5.2	ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΜΨΗΣ	47
5.2.1	ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

6.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΔΙ-ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ.	52
6.2	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.	52
6.2.1	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΝΕΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.	52
6.2.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΡΜΜΑΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑΥΡΟΥ.	63
6.2.3	ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.	64
6.3	STRAIN GAGES	66
6.3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ STRAIN GAGES	66
6.3.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ STRAIN GAGE	66
6.3.3	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕ STRAIN GAGES	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
------------	---------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	74
------------	------------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

10.1 ΚΩΔΙΚΑΣ GCODE

78

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήμα 1.1: Γραφτιτικές Δομές. (1)	2
Σχήμα 1.2: Η δομή του γραφενίου και τα μοναδιαία διανύσματα της μοναδιαίας κυψελίδας. (3) ...	4
Σχήμα 1.3: Ζώνη brillouin του γραφενίου.(3)	5
Σχήμα 1.4: Μέθοδος μηχανικής αποφλοίωσης με scotch tape. (3)	6
Σχήμα 1.5: Μέθοδος CVD. (8).....	8
Σχήμα 1.6: Μέτρηση μηχανικών ιδιοτήτων γραφενίου με χρήση AFM.(10)	9
Σχήμα 1.7: Ηλεκτρονική δομή γραφενίου και ο κώνος Dirac.(12)	11
Σχήμα 1.8: Παγκόσμια αγορά γραφενίου. (14)	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των τεσσάρων διαφορετικών δομών του MoS ₂ . (16).....	15
Σχήμα 2.2: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών του MoS ₂ ως συνάρτηση του αριθμού των φύλλων (N) που απαρτίζουν τον κρύσταλλο. (α) συμπαγής κρύσταλλος MoS ₂ , (β) N = 8, (γ) N = 6, (δ) N = 4, (ε) N = 2, (στ) μονοστρωματικό MoS ₂ . (Οι οριζόντιες εστιγμένες γραμμές δείχνουν την στάθμη Fermi. Τα βέλη δείχνουν το ενεργειακό χάσμα ενώ η ζώνη αγωγιμότητας απεικονίζεται με πράσινο χρώμα.) (15).....	16
Σχήμα 2.3: Κρυσταλλική δομή MoS ₂ σε bulk(πάνω) και σε monolayer (κάτω). (18)	17
Σχήμα 2.4: Μεταβολές ηλεκτρονικής δομής του MoS ₂ σε σχέση με το πάχος του(layers). (15)	19
Σχήμα 2.5: Μέτρηση μηχανικών ιδιοτήτων MoS ₂ . (α) Τοπογραφία AFM ενός ολιγοστρωματικού (N = 5–7) κρυστάλλου MoS ₂ πάνω σε διάτρητο υπόστρωμα Si/SiO ₂ . Η διάμετρος των οπών είναι 1.1 μm. Στο ένθετο παρουσιάζεται το τοπογραφικό προφίλ κατά μήκος της εστιγμένης λευκής γραμμής. (β) Σχηματική απεικόνιση του πειράματος κάμψης (γ) Καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης για μεμβράνες διαφορετικού πάχους.(15)	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 3.1:Το Δισουλφίδιο του βολφραμίου. (20)	23
Σχήμα 3.2: Δομή του WS ₂ . (20).....	24
Σχήμα 3.3: Παραγωγή με την μέθοδο CVD. (20)	25
Σχήμα 3.4: Λόγος τριβής WS ₂ σε σχέση με το MoS ₂ και το G σε συγκεκριμένες πιέσεις.(22)	26
Σχήμα 3.5:Στρώση WS ₂ . (20)	26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4.1: Τυπικό φάσμα σκέδασης Raman, στο οποίο φαίνονται η ζώνη ελαστικής σκέδασης (Rayleigh) και οι ζώνες μη-ελαστικής σκέδασης (Stokes και Anti-Stokes). (24)	29
Σχήμα 4.2: Απεικόνιση χαρακτηριστικής καμπύλης Raman Graphene για ένα layers. (25)	30
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών Raman.....	31
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών Raman MoS ₂ . (15)	31
Σχήμα 4.5: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών Raman WS ₂ .(26)	32
Σχήμα 4.6: Οπτικό μικροσκόπιο. (23).....	33
Σχήμα 4.7: Σχηματική απεικόνιση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (28)	35
Σχήμα 4.8: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης σε πραγματική κλίμακα.(29)	36
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα με τα βασικά μέρη του TEM. (28)	38
Σχήμα 4.10: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης σε πραγματική κλίμακα.(30).....	39
Σχήμα 4.11: Αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή εκτροπής δέσμης.(5)	40
Σχήμα 4.12: Απεικόνιση επιφάνειας φύλλου μονοατομικού γραφενίου με κυματώσεις με την χρήση AFM.(5).....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχήμα 5.1: Γραφένιο και Εξαγωνικό του Πλέγμα. (24).....	42
Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστικές κορυφές γραφενίου. (24)	44
Σχήμα 5.3: Η μεταβολή της χαρακτηριστικής κορυφής 2D του γραφενίου καθώς και η επιβαλλόμενη εφελκυστική παραμόρφωση αυξάνεται. (24)	45
Σχήμα 5.4: α)Εξέλιξη των φασμάτων Ramanγια το MoS ₂ ως συνάρτηση του αριθμού των στρωμάτων, β) Μεταβολή του Δω ως συνάρτηση του αριθμού των στρωμάτων, γ) Χαρτογράφηση του κρυστάλλου ως προς το Δω. (24)	46
Σχήμα 5.5: α)Εξέλιξη των φασμάτων του Ramanγια το WS ₂ ως συνάρτηση του αριθμού των στρωμάτων, β)Η κορυφή Raman, γ)Μεταβολή του Δω και της διαφοράς ως προς τον αριθμό των στρωμάτων, δ) Χαρτογράφημα του Δω.(31).....	47
Σχήμα 5.6: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου της μονής πάκτωσης (3)	48
Σχήμα 5.7: Απεικόνιση πακτωμένης δοκού κατά την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων της μεμβράνης. (3)	49
Σχήμα 5.8: Πρόδρομη συσκευή εν ώρα λειτουργίας κάτω από το μικροσκόπιο Raman.....	50
Σχήμα 5.9: Σχηματική παράσταση διάταξης κάμψης τεσσάρων σημείων σε δύο διευθύνσεις για την επιβολή διαξονικών παραμορφώσεων. (4)	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

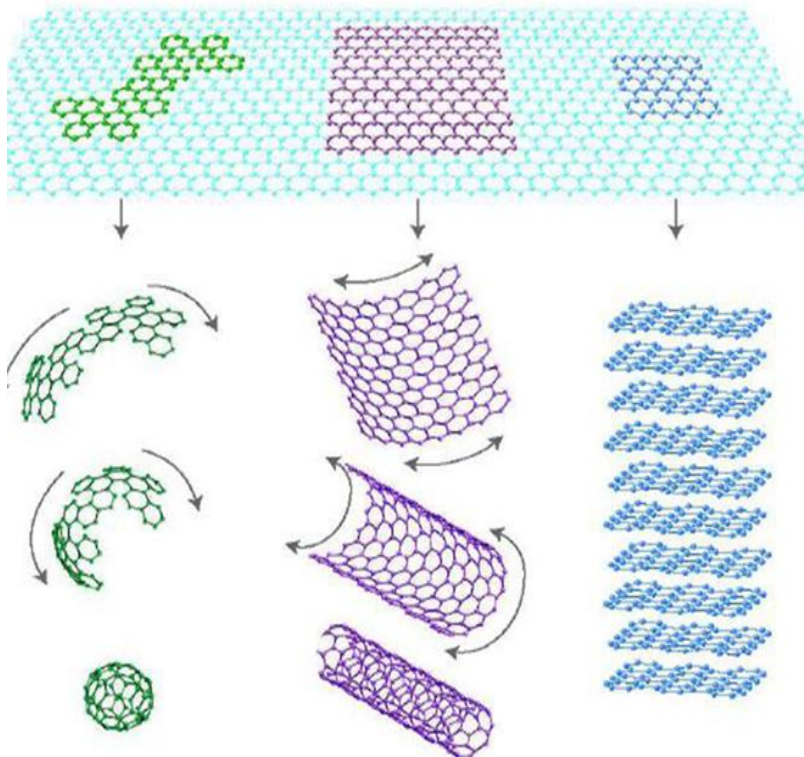
Σχήμα 6.1: Κατασκευή βάσης με την χρήση του προγράμματος SolidWorks.....	53
Σχήμα 6.2: Κάτοψη Βάσης	54
Σχήμα 6.3: Πρόοψη Βάσης.....	54
Σχήμα 6.4: Κατασκευή πολυμερικού εξαρτήματος σχήματος σταυρού με την χρήση του προγράμματος SolidWorks	55
Σχήμα 6.5: Κατασκευή πυρών συγκράτησης του πολυμερικού εξαρτήματος με την χρήση προγράμματος SolidWorks. (4 στο σύνολο).....	55
Σχήμα 6.6: Τελική συναρμολόγηση (assembly) διάταξης.....	56
Σχήμα 6.7: Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικού βάσης.	56
Σχήμα 6.8: Καθαρισμός προσώπου προπλάσματος (SolidCam).	57
Σχήμα 6.9: Αρχικό στάδιο κοπής της βάσης με χρήση εργαλειομηχανής CNC.	58
Σχήμα 6.10: Κοπή εσωτερικού βάσης (SolidCam).	59
Σχήμα 6.11: Ενδιάμεση φάση κοπής της βάσης.	60
Σχήμα 6.12: Κοπή ροζετών (SolidCam).....	61
Σχήμα 6.13: Διάτρηση εσωτερικής οπής (SolidCam).	61
Σχήμα 6.14: Τελική διαδικασία κοπής βάσης (SolidCam).....	62
Σχήμα 6.15: Τελικό στάδιο διαμόρφωσης της βάσης.....	63
Σχήμα 6.16: Πολυμερικό εξάρτημα σταυρού.....	63
Σχήμα 6.17: Θέση του πολυμερικού εξαρτήματος σε σχέση με την βάση.....	64
Σχήμα 6.18: Μικρόμετρο που ενσωματώθηκε, σχεδιασμένο στο πρόγραμμα SolidWorks.	65
Σχήμα 6.19: Απεικόνιση διατομής του strain gage.(32).....	67
Σχήμα 6.20: Απεικόνιση δομής μεταλλικού φύλλου strain gage.(32)	68
Σχήμα 6.21: Strain Gage τύπου D16.(32).....	68
Σχήμα 6.22: Μετρήσεις τάσεων όταν είναι τοποθετημένο ένα PCB.(32)	69
Σχήμα 6.23: Εικονική αναπαράσταση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και απεικόνιση της έντασης των καταπονήσεων.	70
Σχήμα 6.24: Εικονική αναπαράσταση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και απεικόνιση της έντασης των καταπονήσεων(σε N/m^2).	71
Σχήμα 6.25: Εικονική αναπαράσταση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και απεικόνιση της μετατόπισης	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΓΡΑΦΕΝΙΟ

1.1 Εισαγωγή στο Γραφένιο

Το γραφένιο είναι ένας δισδιάστατος κρύσταλλος που αποτελείται από άτομα άνθρακα διατεταγμένα σε εξαγωνική δομή, μονοατομικού πάχους μόλις 0.335nm. Η οικοδόμηση νανοϋλικών με βάση τον άνθρακα στηρίζονται στο γραφένιο. Το Σχήμα 1.1 δείχνει τις γραφιτικές δομές. Μπορεί να τυλιχτεί και να σχηματίσει νανοσωλήνες άνθρακα, ενώ αν στοιβαχτούν πολλά φύλλα γραφενίου σχηματίζουν την δομή του γραφίτη.



Σχήμα 1.1: Γραφιτικές Δομές. (1)

Μία μικρή αναδρομή στην ύπαρξη του γραφενίου, ξεκινάει από το 1987 όπου εμφανίστηκε για πρώτη φορά. Ενώ το 2004 έγινε ένα σημαντικό βήμα εξέλιξης του γραφενίου όταν δύο επιστήμονες του Manchester ο Andre Geim και ο Konstantin Novoselov (2) επέτυχαν να απομονώσουν αυτόνομα φύλλα γραφενίου από ακατέργαστο γραφίτη με μια διαδικασία που ονομάζεται μέθοδος μηχανικής αποφλοίωσης, με την χρήση κολλητικής ταινίας μεταφέροντας τα φύλλα αυτά πάνω σε δίσκο πυριτίου (2). Είναι ο πρώτος δισδιάστατος κρύσταλλος που απομονώθηκε το γραφένιο. Αυτή η ανακάλυψη είναι τεράστιας σημασίας διότι έως τότε οι επιστήμονες υποστήριζαν ότι ένας δισδιάστατος κρύσταλλος είναι θερμοδυναμικά ασταθής και δεν μπορεί να υπάρξει στην φύση. Από εκεί και πέρα η εξάπλωση του ήταν ραγδαία σε όλους τους κλάδους των θετικών επιστημών.

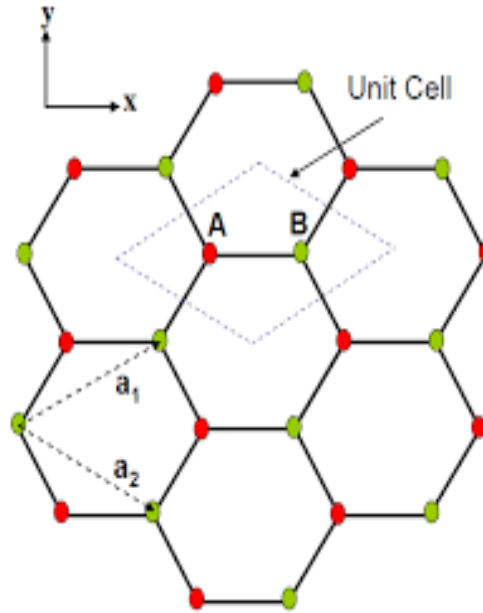
1.2 Γραφενική δομή

Το γραφένιο όπως προαναφέραμε είναι μια αλλοτροπική μορφή άνθρακα, τα άτομα του πλέγματος του οποίου διατάσσονται σε εξαγωνική δομή. Στο πλέγμα αυτό εμφανίζονται εσωτερικές κυματώσεις μερικών nm, οι οποίες προσδίδουν σταθερότητα στον δισδιάστατο κρύσταλλο. Η μοναδιαία κυψελίδα του γραφενίου περιλαμβάνει δύο άτομα άνθρακα (A και B) τα οποία δεν είναι ισοδύναμα μεταξύ τους και περιγράφεται από τα μοναδιαία διανύσματα a_1 και a_2 (σχήμα 1.2)(3):

$$\begin{matrix} - & - \\ & \end{matrix} \quad [1]$$

και,

$$\begin{matrix} - & - \\ & \end{matrix} \quad [2]$$



Σχήμα 1.2: Η δομή του γραφενίου και τα μοναδιαία διανύσματα της μοναδιαίας κυψελίδας. (3)

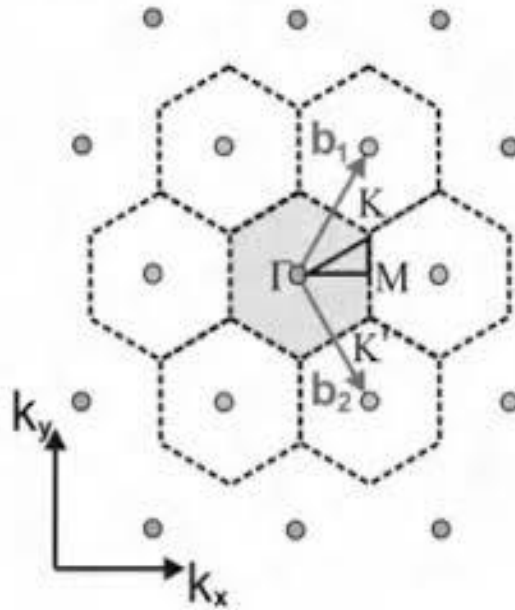
Όπου a , η απόσταση μεταξύ των ανθρακικών ατόμων A και B. Αναγκαία είναι και η μελέτη του πλέγματος του γραφενίου στον αντίστροφο χώρο (σχήμα 1.3), τα διανύσματα του οποίου b_1 και b_2 δίνονται από τις σχέσεις [1] :

$$b_1 = \frac{1}{a} \hat{x}$$

και,

$$b_2 = \frac{1}{a} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{x} + \hat{y} \right) \quad [4]$$

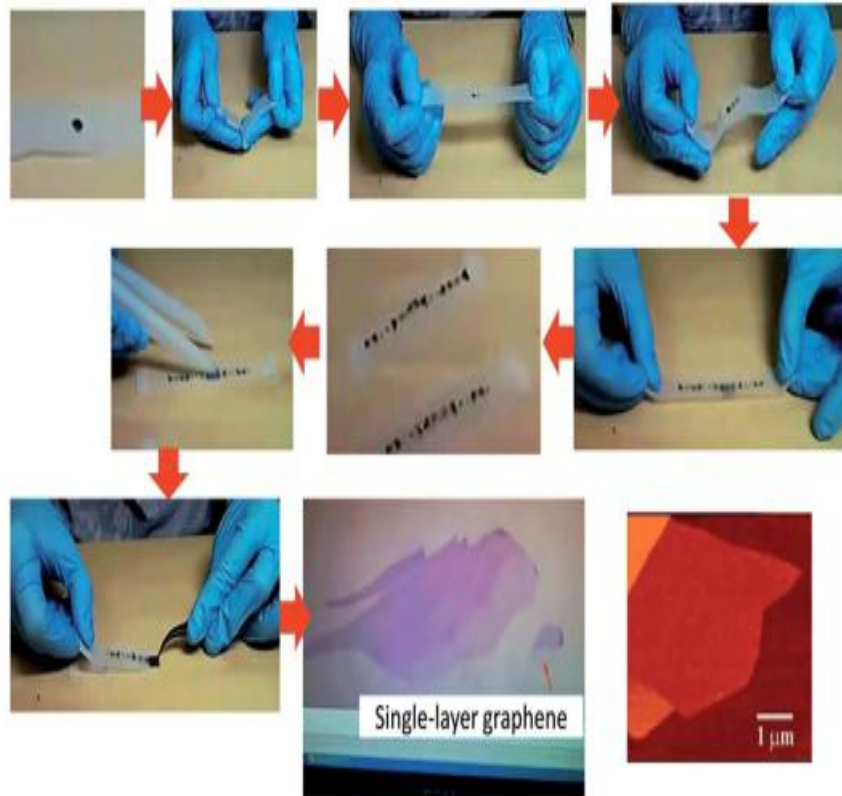
Όπου Γ (κέντρο της ζώνης), K (γωνία της ζώνης) και το M (άκρο της ζώνης).



Σχήμα 1.3: Ζώνη *brillouin* του γραφενίου.(3)

1.3 Παρασκευή γραφενίου

Οι μοναδικές και αξιοσημείωτες ιδιότητες που εμφανίζει το γραφένιο είχαν ως αποτέλεσμα την καταβολή τεράστιων προσπαθειών για την παρασκευή του με διάφορες τεχνικές. Η πιο απλή μέθοδος είναι αυτή της μηχανικής αποφλοιώσης του γραφίτη (σχήμα 1.4). Η μέθοδος αυτή παράγει εξαιρετικής ποιότητας και διαστάσεων εκατοντάδων χιλιάδων τετραγωνικών μικρομέτρων. Υστερεί όμως σημαντικά διότι είναι μια μέθοδος η οποία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μαζική παραγωγή. Για να μπορέσει το γραφένιο να γίνει εμπορικά εκμεταλλεύσιμο και να αναπτυχθούν νέες εφαρμογές του, είναι απαραίτητο να υπάρξει μαζική παραγωγή. Μέχρι στιγμής όμως ουδεμία μέθοδος έχει καταφέρει να παράξει κρυστάλλους ισάξιας ποιότητας με αυτούς που παράγονται από μηχανική αποφλοιώση. Ωστόσο υπάρχουν διάφορες μέθοδοι τις οποίες τις χρησιμοποιούμε για μαζική παραγωγή, ορισμένες από αυτές θα αναφερθούν παρακάτω (4), (5).



Σχήμα 1.4: Μέθοδος μηχανικής αποφλοιώσης με scotch tape. (3)

1.3.1 Σύνθεση μικροκυμάτων και ταχεία ψύξη

Η μέθοδος σύνθεσης μικροκυμάτων έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως τα υψηλά ποσοστά αντίδρασης και η πραγματοποίηση των αντιδράσεων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Σε αυτήν την μέθοδο ο γραφίτης ανθρακοποιείται με την σύνθεση μικροκυμάτων φθαλοκυανίνης (H_2Pc) σε υψηλή θερμοκρασία και έπειτα ακολουθεί διαδικασία ταχείας ψύξης. Ως αποτέλεσμα έχουμε νέες επιφάνειες γραφίτη που παράγονται μέσω γειτονικού άνθρακα. Οι μορφές γραφενίου που λαμβάνουμε είναι B8 και B4. Η συνολική διαδικασία διαρκεί λιγότερο από μισή ώρα(6).

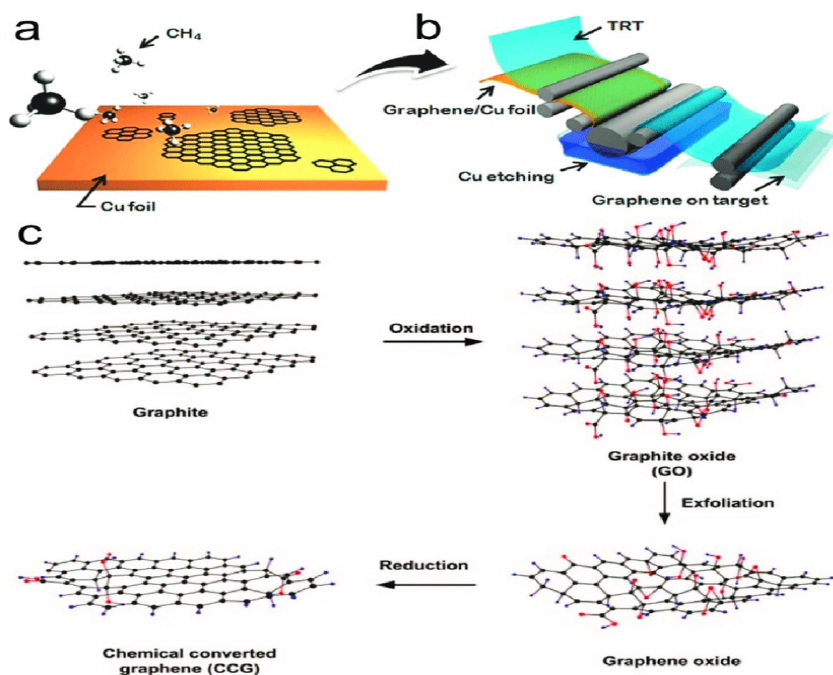
1.3.2 Η μέθοδος της Χημικής Εναπόθεσης Ατμών (Chemical Vapor Deposition, CVD)

Η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) είναι μία χημική διεργασία η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλής ποιότητας και απόδοσης στερεά υλικά σε μορφή κυρίως λεπτών υμένων. Στην πιο απλή μορφή της η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την ροή ενός αρχικού (πρόδρομου) αερίου ή αερίων μέσα σε ένα κλίβανο, που περιέχει ένα ή περισσότερα θερμά υποστρώματα στα οποία θα γίνει επικάλυψη με το παραγόμενο υλικό. Πάνω και κοντά στις θερμές επιφάνειες των υποστρωμάτων πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την εναπόθεση ενός λεπτού υμένα.

Οι αντιδράσεις συνοδεύονται από χημικά παραπροϊόντα τα οποία απωθούνται εκτός του κλιβάνου μαζί με τα μη-αντιδρώντα πρόδρομα αέρια. Η διαδικασία ακολουθεί τα εξής βήματα που ακολουθούν. Αρχικά, το υπόστρωμα χαλκού τοποθετείται σε σωλήνα Quartz μαζί με υδρογόνο σε θερμοκρασία 10000°C και πίεση 40mTorr (συνθήκες κενού). Στη συνέχεια, σταθεροποιείται το υπόστρωμα στη παραπάνω θερμοκρασία και προσθέτονται 35sccm (standard cubic centimeters per minute) μεθανίου CH₄ για μικρό χρονικό διάστημα σε συνολική πίεση 50mTorr.

Η διάσπαση του μεθανίου δίνει άτομα άνθρακα που αλληλεπιδρούν με το μεταλλικό υπόστρωμα και σχηματίζουν το γραφένιο. Ακολουθεί ψύξη και έτσι, στο φύλλο του χαλκού έχει εναποτεθεί γραφένιο, το οποίο μπορεί να μεταφερθεί σε άλλο υπόστρωμα. Με την μέθοδο αυτή παράγονται πλέον ομοιόμορφοι μονοατομικοί κρύσταλλοι γραφενίου των οποίων το μέγεθος μπορεί να φθάσει και τετραγωνικά μέτρα.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι τα δείγματα παρουσιάζουν ατέλειες και εγκλείσματα μη μονοατομικών κρυστάλλων. Επίσης το κόστος της διαδικασίας είναι τεράστιο διότι απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας(7).



Σχήμα 1.5: Μέθοδος CVD. (8)

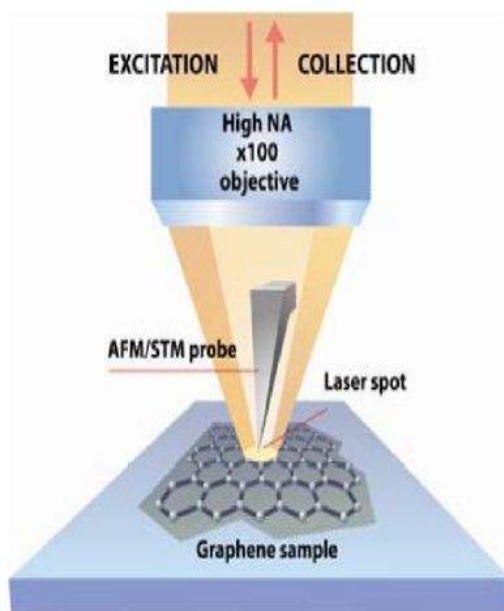
1.4 Ιδιότητες γραφενίου

Ο πλουραλισμός των ιδιοτήτων που κατέχει το γραφένιο, το καθιστά το κατ' εξοχήν πολυλειτουργικό υλικό του αιώνα που διανύουμε. Οι ιδιότητες αυτές δεν εμφανίζονται σε άλλα υλικά, σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα οι τιμές αυτών, φθάνουν και ξεπερνούν τις θεωρητικές εκτιμήσεις (7). Μερικές από τις ιδιότητες αυτές είναι, το υψηλό μέτρο ελαστικότητας, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα, η υψηλή μετάδοση ρεύματος και η χημική αδράνεια.

1.4.1 Μηχανικές ιδιότητες

Μια άλλη ξεχωριστή ιδιότητα του γραφενίου είναι η εγγενής ισχύς του. Εξαιτίας των ισχυρών δυνάμεων των δεσμών μεταξύ των ατόμων άνθρακα, το γραφένιο είναι το ισχυρότερο υλικό που έχει ποτέ ανακαλυφθεί, με τελική αντοχή σε εφελκυσμό $130 \cdot 10^9 \text{Pa}$ (ή 130GPa), σε σύγκριση με 400MPa για το δομικό χάλυβα A36 ή 375.7MPa για το Aramid (Kevlar). Το γραφένιο δεν

αποτελεί μόνο ένα εξαιρετικά ισχυρό υλικό, πρόκειται επίσης και για ένα πολύ ελαφρύ υλικό με βάρος μόνο 0.77mg ανά τετραγωνικό μέτρο (για λόγους σύγκρισης, 1 τετραγωνικό μέτρο χαρτιού είναι περίπου 1000 φορές βαρύτερο). Ένα μόνο φύλλο γραφενίου (πάχους 1 ατόμου) το οποίο θα ζυγίζει κάτω από 1 γραμμάριο, θεωρείται ικανό να καλύψει ολόκληρο γήπεδο ποδοσφαίρου. Αυτό που καθιστά το γραφένιο ιδιαίτερα ξεχωριστό είναι ότι περιέχει ελαστικές ιδιότητες, διατηρώντας το αρχικό του μέγεθος μετά από την υποβολή κάποιας δύναμης ή τάσης σε αυτό. Το 2007, διεξήχθησαν δοκιμές μικροσκοπικών δυνάμεων (AFM) σε φύλλα γραφενίου προσροφημένα σε κοιλότητες διοξειδίου του πυριτίου. Αυτές οι δοκιμές έδειξαν ότι τα φύλλα του γραφενίου (με πάχος μεταξύ 2 και 8 nm) είχαν σταθερές ελαστικότητας στην περιοχή 1-5 N/m και συντελεστή Young (διαφορετικό από αυτό του τρισδιάστατου γραφίτη) 0.5 TPa. Τα έξοχα αυτά χαρακτηριστικά βασίζονται σε θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιούν το γραφένιο χωρίς καθόλου ατέλειες, το οποίο σήμερα είναι πολύ ακριβό και δύσκολο να αναπαραχθεί τεχνητά.(9)



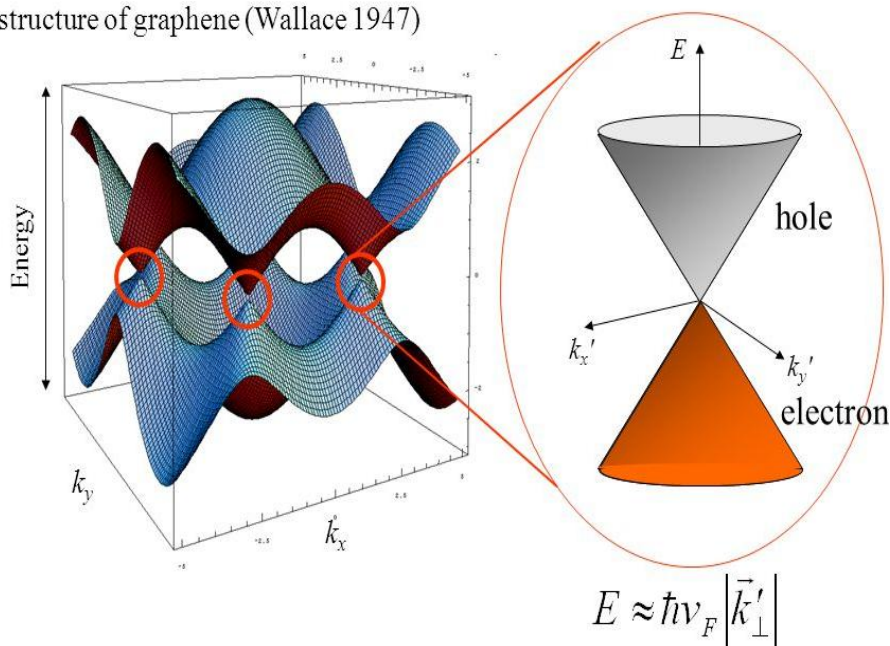
Σχήμα 1.6: Μέτρηση μηχανικών ιδιοτήτων γραφενίου με χρήση AFM.(10)

1.4.2 Ηλεκτρικές ιδιότητες

Το γραφένιο είναι ένα υλικό με πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ο άνθρακας αποτελείται από έξι ηλεκτρόνια, εκ των οποίων τα δύο είναι στο εσωτερικό κέλυφος και τα τέσσερα βρίσκονται στο εξωτερικό κέλυφος. Τα τέσσερα εξωτερικά ηλεκτρόνια είναι διαθέσιμα για την χημική σύνθεση, αλλά στο γραφένιο κάθε άτομο άνθρακα είναι άμεσα συνδεδεμένο με τρία άλλα άτομα άνθρακα στο δυσδιάστατο επίπεδο, και το τελευταίο άτομο από τα τέσσερα που περισσεύει είναι ελεύθερο και κινείται στην τρίτη διάσταση προσδίδοντας μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτά τα τόσο κινητικά ηλεκτρόνια ονομάζονται ρ (π) ηλεκτρόνια και εδράζονται πάνω και κάτω από το φύλλο του γραφενίου. Αυτά τα ηλεκτρόνια συμμετέχουν στην ενίσχυση των δεσμών άνθρακα. Η ηλεκτρονιακή του ευκινησία (mobility) μ με βάση ορισμένες δοκιμές είναι πάνω από $15.000 \cdot 10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ και θεωρητικά σε θερμοκρασία δωματίου είναι $2,5 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Επίσης το γραφένιο είναι ένας ημιαγωγός μηδενικού ενεργειακού χάσματος διότι η ζώνη σθένους και αγωγιμότητας συμπίπτουν στα σημεία Dirac(11).

Graphene : Dirac Particles in 2-dimension

Band structure of graphene (Wallace 1947)



Zero effective mass particles moving with a constant speed v_F

Σχήμα 1.7: Ηλεκτρονική δομή γραφενίου και ο κώνος Dirac.(12)

1.4.3 Οπτικές και θερμικές ιδιότητες

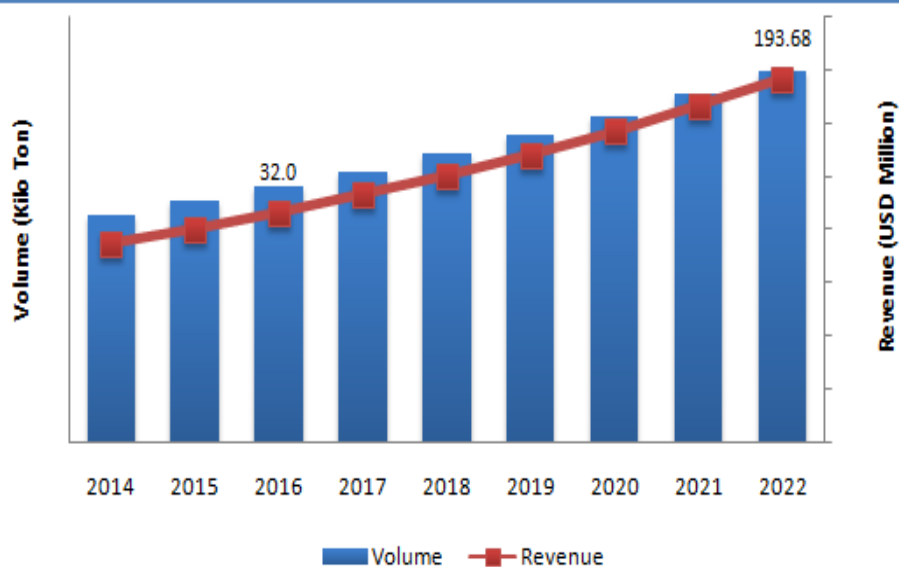
Επίσης μια σημαντική ιδιότητα του γραφενίου είναι η ικανότητα του να απορροφά ένα μεγάλο ποσοστό λευκού φωτός περίπου 2,3 %, εάν συμπεριλάβει κανείς ότι το πάχος που διαθέτει είναι της τάξης του ενός ατόμου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις προαναφερθείσες ηλεκτρονικές του ιδιότητες, δηλαδή στο ότι τα ηλεκτρόνια λειτουργούν σαν φορείς φορτίου με πολύ υψηλή κινητικότητα. Πριν από μερικά χρόνια, αποδείχθηκε ότι η ποσότητα του λευκού φωτός που απορροφάται βασίζεται στη σταθερότητα της δομής του (11). Τώρα όσο για τις θερμικές ιδιότητές του, πειράματα τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία δωματίου μας έδειξαν ότι η θερμική αγωγιμότητα του γραφενίου είναι περίπου $k = 5300 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [5] έτσι προκύπτει σαν συμπέρασμα ότι το γραφένιο διαθέτει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και ότι πρόκειται για ένα καλό υποψήφιο για εφαρμογές σε

ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς η υψηλή θερμική αγωγιμότητα διευκολύνει τη διάχυση της θερμότητας στις επαφές και επιτρέπει την κατασκευή πιο συμπαγών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

1.5 Εφαρμογές γραφενίου

Όπως ήδη αναφέραμε το γραφένιο είναι το πιο σκληρό υλικό το οποίο υπάρχει αυτή την στιγμή στον κόσμο, για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται για να προσδίδει σκληρότητα και σε άλλα υλικά. Έρευνες έδειξαν ότι η ενίσχυση ορισμένων υλικών όπως τα πλαστικά και τα μέταλλα, με γραφένιο τα κάνει αρκετά πιο σκληρά και πιο ελαφριά. Έτσι το γραφένιο μπορεί να βρει εφαρμογές στην αεροδιαστημική, στα δομικά υλικά, σε συσκευές τηλεφώνων και σε άλλα πολλά. Το γραφένιο χρησιμοποιείται επίσης για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή είναι το πιο λεπτό υλικό στον κόσμο, με την μεγαλύτερη αναλογία επιφάνειας προς τον όγκο, το καθιστά πολλά υποσχόμενο υλικό για χρησιμοποίηση σε μπαταρίες. Με πολλές καλές ιδιότητες όπως η μεγαλύτερη χωρητικότητα, η γρηγορότερη φόρτιση, το μικρότερο βάρος, η ευκαμψία και το μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας. Ευρεία εφαρμογή βρίσκουμε επίσης στις θερμικές εφαρμογές, διότι είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα πολλά μέρη των ηλεκτρονικών τους είναι από γραφένιο (13). Παρακάτω θα δούμε ένα διάγραμμα το οποίο αντικατοπτρίζει πλήρως την ραγδαία αύξηση της χρησιμοποίησης του γραφενίου.

Global Graphene Market, 2014 - 2022 (Kilo Tons) (USD Million)



Source: Zion Market Research 2017

Σχήμα 1.8: Παγκόσμια αγορά γραφενίου. (14)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΔΙΣΟΥΛΦΙΔΙΟ ΤΟΥ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟΥ

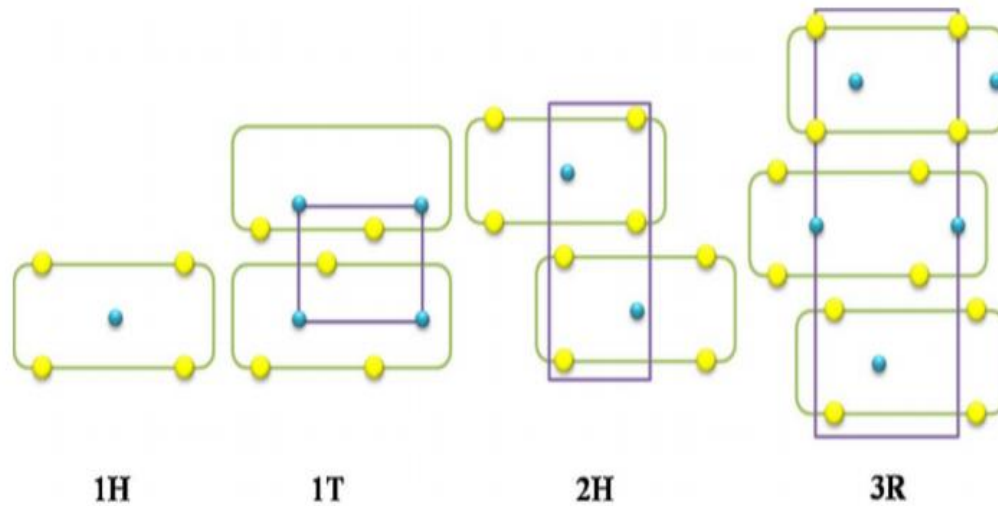
2.1 Εισαγωγή στο MoS_2 .

Το MoS_2 είναι ένα ασημένιο μαύρο στερεό που εμφανίζεται ως μια εξελιγμένη μορφή του γραφενίου. Πρόκειται για ένα υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες. Το δισουλφίδιο του μολυβδαινίου (MoS_2) είναι ένα ημιαγώγιμο TMD (Transition Metal Dichalcogenides). Τα TMDs εμφανίζουν πολυμορφία με τις διάφορες πολυμορφικές δομές να διαφέρουν τόσο ως προς τον τρόπο στοίβαξης των φύλλων, όσο και της σύνταξης των ατόμων. Πρόκειται ίσως για το πιο καλά μελετημένο TMD αφού έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπως στην υδροαποθείωση προϊόντων πετρελαίου, σε φωτοβολταϊκά κελιά, φωτοκατάλυση, νανοτριβολογία, μπαταρίες λιθίου καθώς και ξηρά λίπανση. (15)

2.2 Ηλεκτρονιακή δομή του μονοστρωματικού MoS_2 .

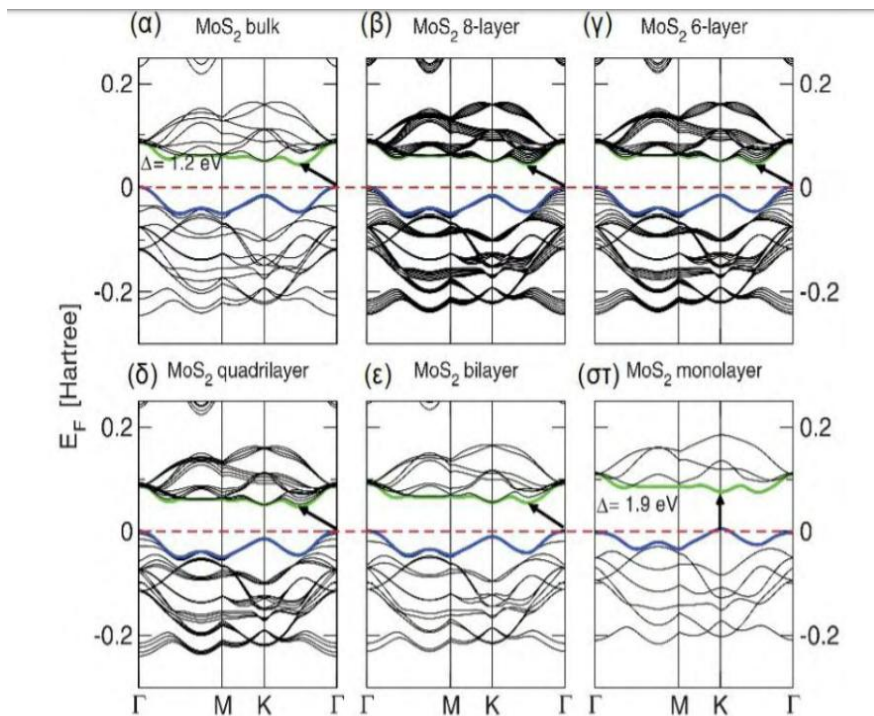
Το δισουλφίδιο του μολυβδαινίου (MoS_2) θα λέγαμε ότι είναι ένας κρύσταλλος που αποτελείται από ασθενώς συζευγμένα στρώματα S-Mo-S στα οποία ένα μοριακό στρώμα Mo είναι τοποθετημένο μεταξύ των δύο στρωμάτων ατόμων S. Αυτή τη στιγμή έχουν βρεθεί τέσσερις πολύ-τύποι δομών. Κατά σειρά αυτοί είναι οι εξής:

- 1T- MoS_2
- 1H- MoS_2
- 2H- MoS_2
- 3R- MoS_2



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των τεσσάρων διαφορετικών δομών του MoS_2 . (16)

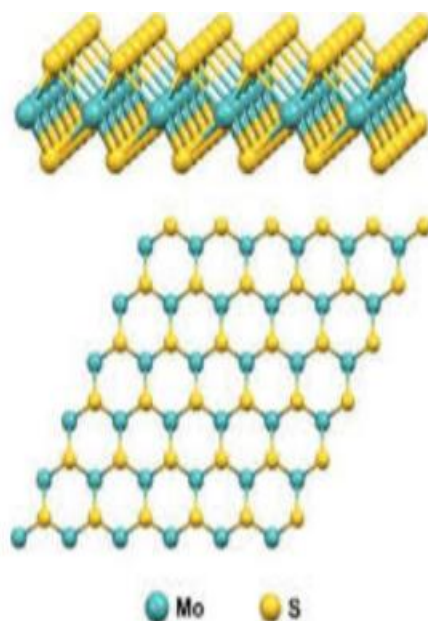
Υπάρχουν διαγράμματα ενεργειακών ζωνών του MoS_2 συναρτήσει του αριθμού των στρώσεων που απαρτίζουν τον κρύσταλλο, όπως αυτά υπολογίστηκαν με μεθόδους από πρώτες αρχές. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται σχηματικά τα διαγράμματα αυτά.



Σχήμα 2.2: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών του MoS_2 ως συνάρτηση του αριθμού των φύλλων (N) που απαρτίζουν τον κρύσταλλο. (α) συμπαγής κρύσταλλος MoS_2 , (β) $N = 8$, (γ) $N = 6$, (δ) $N = 4$, (ε) $N = 2$, (στ) μονοστρωματικό MoS_2 . (Οι οριζόντιες εστιγμένες γραμμές δείχνουν την στάθμη Fermi. Τα βέλη δείχνουν το ενεργειακό χάσμα ενώ η ζώνη αγωγιμότητας απεικονίζεται με πράσινο χρώμα.) (15)

Παρατηρείται ότι το συμπαγές MoS_2 , κατέχει ένα έμμεσο ενεργειακό χάσμα εύρους ~ 1.2 eV, με το μέγιστο της ζώνης σθένους να βρίσκεται στο Γ σημείο και το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας στο μέσο περίπου της ΓΚ διεύθυνσης της BZ. Παράλληλα υπάρχει μία άμεση μετάβαση στο K σημείο της BZ, με εύρος ~ 1.9 eV. Καθώς ο αριθμός των στρώσεων μειώνεται, το έμμεσο χάσμα αυξάνει. Παράλληλα, η άμεση μετάβαση στο K σημείο παραμένει πρακτικά αμετάβλητη στα 1.9 eV, είναι δηλαδή ανεξάρτητη του πάχους του κρυστάλλου. Στο όριο του ενός στρώματος η έμμεση μετάβαση ξεπερνάει ενεργειακά την άμεση με αποτέλεσμα το SL- MoS_2 να μετατρέπεται σε ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού χάσματος, σε συμφωνία με διάφορες πειραματικές μελέτες. Η ιδιαίτερη αυτή εξάρτηση των ενεργειακών ζωνών του MoS_2 από τον πάχος του κρυστάλλου μπορεί να εξηγηθεί αν ληφθεί υπόψη το είδος των ηλεκτρονικών καταστάσεων που απαρτίζουν την ζώνη αγωγιμότητας και ζώνη σθένους, σημεία που παρουσιάζουν ακρότατα (15).

Υπολογιστικές μελέτες έδειξαν ότι οι ηλεκτρονικές καταστάσεις στο VBMAX γύρω από το Γ σημείο της BZ αποτελούνται από έναν συνδυασμό pz τροχιακών του S και dz² τροχιακών του Mo. Και τα δύο τροχιακά είναι απεντοπισμένα και έχουν αντιδεσμικό χαρακτήρα. Έτσι λοιπόν όταν τα φύλλα του MoS₂ απομακρύνονται η ενέργεια αυτών των καταστάσεων ελαττώνεται. Αντίθετα, οι καταστάσεις τόσο της ζώνης σθένους όσο και της ζώνης αγωγιμότητας στο K σημείο βρίσκονται εντοπισμένες εντός του στρώματος του MoS₂ και είναι στην πράξη ανεπηρέαστες από οποιαδήποτε μεταβολή της απόστασης μεταξύ των φύλλων(17).



Σχήμα 2.3: Κρυσταλλική δομή MoS₂ σε bulk(πάνω) και σε monolayer (κάτω). (18)

2.3 Τρόποι παραγωγής του MoS₂.

Για την παραγωγή των κρυστάλλων αυτών έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένοι τρόποι-μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζονται παρακάτω και αναλύονται ως προς τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

2.3.1 Μικρομηχανική αποφλοΐωση.

Για την τεχνική αυτή βραβεύτηκαν το 2010 με Nobel Φυσικής οι Andre Geim και Konstantin Novoselov(2) και στις μέρες μας επιλέγεται από διάφορες ερευνητικές ομάδες για την απομόνωση του γραφενίου. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, τοποθετείται ένας κρύσταλλος γραφίτη σε κολλητικό φιλμ, οι συγκολλητικές επιφάνειες έρχονται σε επαφή και αποκολλώνται. Το αποτέλεσμα είναι ο διαχωρισμός των στρωμάτων του γραφίτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αρκετές φορές μέχρι να μείνει γραφίτης λίγων επιπέδων στην ταινία. Αμέσως μετά το φιλμ επικολλάται σε καθαρό υπόστρωμα πυριτίου συγκεκριμένου πάχους, και μόλις περάσουν κάποια λεπτά αφαιρείται προσεκτικά. Στο οπτικό μικροσκόπιο μπορούν να διακριθούν πλέον τα γραφίτικα φύλλα, των οποίων το πάχος εκτιμάται ανάλογα με το χρώμα τους. Το πλεονέκτημά της είναι το εξαιρετικής ποιότητας γραφένιο που προκύπτει, αλλά το μειονέκτημα της ότι κανείς δεν εγγυάται ότι θα υπάρχει πάντα το επιθυμητό μονοστρωματικό υλικό.(3)

2.3.2 Χημική εναπόθεση ατμών CVD

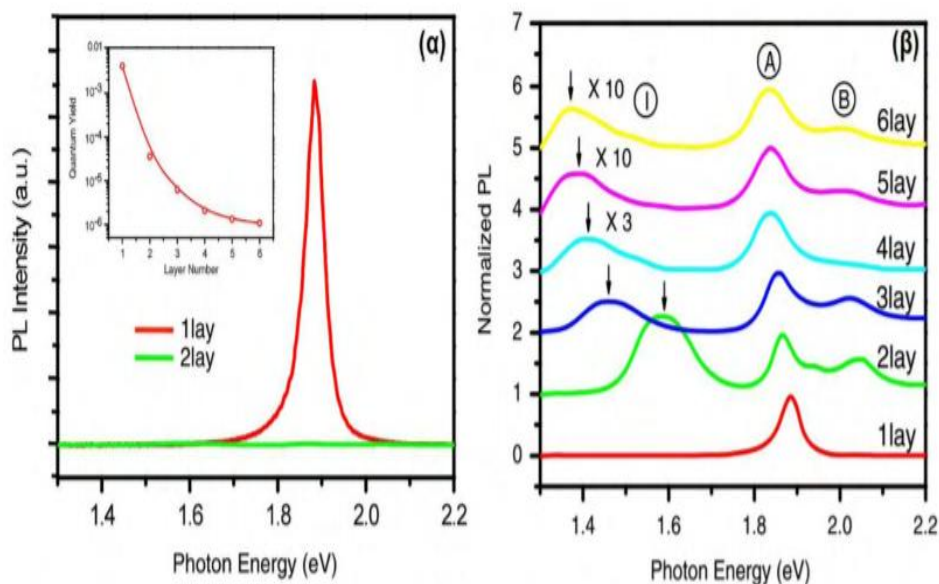
Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη και έχει ως αποτέλεσμα την παρασκευή γραφένιο ενός ή μερικών φύλλων. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα παρασκευής γραφενίου μεγάλης έκτασης. Το πιο διαδεδομένο μεταλλικό υπόστρωμα που χρησιμοποιείται είναι αυτό του πολυκρυσταλλικού χαλκού πάχους ~30μm. Βασικό πλεονέκτημα του χαλκού είναι η εύκολη μεταφορά του γραφενίου που παράχθηκε σε άλλα υποστρώματα χωρίς την αλλοίωση των κρυσταλλικών του χαρακτηριστικών. Η διαδικασία ακολουθεί τα βήματα που ακολουθούν. Αρχικά, το υπόστρωμα χαλκού τοποθετείται σε σωλήνα Quartz μαζί με υδρογόνο σε θερμοκρασία 10000°C και πίεση 40mTorr. Στη συνέχεια, σταθεροποιείται το υπόστρωμα στη παραπάνω θερμοκρασία και προστίθενται 35sccm (Standard cubic centimeters per minute) μεθανίου CH₄ για μικρό χρονικό διάστημα σε συνολική πίεση 50mTorr. Η διάσπαση του μεθανίου δίνει άτομα άνθρακα που αλληλεπιδρούν με το μεταλλικό υπόστρωμα και σχηματίζουν το γραφένιο. Ακολουθεί ψύξη και έτσι, στο φύλλο του χαλκού έχει

εναποτεθεί γραφένιο, το οποίο μπορεί να μεταφερθεί σε άλλο υπόστρωμα.
(19)

2.4 Ιδιότητες του MoS₂

2.4.1 Οπτικές ιδιότητες.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι μεταβολές που υφίσταται η ηλεκτρονική δομή του MoS₂ σε συνάρτηση με το πάχος του. Στο Σχήμα 2.4, στο σχήμα (α) παρουσιάζονται φάσματα φωτοφωταύγειας (PL) μονού (SL) και διπλού (bilayer, BL) στρώματος αιωρούμενου MoS₂ στην ενεργειακή περιοχή από 1.3 έως 2.2 eV. Συμπεραίνουμε ότι η φωτοφωταύγεια των δύο αυτών υλικών είναι εντελώς διαφορετική και ότι ανάλογα με τα layers, σχήμα (β) υπάρχει αλλαγή των κορυφών. (15)

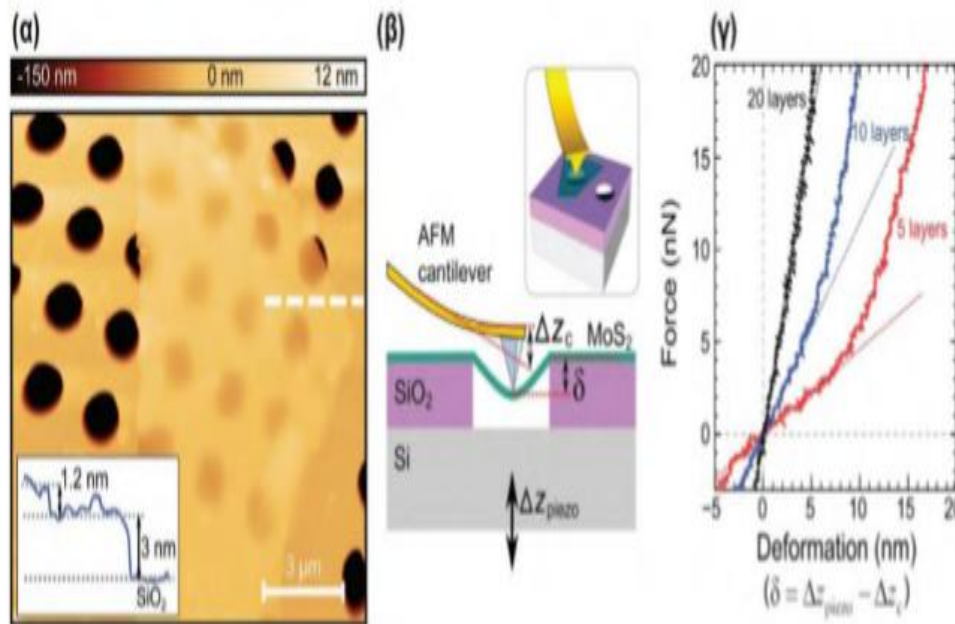


Σχήμα 2.4: Μεταβολές ηλεκτρονικής δομής του MoS₂ σε σχέση με το πάχος του(layers). (15)

2.4.2 Μηχανικές ιδιότητες.

Οι μηχανικές ιδιότητες του MoS₂ έχουν μελετηθεί σχετικά πρόσφατα [41-43]. Πειράματα νανοσκληρομέτρησης έδειξαν ότι το μονοστρωματικό MoS₂ έχει σκληρότητα ίση με $(180 \pm 60) \text{ Nm}^{-1}$, η οποία αντιστοιχεί σε ένα ενεργό μέτρο του Young ίσο με $(270 \pm 100) \text{ GPa}$. Η θραύση του υλικού λαμβάνει χώρα για παραμορφώσεις έως 11 % ενώ αντοχή θραύσης είναι στα (23GPa) . Για την πραγματοποίηση τέτοιων πειραμάτων υπέρλεπτες μεμβράνες MoS₂ τοποθετήθηκαν σε υποστρώματα Si/SiO₂ στα οποία είχαν προηγουμένως διανοιχθεί οπές διαμέτρου μερικών μm. Η σκληρομέτρηση πραγματοποιείται με τη χρήση ενός μικροσκοπίου ατομικής δύναμης (AFM). Στο Σχήμα 2.5 (α) φαίνεται μία μεμβράνη MoS₂ πάχους περίπου 5 έως 7 στρωμάτων. Η σχηματική απεικόνιση ενός τυπικού πειράματος μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων με αυτό τον τρόπο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 (β).

Εκεί βλέπουμε ότι η ακίδα ενός AFM προκαλεί την παραμόρφωση της μεμβράνης που αιωρείται πάνω από την οπή. Αυτό γίνεται διατηρώντας την ακίδα σε ένα ύψος και πλησιάζοντας το δείγμα σταδιακά προς αυτήν. Επειδή υπάρχει η δυνατότητα να καταγράφεται τόσο η απόκλιση της ακίδας (Δz_c) όσο και η κατακόρυφη θέση του δείγματος (Δz_{piezo}) γίνεται εφικτός ο υπολογισμός της παραμόρφωσης δ της μεμβράνης που είναι ίση με $\delta = \Delta z_{piezo} - \Delta z_c$. Στο Σχήμα 2.5(γ) φαίνονται καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης για μία σειρά μεμβρανών MoS₂ διαφορετικού πάχους. Τα παραπάνω δείχνουν ότι το MoS₂ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές εύκαμπτων ηλεκτρονικών όσο και ως μέσο ενίσχυσης σε νανოსύνθετα υλικά (15).



Σχήμα 2.5: Μέτρηση μηχανικών ιδιοτήτων MoS₂. (α) Τοπογραφία AFM ενός ολιγοστρωματικού (N = 5–7) κρυστάλλου MoS₂ πάνω σε διάτρητο υπόστρωμα Si/SiO₂. Η διάμετρος των οπών είναι 1.1 μm. Στο ένθετο παρουσιάζεται το τοπογραφικό προφίλ κατά μήκος της εστιγμένης λευκής γραμμής. (β) Σχηματική απεικόνιση του πειράματος κάμψης (γ) Καμπύλες δύναμης – παραμόρφωσης για μεμβράνες διαφορετικού πάχους. (15)

2.4.3 Θερμικές ιδιότητες

Καθοριστικό ρόλο στην σχεδίαση μίας ηλεκτρονικής διάταξης παίζουν οι θερμικές ιδιότητες ενός υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα του 2D-MoS₂ έχει υπάρξει αντικείμενο τόσο θεωρητικής όσο και πειραματικής μελέτης. Υπολογισμοί από πρώτες αρχές βρίσκουν την θερμική αγωγιμότητα του 2D – MoS₂ μεταξύ 23.1 και 100 Wm⁻¹K⁻¹ σε πολύ καλή συμφωνία με πειράματα σε μεμβράνες αιωρούμενου MoS₂, που την υπολογίζουν μεταξύ 30 και 84 Wm⁻¹K⁻¹. (15)

2.5 Εφαρμογές 2D-MoS₂ σε εφαρμογές τεχνολογικού ενδιαφέροντος.

Το MoS₂ παρουσιάζει σημαντική εμφάνιση σε αρκετές εφαρμογές τεχνολογικού ενδιαφέροντος. Το δισδιάστατο MoS₂ είναι ένα μηχανικά ισχυρό υλικό με αρκετά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Επίσης η αντοχή μεμβρανών

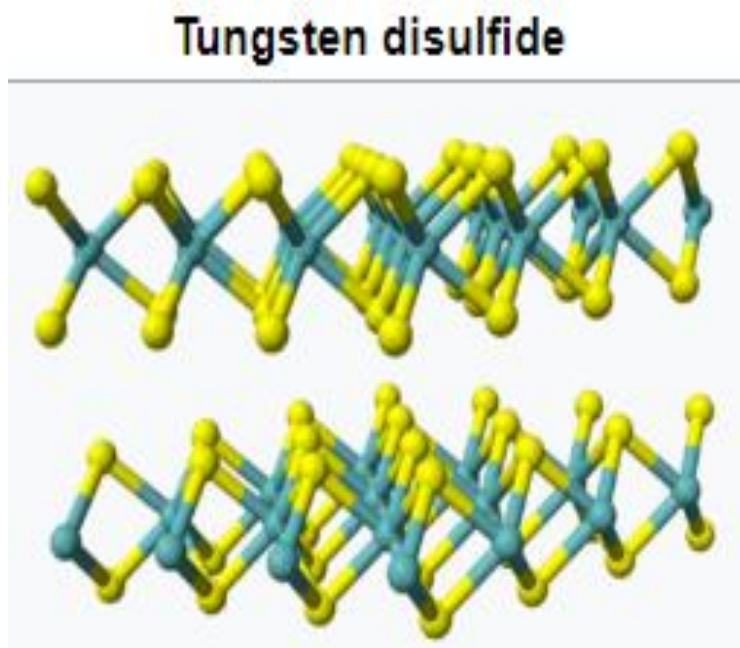
που παράχθηκαν μέσω μικρομηχανικής αποφλοΐωσης είναι κοντά στο θεωρητικό όριο του χημικού δεσμού Mo – S, κάτι που σημαίνει ότι αυτοί οι κρύσταλλοι περιέχουν μικρό πλήθος ατελειών. Επιπλέον το MoS₂ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές εύκαμπτων ηλεκτρονικών όσο και ως μέσο ενίσχυσης σε νανοσύνθετα υλικά. Ιδιαίτερα στα εύκαμπτα ηλεκτρονικά, η εξαιρετική μηχανική αντοχή του μονοστρωματικού MoS₂ ξεπερνά αυτή των σημερινών εύκαμπτων υποστρωμάτων από πολυιμίδιο (PI), με αποτέλεσμα το τελευταίο να αστοχεί πολύ πριν το πρώτο . Μερικές από τις εφαρμογές του MoS₂ περιλαμβάνουν τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου με μεγάλο on-off αναλογία ρεύματος, καθώς και άλλες διατάξεις και αισθητήρες, χάρις στο μεγάλο ενεργειακό χάσμα (1.8eV), την ευκινησία φορέων (έως και 500 cm²V⁻¹ s⁻¹), και τον μεγάλο συντελεστή Seebeck (-4×10² έως -1×10⁵ μV K⁻¹). Τέλος το MoS₂ έχει προταθεί ως ενεργό υλικό σε μία σειρά εξωτικών διατάξεων όπως ευρέος φάσματος ενεργειακοί συλλέκτες.(15)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΔΙΣΟΥΛΦΙΔΙΟ ΤΟΥ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή στο WS_2 .

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ένα παράγωγο στοιχείο του γραφενίου, το Δισουλφίδιο του βολφραμίου, γνωστό ως WS_2 , σύμφωνα με τον χημικό του τύπο. Πρόκειται για ένα πρόσφατο στοιχείο που ανακαλύφθηκε και κατατάχθηκε στα δυσδιάστατα υλικά. Λόγω της ηλεκτρονιακής του δομής, των φυσικών του ιδιοτήτων και την χρήση του σε τεχνολογικές εφαρμογές συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον. Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά του.

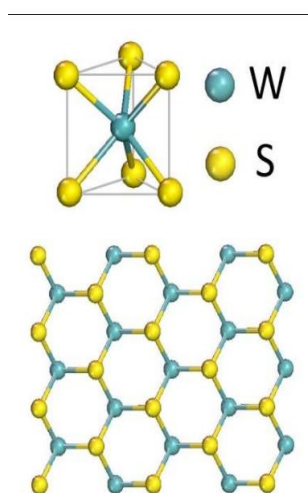


Σχήμα 3.1: Το Δισουλφίδιο του βολφραμίου. (20)

3.2 Ηλεκτρονιακή δομή του WS_2 .

Το Δισουλφίδιο του βολφραμίου (WS_2), όπως και το Δισουλφίδιο του μολυβδαίνιου (MoS_2) είναι δύο σημαντικά μέλη της οικογένειας φυλλόμορφων ενώσεων χαλκογενών με μεταβατικά μέταλλα, που εμφανίζουν μεταξύ άλλων ιδιότητες ημιαγωγού. Συγκεκριμένα, ο ημιαγωγός κρύσταλλος WS_2 εμφανίζει έμμεσο ενεργειακό χάσμα 1,8eV. (7)

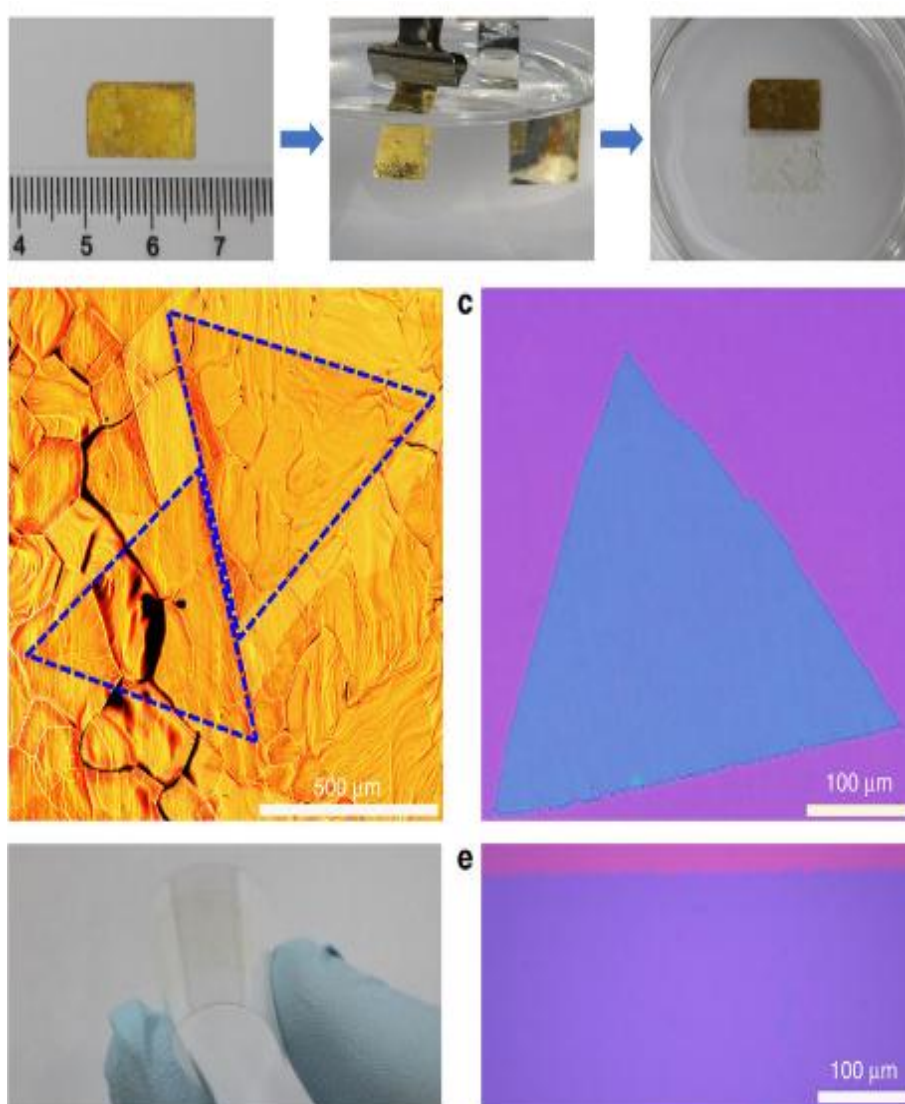
Μελετώντας την κατανομή των ηλεκτρονίων σε αυτούς τους κρυστάλλους, ο Jamison (21) έδωσε μια άλλη εξήγηση για τις καλές τριβολογικές ιδιότητες των MoS_2 και WS_2 . Στη δομή τους, έξι μη δεσμευμένα ηλεκτρόνια γεμίζουν μια ζώνη και περιορίζονται στη δομή. Αυτά τα ηλεκτρόνια δημιουργούν καθαρό θετικό φορτίο στο επιφανειακό στρώμα, προωθώντας την εύκολη διάτμηση μέσω ηλεκτροστατικής απώθησης. Το WS_2 είναι θερμικά πιο σταθερό και ανθεκτικό στην οξειδωση (περίπου 50 έως 100 ° C) από το MoS_2 . Ο αργός ρυθμός οξειδωσης του WS_2 μπορεί να εξηγηθεί από το σχηματισμό τριοξειδίου του βολφραμίου (WO_3), το οποίο είναι επίσης γνωστό ότι παρέχει χαμηλότερο συντελεστή τριβής από το τριοξείδιο του μολυβδαίνιου (MoO_3). (21)



Σχήμα 3.2: Δομή του WS_2 . (20)

3.3 Τρόποι παραγωγής του WS_2 .

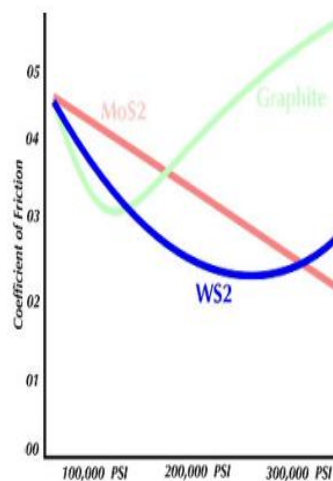
Η έρευνα για το WS_2 δεν έχει πολύ καιρό που έχει ξεκινήσει. Είναι σχετικά ένα καινούργιο υλικό. Η παρασκευή ενός μονού στρώματος από αυτό, μπορεί να γίνει με την επίστρωση δύο ατομικών στρωμάτων θείου και ενός ατομικού στρώματος βολφραμίου μέσω ομοιοπολικών δεσμών, όπου το βολφράμιο βρίσκεται στο κέντρο μιας τριγωνικής πρισματικής θήκης που σχηματίζεται από έξι άτομα θείου. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για την ανάπτυξη μονοστοιβάδας WS_2 περιλαμβάνουν χημική εναπόθεση ατμού (CVD) και φυσική εναπόθεση ατμού (PVD). (20)



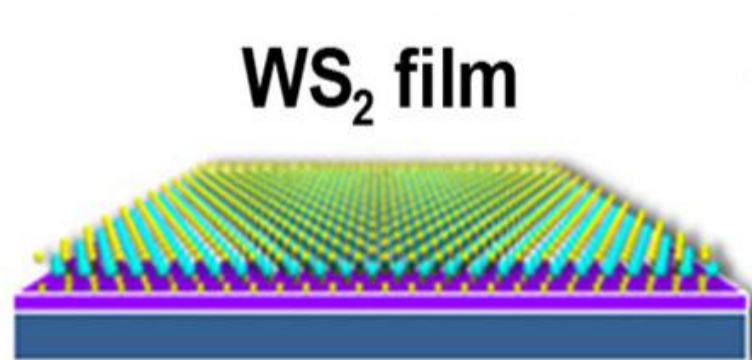
Σχήμα 3.3: Παραγωγή με την μέθοδο CVD. (20)

3.4 Φυσικές ιδιότητες του WS_2 .

Το WS_2 δεν έχει μελετηθεί τόσο ευρέως σύμφωνα με την ερευνητική βιβλιογραφία. Δεδομένου ότι διαθέτει κρυσταλλική δομή παρόμοια με εκείνη του MoS_2 , αναμένεται να παρουσιάζει παρόμοιες φυσικές ιδιότητες συμπεριλαμβανομένης μιας κατάστασης σχεδόν μηδενικής τριβής ή υπερφυσικότητας. Ο Jamison (21) συνέκρινε τις τριβολογικές ιδιότητες διαφόρων διχλωρογονιδίων μετάλλων και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα μεταλλικά διχλωρογενίδια που έχουν την ίδια δομή με το 2H- MoS_2 έχουν καλές τριβολογικές ιδιότητες (21). Λόγω της κρυσταλλικής του τελειότητας, χαρακτηρίζεται από εξαιρετική μηχανική συμπεριφορά.



Σχήμα 3.4: Λόγος τριβής WS_2 σε σχέση με το MoS_2 και το G σε συγκεκριμένες πιέσεις. (22)



Σχήμα 3.5: Στρώση WS_2 . (20)

3.5 Εφαρμογές WS₂.

Λόγω των ανώτερων ιδιοτήτων του, το WS₂ χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική και τη βιομηχανία της άμυνας. Παράλληλα η ενισχυμένη μηχανική συμπεριφορά του, το φέρνει στο παρασκήνιο για την επιλογή του σε εφαρμογές μελέτης συμπεριφοράς υλικών για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερών νανοσύνθετων υλικών. Τέλος λόγω των τριβολογικών του ιδιοτήτων, χρησιμοποιείται σε ρουλεμάν και γρανάζια (επεκτείνει την διάρκεια ζωής τους έως και 400%).(23)

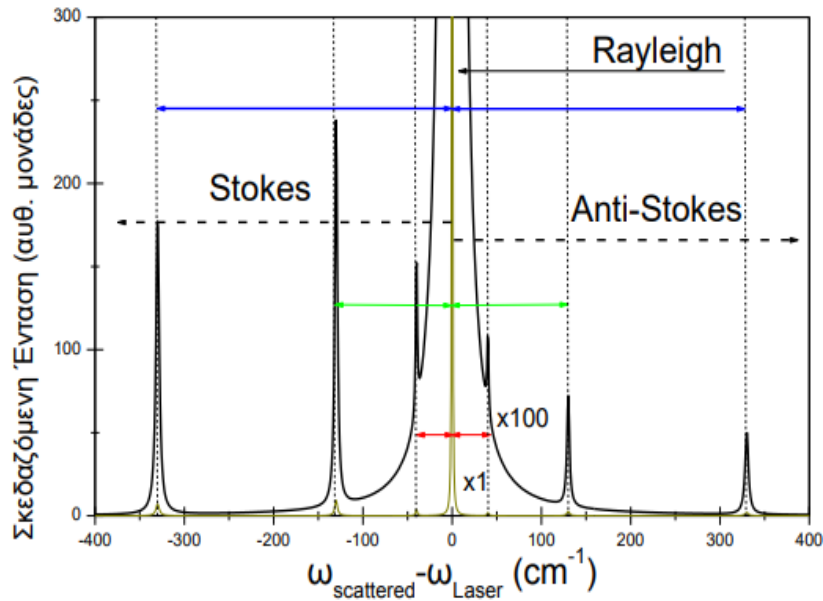
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ RAMAN

4.1 Σκέδαση Raman και ερμηνεία του φαινομένου.

Η φασματοσκοπία Raman είναι μία μέθοδος μη-ελαστικής σκέδασης φωτός η οποία παίρνει το όνομά της από το αντίστοιχο φαινόμενο. Η φασματοσκοπία Raman είναι μια μη καταστρεπτική πειραματική μέθοδος χαρακτηρισμού υλικών, η οποία στηρίζεται στο φαινόμενο της μη ελαστικής σκέδασης του φωτός. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1928 από τους C. V. Raman και K. S. Krishnan. (24) Κατά το φαινόμενο Raman, όταν κάποιο υλικό σύστημα αέριο, υγρό ή στερεό ακτινοβολείται με μονοχρωματική ακτινοβολία (συνήθως, από την περιοχή του ορατού φάσματος), τότε η διάχυτη ακτινοβολία, που σκεδάζεται, περιέχει νέες φασματικές περιοχές. (24)

Ένα φάσμα Raman, στο οποίο καταγράφεται η έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας, συναρτήσει της συχνότητας, έχει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Τυπικό φάσμα σκέδασης Raman, στο οποίο φαίνονται η ζώνη ελαστικής σκέδασης (Rayleigh) και οι ζώνες μη-ελαστικής σκέδασης (Stokes και Anti-Stokes). (24)

Οι πλευρικές ζώνες σκέδασης των φασμάτων Raman ερμηνεύονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της εισερχόμενης μονοχρωματικής ακτινοβολίας με τις διεγέρσεις του υλικού συστήματος. Οι διεγέρσεις αυτές μπορεί να είναι είτε μονοσωματιδιακές κινήσεις, (π.χ. κίνηση ελευθέρων ηλεκτρονίων, κινήσεις απομονωμένων ατόμων ή προσμίξεων), είτε συλλογικές.

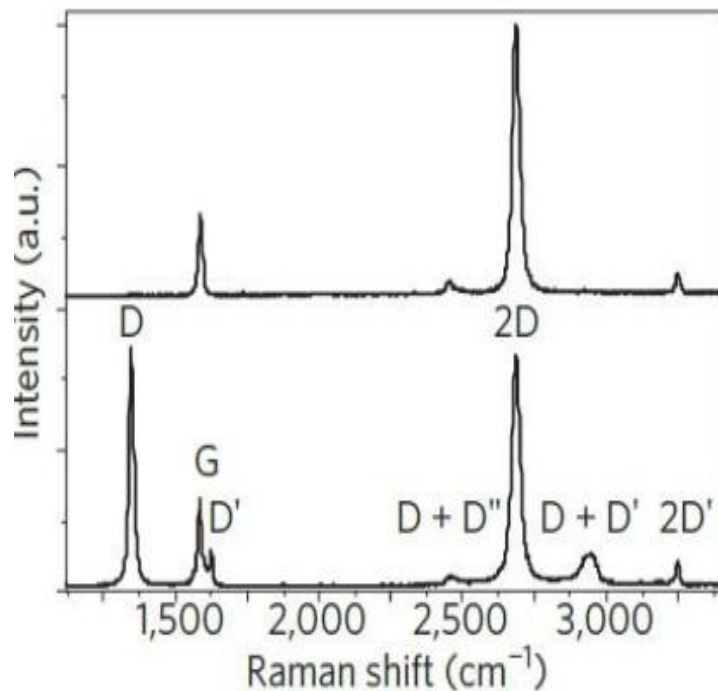
Ανάλογα με τον τρόπο που περιγράφονται οι κινήσεις αυτές και η αλληλεπίδρασή τους με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διέγερσης, έχουμε μία κλασική ή μία κβαντική περιγραφή – ερμηνεία του φαινομένου Raman. (24)

4.1.1 Χαρακτηριστική καμπύλη Raman γραφενίου.

Ένα φάσμα Raman για το γραφένιο, μπορεί να προσφέρει πολλές πληροφορίες σχετικά με το δείγμα, όπως την ποιότητα, το ποσοστό κάλυψης, τον αριθμό των layers καθώς και τον τρόπο ανάπτυξής του. Στο παρακάτω

Σχήμα 4.2, βλέπουμε τις χαρακτηριστικές κορυφές φάσματος που εμφανίζονται για ένα φύλλο γραφενίου. Πρώτη χαρακτηριστική κορυφή του φάσματος είναι η G-peak, η οποία εμφανίζεται στο σημείο $\approx 1588 \text{ cm}^{-1}$ και αντιστοιχεί στον γραφίτη ή σε sp^2 άνθρακα. Η ύπαρξη sp^2 ή άμορφου άνθρακα υποδεικνύει αποκλίσεις της επίπεδης συμμετρίας του γραφενίου. Η δεύτερη χαρακτηριστική κορυφή του φάσματος είναι η D-peak η οποία εμφανίζεται στο σημείο $\approx 1350 \text{ cm}^{-1}$ -peak εμφανίζεται στο σημείο $\approx 1620 \text{ cm}^{-1}$ και αντιστοιχεί σε εγγενή διπλό συντονισμό ο οποίος παραπέμπει στην παρουσία άκρων στο φύλλο γραφενίου. Η κορυφή 2D εμφανίζεται στο σημείο $\approx 2690 \text{ cm}^{-1}$ και μπορεί να είναι παρατηρήσιμη χωρίς την ύπαρξη κάποιας ανωμαλίας (σε αντιδιαστολή με την D-peak).

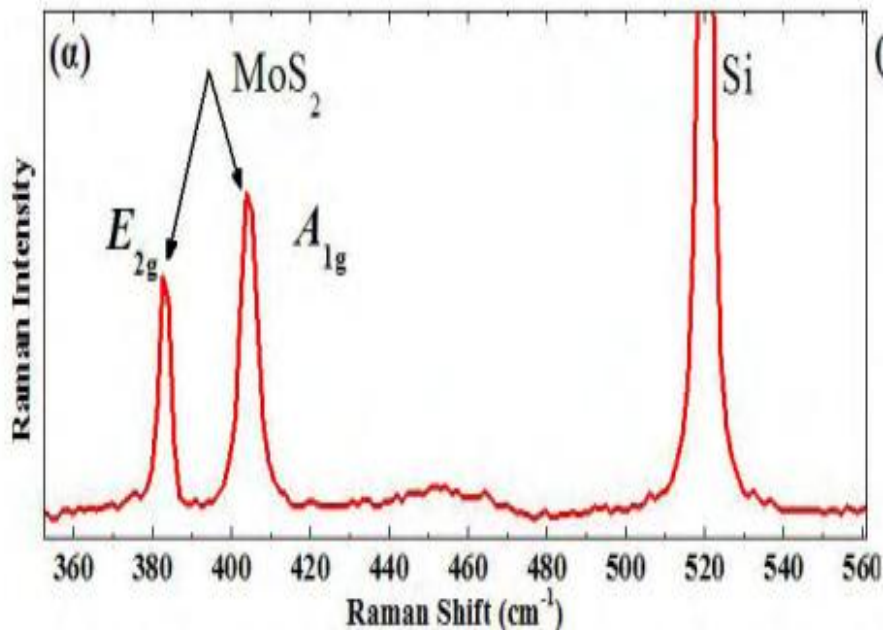
εμφανίζεται στο σημείο $\approx 2450 \text{ cm}^{-1}$ και αποτελεί ένα συνδυασ . (25)



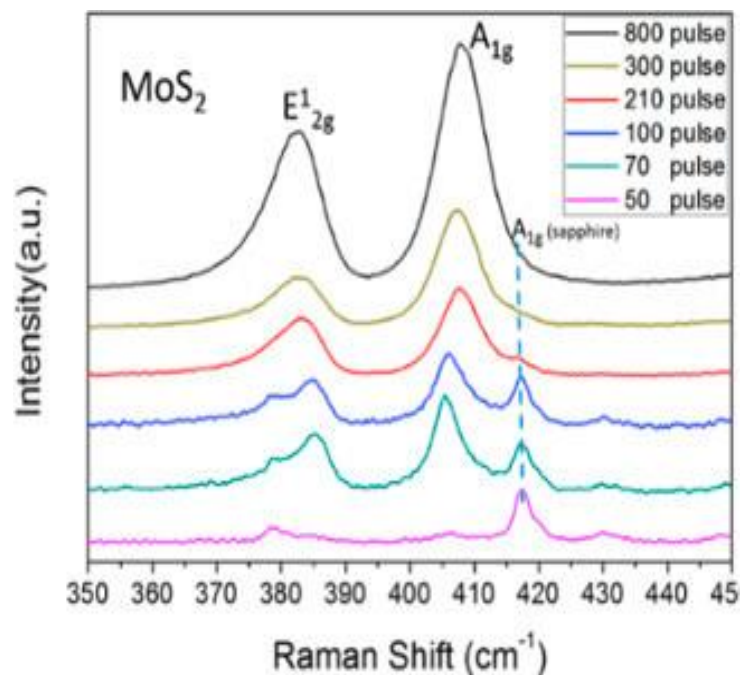
Σχήμα 4.2: Απεικόνιση χαρακτηριστικής καμπύλης Raman Graphene για ένα layers. (25)

4.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη Raman MoS₂.

Παρακάτω (Σχήμα 4.3α,β) παρουσιάζεται το χαρακτηριστικό φάσμα του MoS₂ καθώς και οι χαρακτηριστικές καμπύλες για ανάλογους παλμούς. Γενικότερα αποτελείται από δύο χαρακτηριστικές κορυφές Raman στα 383 cm⁻¹ και 408 cm⁻¹ που αποδίδονται στις E_{2g} και A_{1g} δονήσεις. (15)



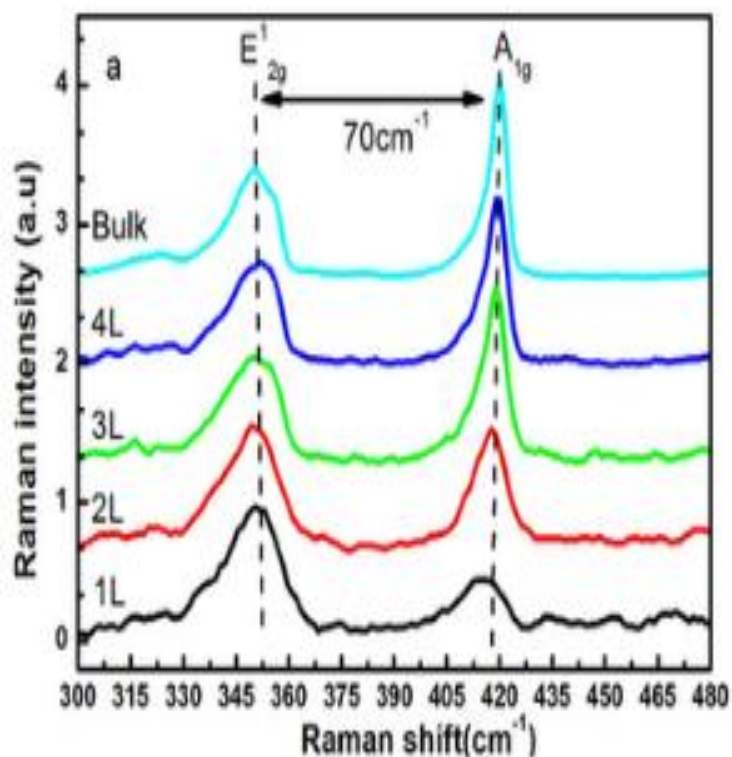
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών Raman.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών Raman MoS₂. (15)

4.1.3 Χαρακτηριστική καμπύλη Raman WS₂.

Παρακάτω (Σχήμα 4.5) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά φάσματα του WS₂ καθώς και οι χαρακτηριστικές καμπύλες για ανάλογους παλμούς σύμφωνα με τον αριθμό των στρώσεων. Παρατηρούμε μια απόσταση 70 cm⁻¹ ανάμεσα στις κορυφές E_{2g} (350 cm⁻¹) και A_{1g} (418 cm⁻¹) που αποδίδονται στις E_{2g} και A_{1g} δονήσεις. (26)



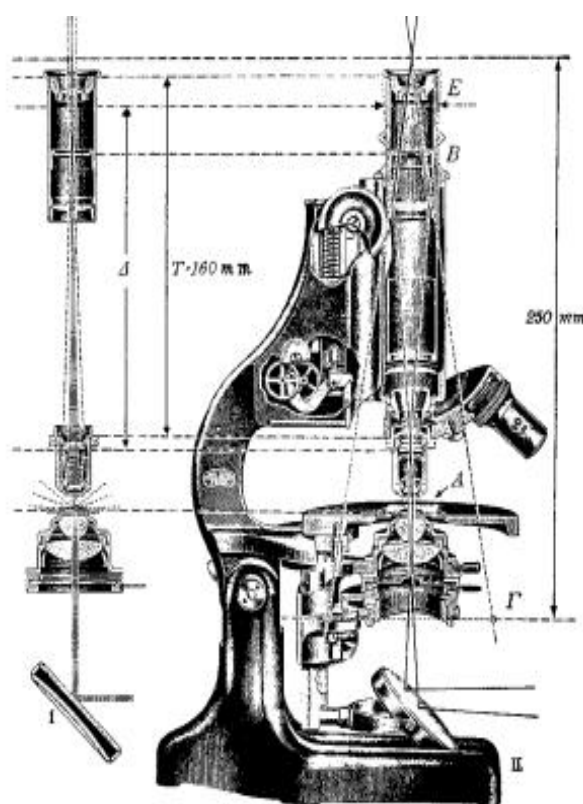
Σχήμα 4.5: Απεικόνιση χαρακτηριστικών καμπυλών Raman WS₂.(26)

4.2 Οπτική μικροσκοπία.

Η οπτική μικροσκοπία έχει να κάνει με την παρατήρηση αντικειμένων υπό μεγέθυνση, με τη βοήθεια του φωτός. Η παρατήρηση μπορεί να γίνεται είτε μέσω του ανακλώμενου είτε μέσω του διερχόμενου, από τα προς

παρατήρηση αντικείμενα φωτός. Το οπτικό μικροσκόπιο αποτελεί ένα οπτικό σύστημα για την παρατήρηση αντικειμένων σε μεγέθυνση.

Ένα οπτικό μικροσκόπιο (σύγχρονο) είναι ένα όργανο το οποίο μπορεί να μεγεθύνει αντικείμενα μέχρι και 2000x μεγέθυνση. Το αντικείμενο τοποθετείται πολύ κοντά στον φακό, ο οποίος σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλό του. Το μάτι παρατηρεί αυτό το είδωλο. Το μήκος του σωλήνα του μικροσκοπίου έχει συνήθως σταθερό μήκος με αποτέλεσμα η εστίαση να γίνεται με μετακίνηση του όλου οπτικού συστήματος ως προς το αντικείμενο μέχρι να υπάρξει εστίαση για ευκρινή παρατήρηση. (27)



Σχήμα 4.6: Οπτικό μικροσκόπιο. (23)

4.3 Ηλεκτρονική μικροσκοπία.

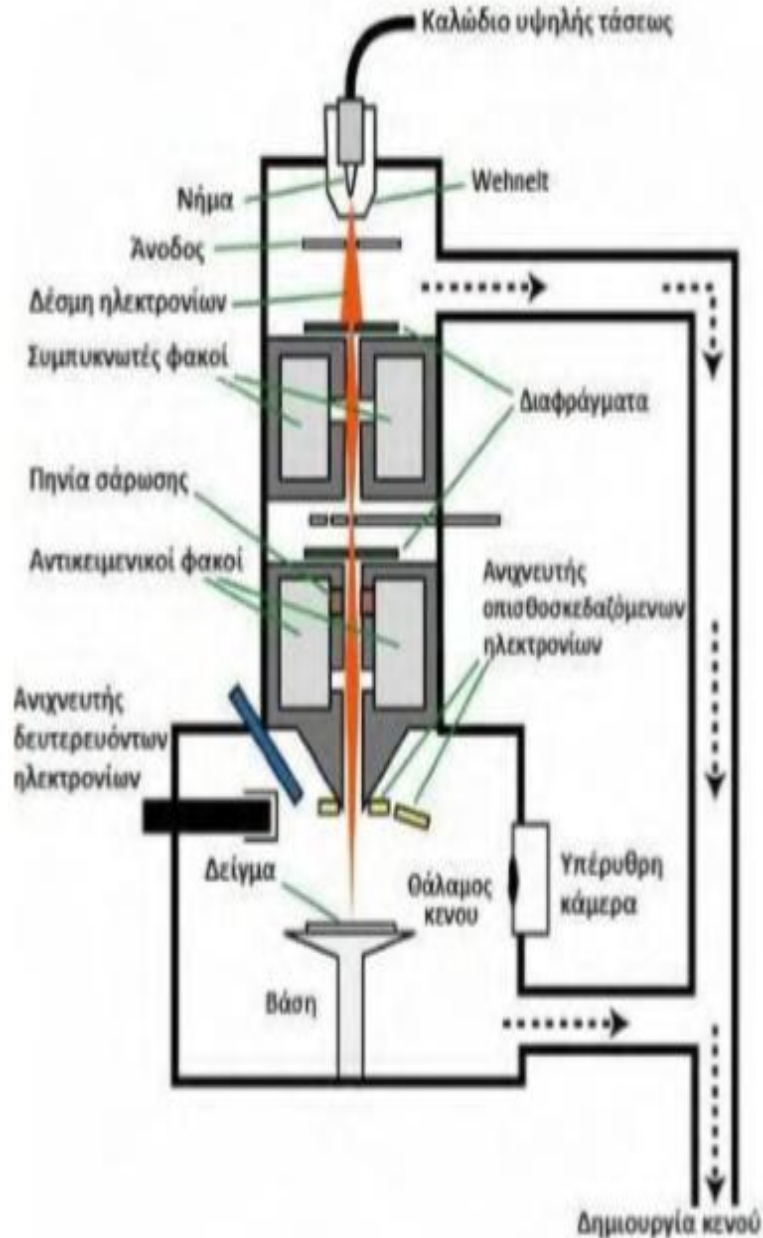
Ένα από τα πιο ισχυρά και αποτελεσματικά όργανα για τη μελέτη της μικροδομής των υλικών είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Το πρώτο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο κατασκευάστηκε το 1931 από τον Γερμανό μηχανικό

Ernest Ruska, ο οποίος τιμήθηκε για αυτήν του την ανακάλυψη με το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής του 1986. (24)

Πρόκειται για ένα όργανο με διακριτική ικανότητα της τάξης του nm, μέσω της αλληλεπίδρασης του με μία δέσμη ηλεκτρονίων. Ο χειρισμός της δέσμης των ηλεκτρονίων που προσπίπτει στο δείγμα όσο και αυτών που σκεδάζονται γίνεται με την βοήθεια μαγνητικών φακών. Υπάρχουν διάφορα είδη ηλεκτρονικών μικροσκοπιών. Τα δύο, περισσότερο γνωστά είναι τα εξής, Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης SEM (Scanning Electron Microscope) και Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης TEM (Transmission Electron Microscope)

4.4 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης SEM.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης είναι ένα από τα πλέον χρήσιμα συστήματα, από όσα χρησιμοποιούν οπτική ηλεκτρονίων, για τη μελέτη των συμπαγών δειγμάτων. Παρακάτω στο Σχήμα 4.7 φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του SEM.



Σχήμα 4.7: Σχηματική απεικόνιση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (28)

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης χρησιμοποιεί μία λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων η οποία, αφού περάσει από μια ακολουθία δύο ή τριών φακών εστίασης, οι οποίοι είναι συνδυασμένοι με κατάλληλα διαφράγματα, καταλήγει να έχει διάμετρο 2 – 10 nm, η ελάχιστη τιμή της οποίας περιορίζεται από το ελάχιστο αποδεκτό ρεύμα της δέσμης ανίχνευσης το οποίο δεν μπορεί να είναι χαμηλότερο από μερικά pA, για λόγους εξασφάλισης ικανοποιητικού λόγου Σήμα/Θόρυβος. Η λεπτή αυτή δέσμη κατευθύνεται, με την βοήθεια ενός

πηνίου οδήγησης, έτσι ώστε να σαρώνει με περιοδικό τρόπο την προς μελέτη επιφάνεια του δείγματος.

Η προσπίπτουσα δέσμη προκαλεί την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων με ενέργειες που κυμαίνονται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων της δέσμης μέχρι περίπου 50 eV. Εκπέμπονται επίσης ηλεκτρόνια που έχουν υποστεί ελαστική σκέδαση ή χαμηλή απώλεια ενέργειας, καθώς και ακτίνες X αλλά και φωταύγεια. Τα προηγούμενα σήματα, αλλά κυρίως τα σήματα δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, ενισχύονται και στη συνέχεια διαμορφώνουν την ένταση μιας εξωτερικής (ανεξάρτητης) καθοδικής δέσμης η οποία προσπίπτει σε φθορίζουσα οθόνη ακολουθώντας την ίδια σάρωση η οποία οδηγεί τη δέσμη του μικροσκοπίου.

Το αποτέλεσμα είναι η μεγεθυμένη απεικόνιση, στη φθορίζουσα οθόνη, της επιφάνειας του δείγματος που σαρώνει η δέσμη του μικροσκοπίου. Ανάλογα με την επιλογή του σήματος που θα χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή της εικόνας, αναδεικνύονται διαφορετικά χαρακτηριστικά του δείγματος, δεδομένου ότι τόσο η παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων όσο και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης εξαρτώνται από τις τοπικές τιμές της γωνίας πρόσπτωσης, τον μέσο ατομικό αριθμό (πληροφορίες για τη σύνθεση) και τον κρυσταλλικό προσανατολισμό (κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά).
(27)



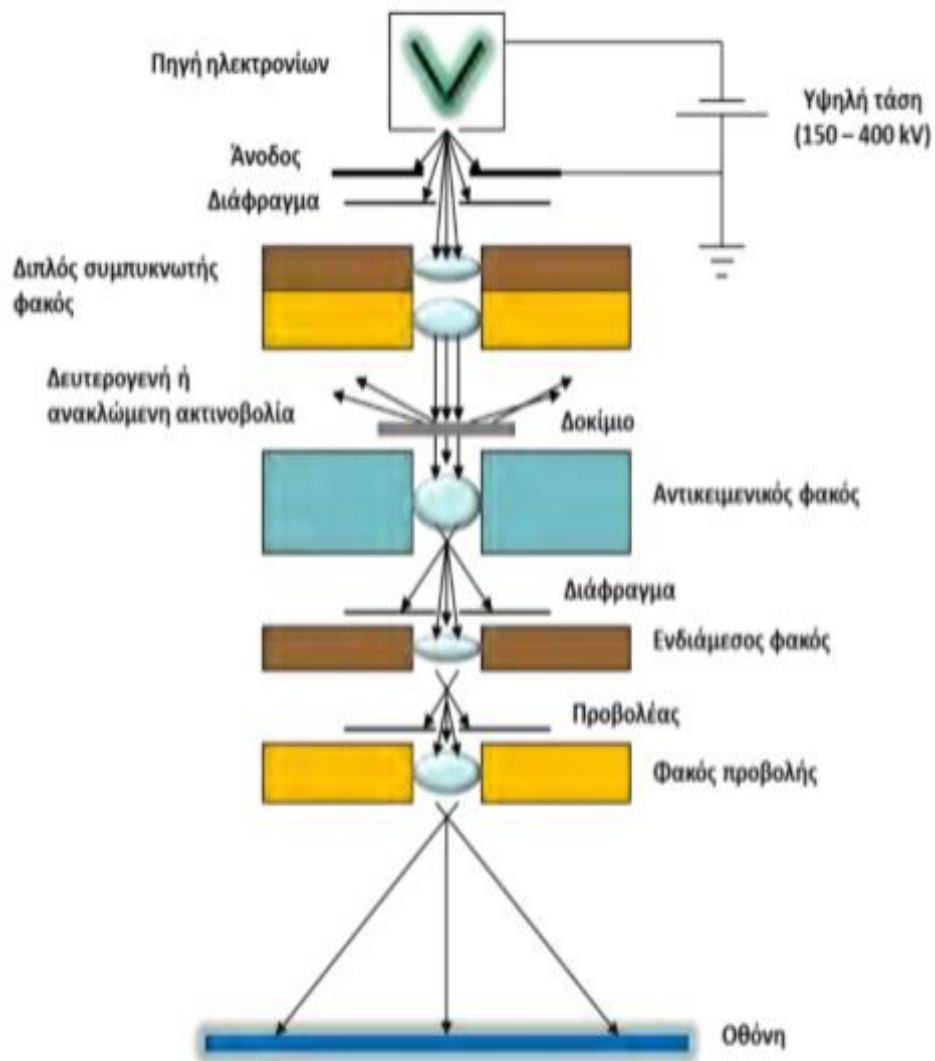
Σχήμα 4.8: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης σε πραγματική κλίμακα. (29)

4.5 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης TEM.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο διέλευσης, περιλαμβάνει μία δέσμη ηλεκτρονίων ομοιόμορφης πυκνότητας ρεύματος, που ακτινοβολούν ένα λεπτό δείγμα. Το δυναμικό επιτάχυνσης σε ένα τυπικό μικροσκόπιο είναι 80 - 120 kV. Μικροσκόπια υψηλότερης διακριτικής ικανότητας λειτουργούν με δυναμικά 200 - 500 kV, ενώ τα μικροσκόπια υψηλής τάσης φτάνουν μέχρι τα 3 MV. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μία κάθοδο, είτε με θερμιονική εκπομπή, είτε με εκπομπή τύπου Schottky, είτε με εκπομπή πεδίου. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια συγκεντρωτικών μαγνητικών φακών, ελέγχεται η περιοχή που φωτίζεται καθώς και η εστίαση της δέσμης. Μετά το δείγμα τα ηλεκτρόνια οδηγούνται, με τη βοήθεια συγκεντρωτικών φακών (επίσης μαγνητικού τύπου), σε μία φθορίζουσα οθόνη. Επειδή τα ηλεκτρόνια υφίστανται ισχυρή ελαστική και μη ελαστική σκέδαση από τα άτομα του δείγματος, το δείγμα πρέπει να είναι αρκετά λεπτό. Παρακάτω στο Σχήμα 4.9 φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του TEM.

Το αντικείμενο, στην περίπτωση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διέλευσης, έχει τη μορφή λεπτού δίσκου, το πάχος του οποίου είναι από μερικές δεκάδες μέχρι εκατοντάδες nm. Για την προετοιμασία των δειγμάτων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, όπως:

- (α) λέπτυνση με δέσμη ηλεκτρονίων,
- (β) χρήση μικροτόμων υψηλής λεπτότητας,
- (γ) χημική λέπτυνση,
- (δ) σχισμός παράλληλα σε κρυσταλλικά επίπεδα και
- (ε) βομβαρδισμός με δέσμες ιόντων.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα με τα βασικά μέρη του TEM. (28)

Η πλευρική διάσταση του δείγματος, το οποίο έχει συνήθως τη μορφή δίσκου, είναι μερικά nm. Το δείγμα εισάγεται στον θάλαμο του μικροσκοπίου μέσω ειδικής θυρίδας που εξασφαλίζει τη διατήρηση του κενού, και τοποθετείται σε διάταξη μικρομετρικών μετατοπίσεων. Τα ηλεκτρόνια τα οποία διέρχονται από το δείγμα περιθλώνονται σε διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με τα κρυσταλλικά χαρακτηριστικά. Αυτό επιτρέπει να μελετηθεί η κρυσταλλική δομή του αντικειμένου.

Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια διέρχονται από έναν ενδιάμεσο φακό, με τη βοήθεια του οποίου σχηματίζεται ένα ενδιάμεσο είδωλο, το οποίο αποτελεί

μεγεθυμένη απεικόνιση του αντικειμένου. Το ενδιαμέσο αυτό είδωλο, μέσω ενός τελευταίου φακού (φακός προβολής), προβάλλεται, μετά από μία τελευταία μεγέθυνση, σε φθορίζουσα οθόνη, για παρατήρηση ή φωτογράφιση. (27)



Σχήμα 4.10: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης σε πραγματική κλίμακα. (30)

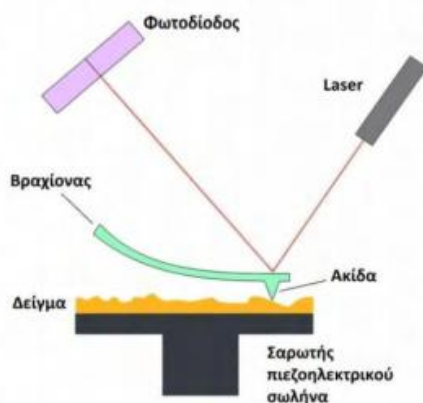
4.6 Μικροσκόπιο Ατομικών Δυνάμεων (AFM)

Το μικροσκόπιο ατομικών δυνάμεων ανακαλύφθηκε το 1986 από τους Binnig, Gerber και Quate (5) ως μια παραλλαγή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Το μικροσκόπιο αυτό επιτρέπει την διάκριση μεμονωμένων ατόμων τόσο σε αγώγιμες, όσο και σε διάφορες μονωτικές επιφάνειες. Σε αυτού του είδους τη μικροσκοπία υπάρχει ένα είδος εύκαμπτου βραχίονα, στον οποίο τοποθετείται μια ακίδα κατασκευασμένη συνήθως από Si με μια επικάλυψη από Si_3N_4 στην μια άκρη. Αυτή η ακίδα πραγματοποιεί

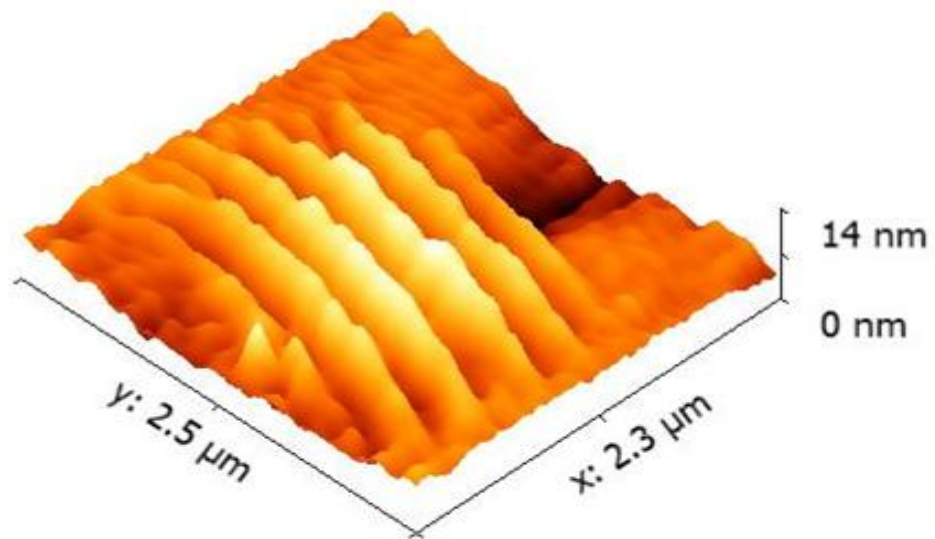
μια παλινδρομική σάρωση στην επιφάνεια του δείγματος. Επιπλέον είναι δυνατόν να ελεγχθεί και η απόσταση μεταξύ της ακίδας και της επιφάνειας. Η δύναμη που δρα μεταξύ βραχίονα και επιφάνειας του δείγματος προκαλεί πολύ μικρές ταλαντώσεις του βραχίονα οι οποίες ανιχνεύονται με οπτικά μέσα. Κατά την διάρκεια της σάρωσης η ακίδα κρατείται σταθερή και με μία κίνηση πάνω – κάτω παρέχει τοπογραφικές πληροφορίες για το δείγμα μας.

Με τη χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου μπορούμε να ελέγξουμε τις κινήσεις της ακίδας ως προς το δείγμα με ακρίβεια. Με το τρόπο αυτό μπορούν να μελετηθούν οι διάφορες ιδιότητες της επιφάνειας του δείγματος όπως η τοπογραφία, ο τοπικός συντελεστής τριβής, οι μαγνητικές ιδιότητες, η ηλεκτρονική πυκνότητα καταστάσεων, η σκληρότητα κτλ. σε διαστάσεις μέχρι και το ατομικό επίπεδο.

Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται σε μία ακίδα η οποία είναι προσκολλημένη σε ένα στέλεχος και έρχεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του δείγματος. Μια δέσμη λέιζερ ανακλάται σε ένα σημείο του βραχίονα σε μια διχοτομημένη φωτοδίοδο, η οποία ανιχνεύει την κίνηση του ανιχνευτή. Οι κινήσεις της ακίδας που είναι τώρα σε επαφή με την επιφάνεια ανιχνεύονται ως αποκλίσεις της δέσμης στη φωτοδίοδο. Το σύστημα κίνησης ουσιαστικά είναι ένας πιεζοηλεκτρικός σωλήνας, ο οποίος κινεί το δείγμα στις τρεις x,y,z κάτω από την ακίδα. Το σήμα εξόδου από την φωτοδίοδο ελέγχει την δύναμη που εφαρμόζεται στην ακίδα έτσι, ώστε αυτή να διατηρείται σταθερή. Έτσι με αυτήν την διαδικασία και ένα σύστημα βρόχου ελέγχου μπορούμε να σαρώσουμε την επιφάνεια του δείγματος.(5)



Σχήμα 4.11: Αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή εκτροπής δέσμης.(5)



Σχήμα 4.12: Απεικόνιση επιφάνειας φύλλου μονοατομικού γραφενίου με κυματώσεις με την χρήση AFM.(5)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

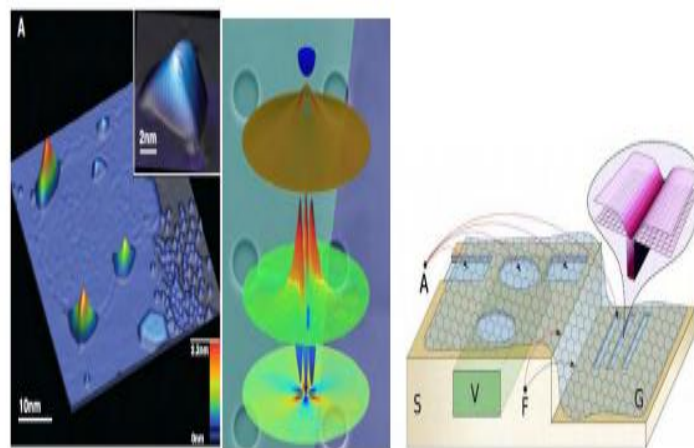
5. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ 2D ΥΛΙΚΩΝ

5.1 Μηχανική συμπεριφορά δυσδιάστατων μεμβρανών.

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια εισαγωγή στους δυσδιάστατους κρυστάλλους με έμφαση στην μηχανική τους συμπεριφορά. Επιπλέον, αναφέρονται οι υπάρχουσες συσκευές μέτρησης κάμψης, καθώς και οι μέθοδοι αντιμετώπισης των αδυναμιών τους. Τέλος, παρουσιάζεται η προτεινόμενη διάταξη.

5.1.1 Μηχανική συμπεριφορά μεμβρανών γραφενίου, MoS_2 , WS_2 .

Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του γραφενίου εξαρτάται από τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων του πλέγματος. Στο μη παραμορφωμένο γραφένιο οι γωνίες του εξαγωνικού πλέγματος αντιστοιχούν στα σημεία υψηλής συμμετρίας K , K' της ζώνης Brillouin όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. (Σχήμα 5.1)

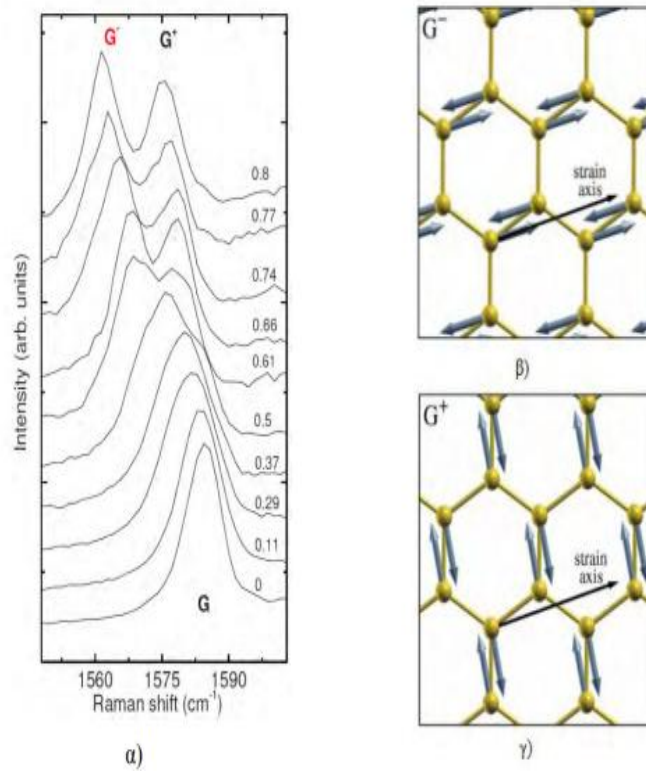


Σχήμα 5.1: Γραφένιο και Εξαγωνικό του Πλέγμα. (24)

Γραφένιο

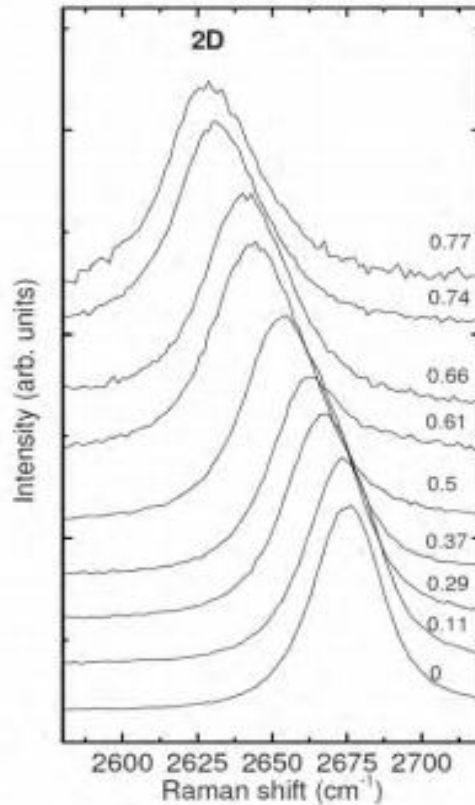
Κατά την επιβολή της παραμόρφωσης στο γραφένιο, το μήκος των δεσμών μεταβάλλεται, διαταράσσοντας τη συμμετρία του εξαγωνικού πλέγματος, με τις έξι γωνίες του πλέγματος να αποκλίνουν από τα παραπάνω σημεία. Αρκετές ερευνητικές ομάδες ασχολούνται με την μεταβολή των ιδιοτήτων του γραφενίου εικάζοντας για παράδειγμα πως μπορεί να βελτιωθεί η κινητικότητα των φορέων όπως στην τεχνολογία μικροηλεκτρονικής s-Si, καθώς και ορισμένες διαμορφώσεις της παραμόρφωσης μπορούν να επάγουν ισχυρά ομοιόμορφα μαγνητικά πεδία της τάξεως των 300T. Τα παραπάνω μπορούν να επιτευχθούν είτε παραμορφώνοντας το πλέγμα του γραφενίου, είτε τοποθετώντας το γραφένιο πάνω σε ειδικά διαμορφωμένα υποστρώματα, patterns, επάγοντας έτσι την παραμόρφωση στο πλέγμα, strain engineering electronics .

Η χαρακτηριστική κορυφή του γραφενίου φαίνεται να διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες καθώς η επιβαλλόμενη παραμόρφωση αυξάνεται (Σχήμα 5.2 α). Η συνιστώσα με το μεγαλύτερο ρυθμό μετατόπισης ονομάζεται G - και σχετίζεται με την παράλληλη συνιστώσα του τρόπου δόνησης την E_{2g} - (Σχήμα 5.2 β), ενώ η συνιστώσα με τον μικρότερο ρυθμό ονομάζεται G + και σχετίζεται με την αντίστοιχη κάθετη συνιστώσα του τρόπου δόνησης την E_{2g} + (Σχήμα 5.2 γ).



Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστικές κορυφές γραφενίου. (24)

Για την χαρακτηριστική κορυφή 2D, η επιβολή της μονοαξονικής παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα της μεταβολή της συχνότητάς της (εικόνα) χωρίς όμως να παρατηρηθεί κάποιος διαχωρισμός της κορυφής σε υποσυνιστώσες, όπως στην περίπτωση της κορυφής G.

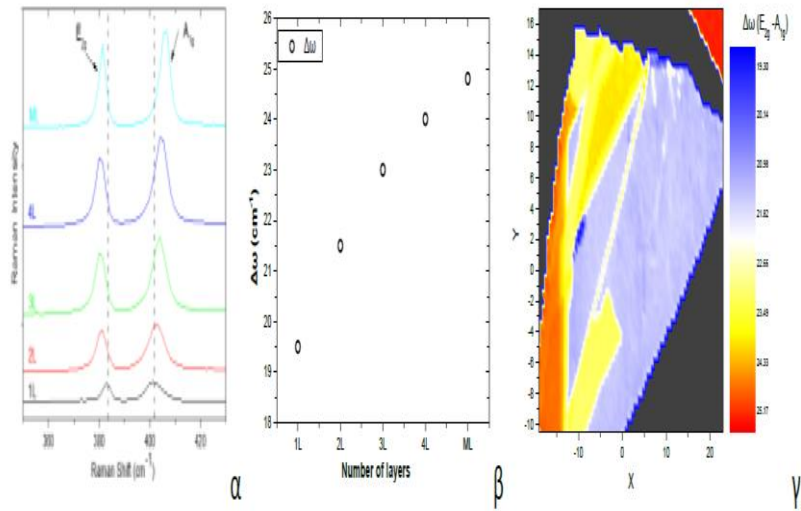


Σχήμα 5.3: Η μεταβολή της χαρακτηριστικής κορυφής 2D του γραφενίου καθώς και η επιβαλλόμενη εφελκυστική παραμόρφωση αυξάνεται. (24)

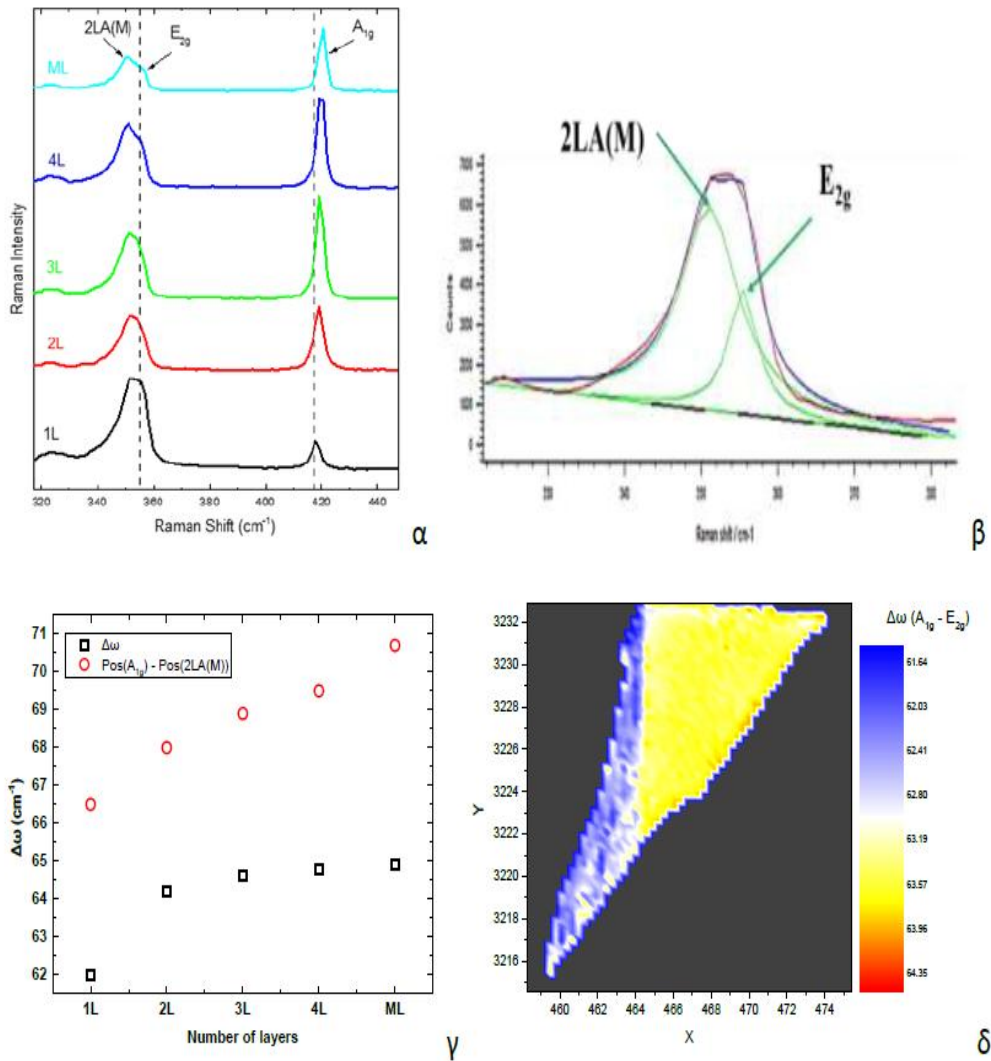
MoS₂ – WS₂

Όσον αφορά το MoS₂ αλλά και το WS₂, δύο υλικά που προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία από ενδιαφέρουσες οπτικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες, απομονώνοντας τα από τους αρχικούς κρυστάλλους με την μέθοδο της μηχανικής αποφλοίωσης, πραγματοποιήθηκε πάνω σε λεπτό υμένιο PMMA πάχους 3-4 nm σε σχήμα σταυρού πείραμα μηχανικής φόρτισης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για το MoS₂ η διαφορά των θέσεων των κορυφών Raman E_{2g} και A_{1g} μικραίνει όσο μικραίνει ο αριθμός των στρώσεων. Για το WS₂ παρατηρούμε μια παρόμοια συμπεριφορά με την διαφορά ότι η κορυφή E_{2g} πρέπει να διαχωριστεί από την κορυφή 2LA.



Σχήμα 5.4: α) Εξέλιξη των φασμάτων Raman για το MoS₂ ως συνάρτηση του αριθμού των στρωμάτων, β) Μεταβολή του $\Delta\omega$ ως συνάρτηση του αριθμού των στρωμάτων, γ) Χαρτογράφηση του κρυστάλλου ως προς το $\Delta\omega$. (24)



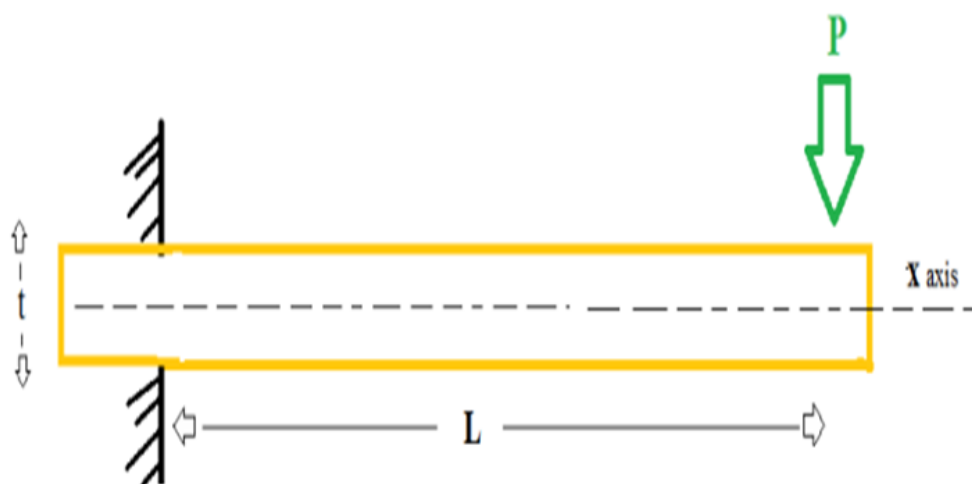
Σχήμα 5.5: α) Εξέλιξη των φασμάτων του Raman για το WS₂ ως συνάρτηση του αριθμού των στρωμάτων, β) Η κορυφή Raman, γ) Μεταβολή του Δω και της διαφοράς ως προς τον αριθμό των στρωμάτων, δ) Χαρτογράφημα του Δω. (31)

5.2 Τρόποι μέτρησης κάμψης

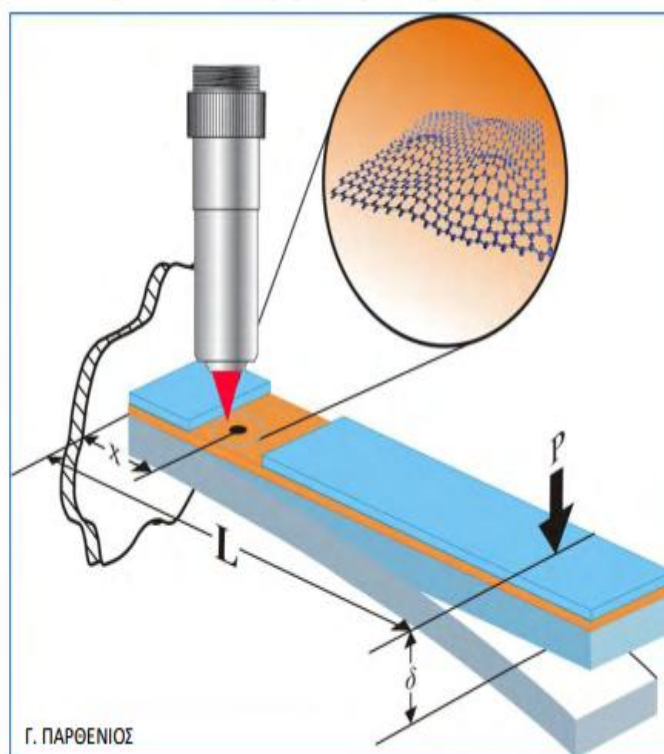
Στην πρόσφατη βιβλιογραφία συναντάμε διάφορες μελέτες που αναφέρονται σε δύο διαφορετικούς τρόπους μέτρησης μηχανικής συμπεριφοράς σε μονοατομικές μεμβράνες δυσδιάστατων κρυστάλλων, μονοατομικών μεμβρανών γραφενίου.

5.2.1 Υπάρχουσες συσκευές

Το 2013 στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Γεωργίας Τσούκληρη. (4) Για την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του γραφενίου χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της μονής πάκτωσης χρησιμοποιώντας δείγματα κυρίως ορθογωνικής διατομής. Πρόκειται για μια διάταξη στην οποία το ένα άκρο της δοκού που χρησιμοποιείται, η οποία είναι κατασκευασμένη από καθαρό πολυμεθακρυλικό μεθυλεστέρα (PMMA), είναι πακτωμένο και το ελεύθερο άκρο το οποίο απέχει από την πάκτωση μια απόσταση L , το οποίο κάμπτεται προς τα κάτω ή προς τα άνω ασκώντας δύναμη. Έτσι η επιφάνεια εφελκύεται ή συμπιέζεται αντίστοιχα. Πάνω σε αυτήν τη δοκό λοιπόν τοποθετούνται τα διάφορα δείγματα με τρόπο έτσι ώστε να είναι δύσκολο να γλιστρήσουν κατά την κάμψη της δοκού.



Σχήμα 5.6: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου της μονής πάκτωσης (3)



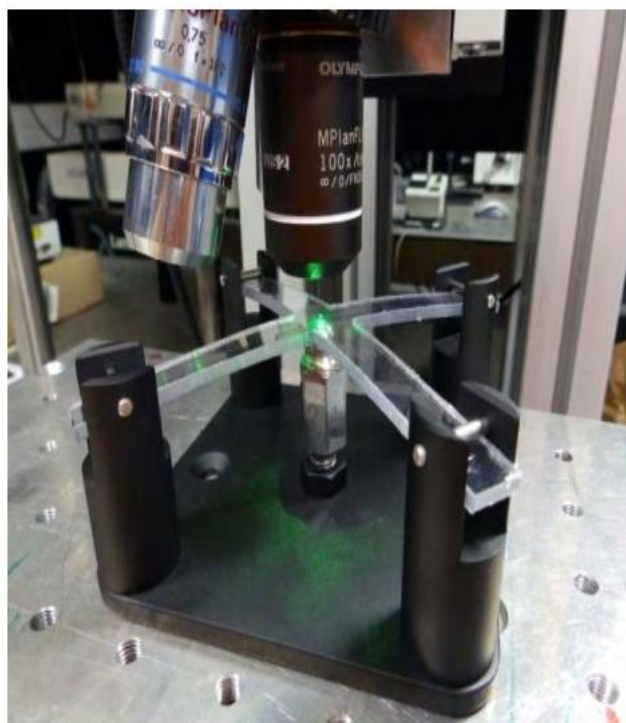
Σχήμα 5.7: Απεικόνιση πακτωμένης δοκού κατά την μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων της μεμβράνης. (3)

Η δεύτερη μελέτη που συναντάμε ανήκει στον Χαράλαμπο Ανδρουλιδάκη (5) και έχει πραγματοποιηθεί το 2016 στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής. Στην συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή μελετάται η μηχανική συμπεριφορά του γραφενίου υπό αξονικές φορτίσεις, το οποίο είτε απλά εδράζεται σε πολυμερικό υπόστρωμα είτε είναι πλήρως εμβαπτισμένο σε πολυμερική μήτρα. Τα δείγματα γραφενίου παρασκευάστηκαν με την μέθοδο της μηχανικής αποφλοιώσης του γραφίτη με την χρήση κολλητικής ταινίας (scotch tape method). Επίσης το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα είναι PMMA/SU-8.

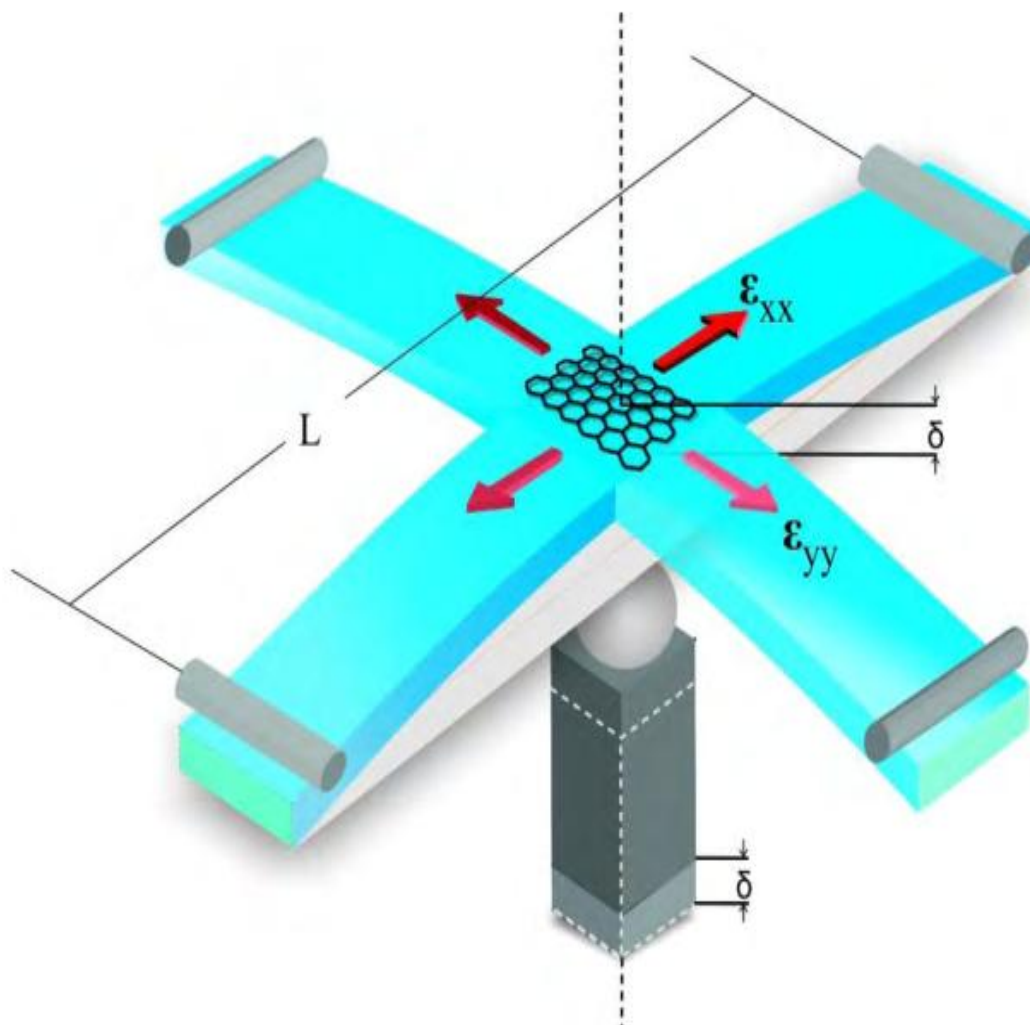
Η μελέτη αυτή ασχολείται με αξονικές φορτίσεις σε δύο διαστάσεις καθώς η διάταξη δέχεται κάμψη τεσσάρων σημείων. Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Η μορφή της καμπτώμενης δοκού έχει σχήμα σταυρού. Στα τέσσερα άκρα της στηρίζεται σε κυλίνδρους(άρθρωση) και στο κέντρο της έχει προσαρμοσθεί βίδα η οποία κάμπτεται προς τα άνω την δοκό σταυροειδούς σχήματος. Με τον τρόπο δημιουργείται εφελκυσμός και στις δύο διαστάσεις

ίσου μέτρου (equi-biaxial) στην άνω κεντρική επιφάνεια του πολυμερούς. Για τις δοκούς χρησιμοποιήθηκαν πολυμερή από πολυμεθακρυλικό μεθυλεστέρα (PMMA, Poly(methylmethacrylate)) και πολυκαρβονικό (polycarbonate, PC). Το PC είναι παρόμοιο πολυμερές με το PMMA αλλά με σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή και παραμορφωσιμότητα. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε είναι ότι μπορεί να φθάσει μεγαλύτερες παραμορφώσεις από αυτές του PMMA, το οποίο αστοχεί υπό διαξονικές παραμορφώσεις μικρότερες της τάξης $\sim 0.45\%$

Για την επιβεβαίωση της λειτουργίας της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν ροζέτες επιμηκυνσιόμετρων τοποθετημένες στο κέντρο της δοκού. Οι ροζέτες είναι 90° και τοποθετήθηκαν παράλληλα προς τα μήκη της δοκού στις δύο κάθετες διευθύνσεις. Πράγματι οι μετρήσεις των επιμηκυνσιόμετρων επιβεβαίωσαν ότι το πεδίο παραμορφώσεων είναι διαξονικό και οι εφελκυστικές παραμορφώσεις έχουν ίδιο μέτρο στις δύο κάθετες διευθύνσεις κατά μήκος των διασταυρούμενων δοκών. (5)



Σχήμα 5.8: Πρόδρομη συσκευή εν ώρα λειτουργίας κάτω από το μικροσκόπιο Raman.



Σχήμα 5.9: Σχηματική παράσταση διάταξης κάμψης τεσσάρων σημείων σε δύο διευθύνσεις για την επιβολή διαξονικών παραμορφώσεων. (4)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

6.1 Πειραματική διάταξη για δι-αξονική καταπόνηση δισδιάστατων κρυστάλλων.

Η διάταξη που κατασκευάστηκε αποτελείται από μία βάση με τέσσερις ενσωματωμένες ροζέτες, στις οποίες προσαρμόζεται και συγκρατείται με πείρους το πολυμερικό εξάρτημα σχήματος σταυρού που εναποθέτουμε το προς εξέταση δυσδιάστατο υλικό.

Στο μέσο της βάσης αυτής είναι προσαρμοσμένο ένα μικρόμετρο του οποίου η ακίδα εφάπτεται στην κάτω επιφάνεια του κέντρου του σταυρού. Σκοπός του μικρομέτρου είναι η εξάλειψη των σφαλμάτων μέτρησης.

Η παραπάνω διάταξη που αναφέρεται χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, έχουν μελετηθεί οι διαστάσεις της διάταξης έτσι ώστε να είναι εφικτή η χρήση του μικροσκοπίου Raman, σε συγκεκριμένη θέση πάνω από την διάταξη.

Τέλος, προχωρήσαμε στον σχεδιασμό της πλάκας ως ένα σώμα, και όχι διαφορετικών μερών συνδεδεμένων μεταξύ τους.

6.2 Αναλυτική περιγραφή πειραματικής διάταξης.

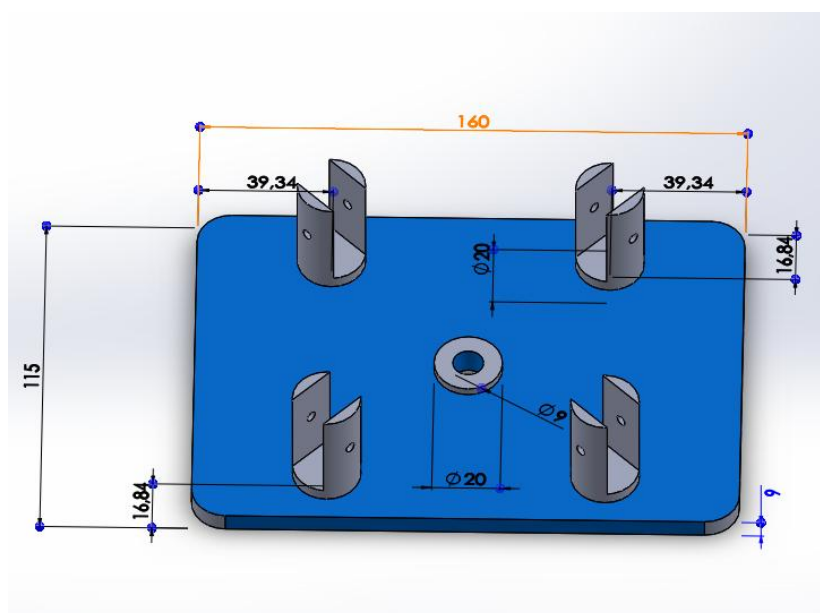
Όσον αφορά την διάταξη και το κατασκευαστικό μέρος της, παρακάτω αναλύονται τα βήματα κατά τον σχεδιασμό της προτεινόμενης διάταξης.

6.2.1 Σχεδιασμός και προτεινόμενη κατασκευή νέας πειραματικής διάταξης.

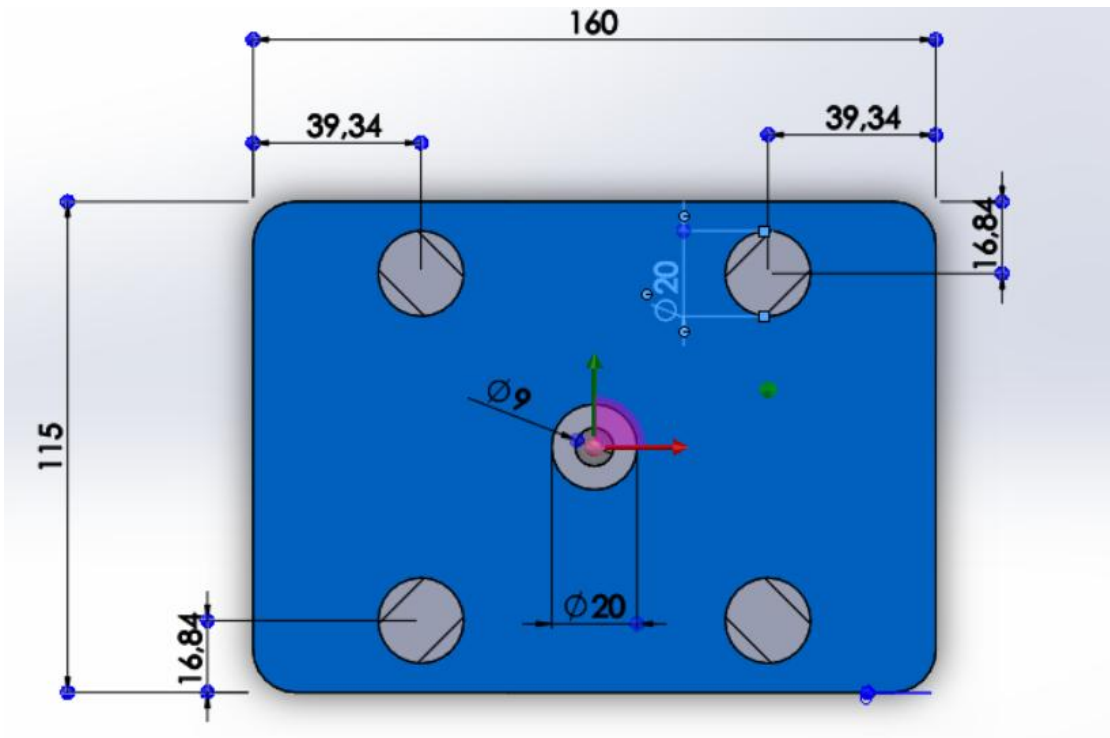
Η καινούργια βάση αποφασίσαμε να σχεδιαστεί στο μηχανολογικό σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks, και να κοπεί εξολοκλήρου σε αυτοματοποιημένου ελέγχου εργαλειομηχανή (CNC φρέζα κοπής), η οποία είναι διαθέσιμη στο εργαστήριο εργαλειομηχανών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Επιλέξαμε να κατασκευάσουμε με αυτόν τον τρόπο την νέα βάση, ώστε να επιτύχουμε υψηλή διαστατική ακρίβεια. Έτσι καταφέραμε να εξαλείψουμε όλα τα κατασκευαστικά λάθη και τις ατέλειες που μπορεί να προέλθουν στην διαδικασία μιας τέτοιας κατασκευής.

Η πορεία της κατασκευής είχε ως εξής:

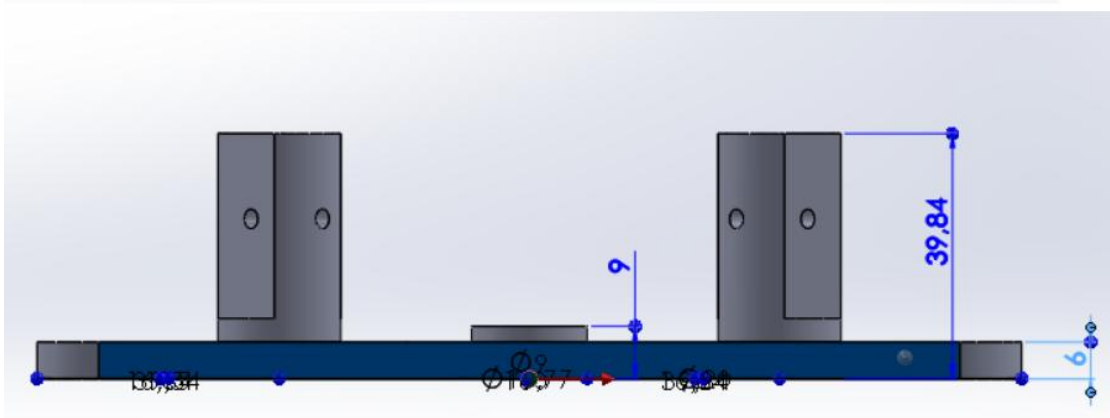
Αρχικά σχεδιάσαμε την βάση στο SolidWorks, δίνοντάς της τις διαστάσεις που είχαμε υπολογίσει ώστε να είναι εύκολο να τοποθετηθεί κάτω από το μικροσκόπιο Raman



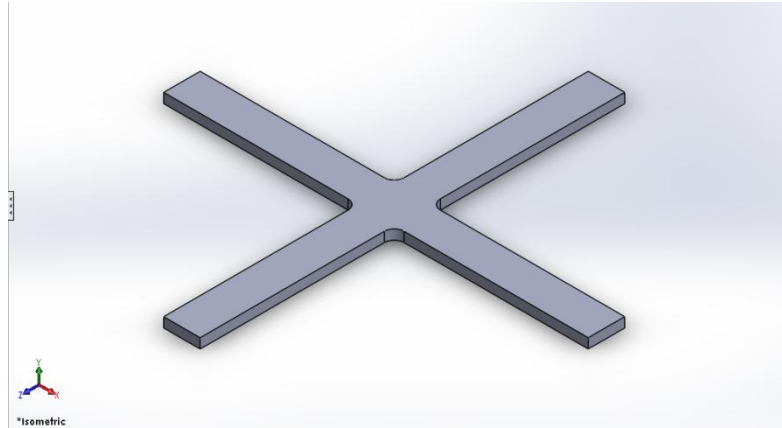
Σχήμα 6.1: Κατασκευή βάσης με την χρήση του προγράμματος SolidWorks.



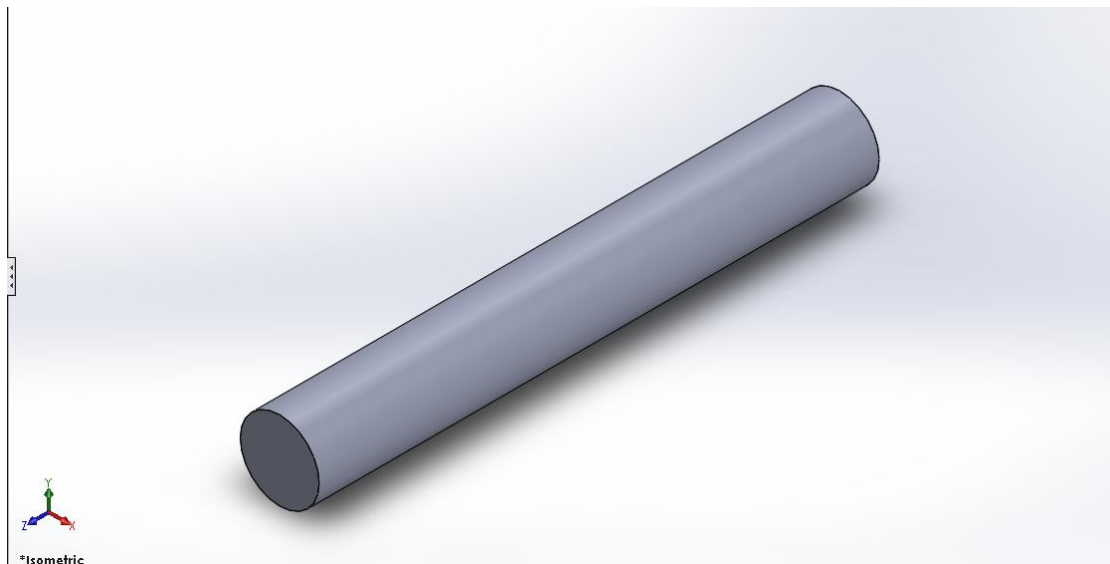
Σχήμα 6.2: Κάτοψη Βάσης



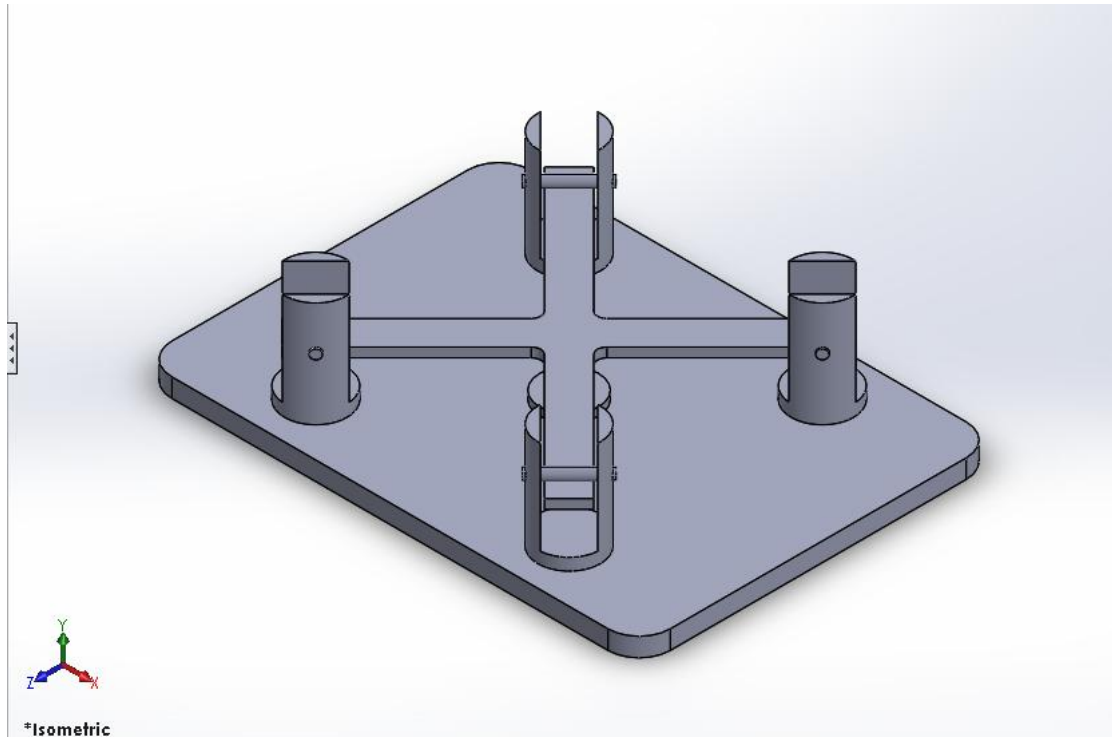
Σχήμα 6.3: Πρόοψη Βάσης



Σχήμα 6.4: Κατασκευή πολυμερικού εξαρτήματος σχήματος σταυρού με την χρήση του προγράμματος *SolidWorks*.



Σχήμα 6.5: Κατασκευή πυρών συγκράτησης του πολυμερικού εξαρτήματος με την χρήση προγράμματος *SolidWorks*. (4 στο σύνολο)



Σχήμα 6.6: Τελική συναρμολόγηση (assembly) διάταξης.

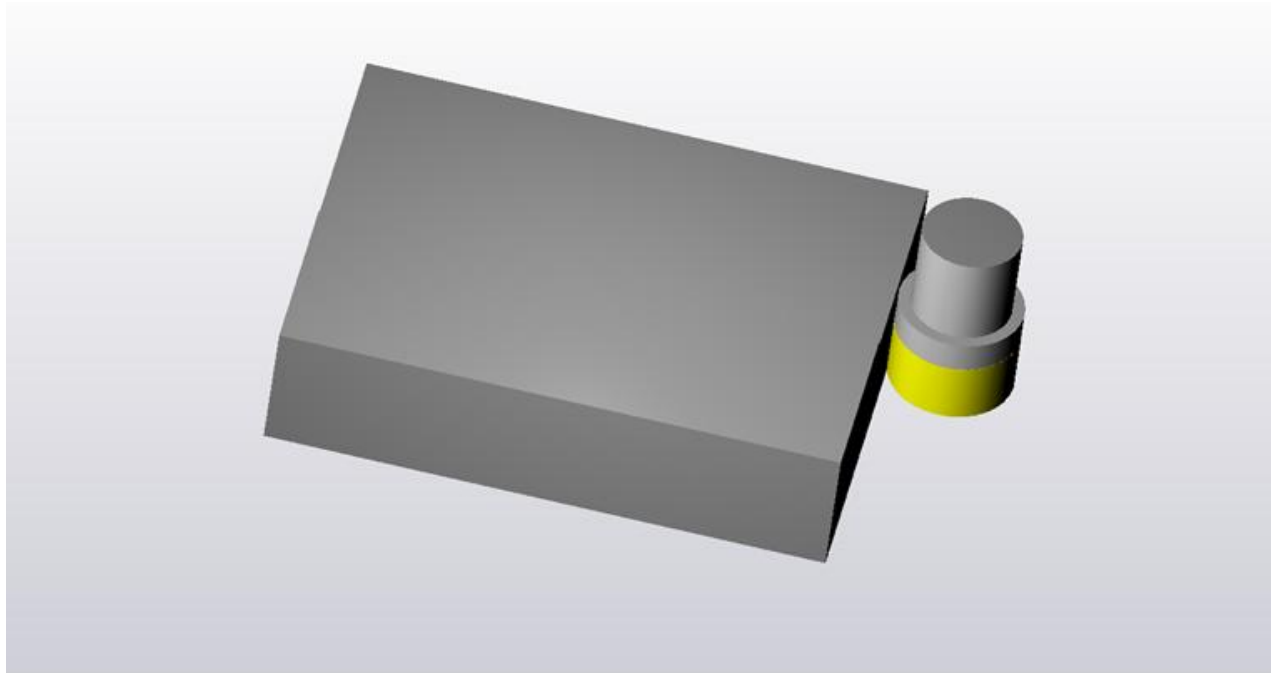
Στην συνέχεια επιλέξαμε το υλικό από το οποίο θα κατασκευαζόταν η βάση. Προτιμήσαμε το αλουμίνιο ώστε να έχουμε λιγότερο βάρος και συνεπώς πιο εύκολη χρήση αυτής. Συγκεκριμένα το αλουμίνιο είναι τύπου 7075-T6 και στο σχήμα 6.7 φαίνονται τα ακριβή χαρακτηριστικά του.

Property	Value	Units
Elastic Modulus	72000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Tensile Strength	570	N/mm ²
Yield Strength	505	N/mm ²
Tangent Modulus		N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	2.4e-005	/K
Mass Density	2810	kg/m ³
Hardening Factor	0.85	N/A

Σχήμα 6.7: Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικού βάσης.

Όλη την πορεία της κοπής την προσμοιάσαμε στο πρόγραμμα SolidCam, ώστε να είμαστε βέβαιοι για όλα τα βήματα της κοπής και της σειράς των βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν. Όπως επίσης να επιλέξουμε και τα κατάλληλα εργαλεία για την κοπή. Στην συνέχεια εξαγάγαμε τον κώδικα (Gcode) τον οποίο περάσαμε στην εργαλειομηχανή, ώστε να εκτελέσει τα βήματα της κοπής. Παρακάτω θα ακολουθήσουν φωτογραφίες και από την προσομοίωση της κοπής.

Προχωρήσαμε στην αγορά του προπλάσματος του αλουμινίου που χρειαζόμασταν. Τοποθετήσαμε το αλουμίνιο στο τραπέζι της φρέζας και το συγκρατήσαμε με τις 4 δέστρες που διαθέταμε. Ξεκινήσαμε την διαδικασία κοπής με το καθάρισμα του προσώπου του αλουμινίου ώστε να είναι λείο και καθαρό. Για την κατεργασία αυτή χρησιμοποιήσαμε συγκεκριμένο εργαλείο κοπής καθαρισμού (FaceMill) διαμέτρου 40 mm.

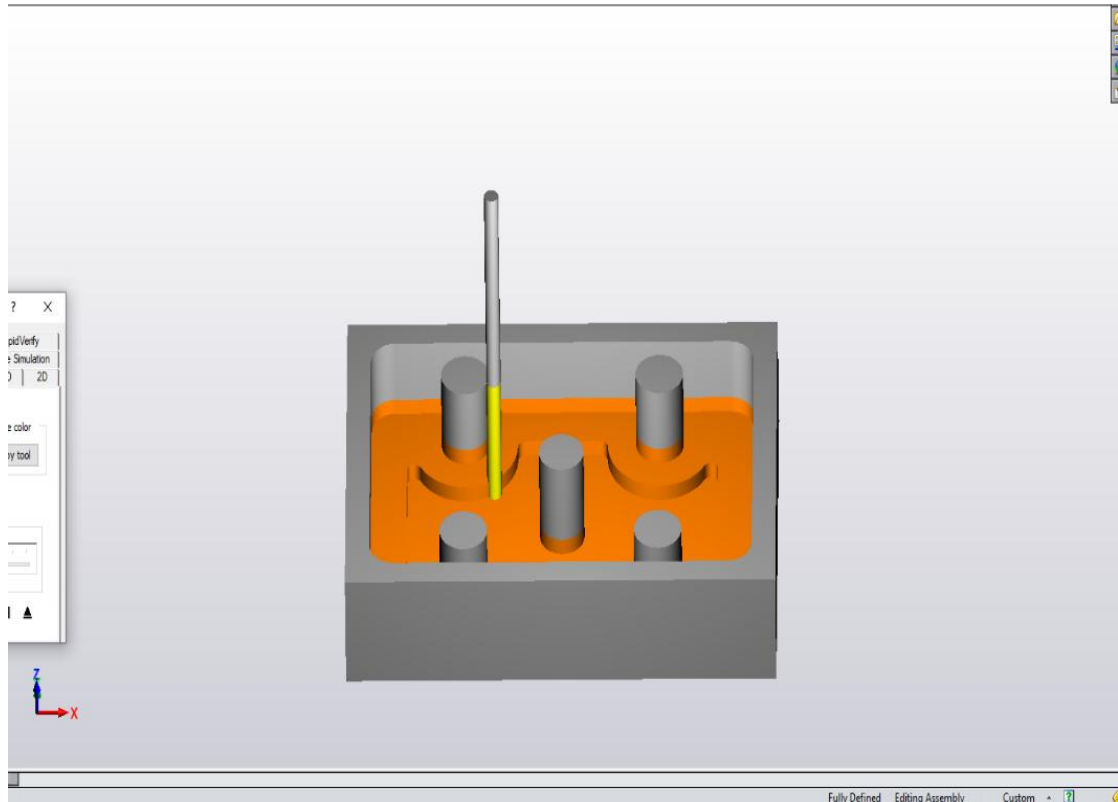


Σχήμα 6.8: Καθαρισμός προσώπου προπλάσματος (SolidCam).

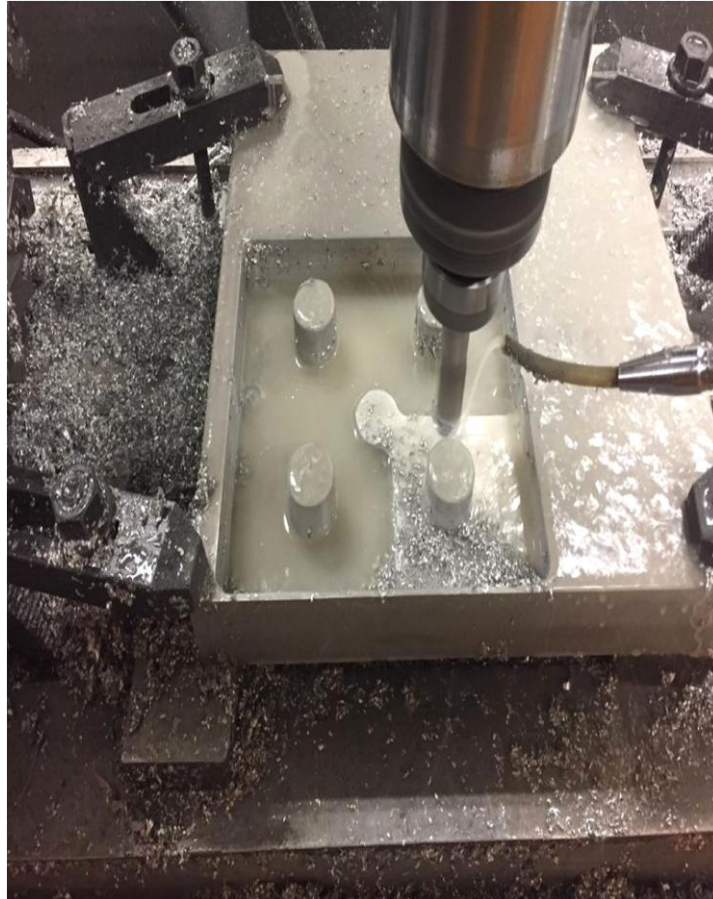


Σχήμα 6.9: Αρχικό στάδιο κοπής της βάσης με χρήση εργαλειομηχανής CNC.

Στην συνέχεια ακολούθησε η κοπή στο εσωτερικό της βάσης, η οποία πραγματοποιήθηκε με την χρήση κοπτικού εργαλείου (EndMill) διαμέτρου 6 mm και κατάλληλου μήκους ώστε να μην συγκρουστεί η μηχανή με το κομμάτι. Κατά την διάρκεια της κοπής είχαμε πάντα ανοικτό και το κοπτικό υγρό το οποίο βοηθά στην κοπή για μείωση της θερμοκρασίας και πιο ομοιόμορφη κοπή.

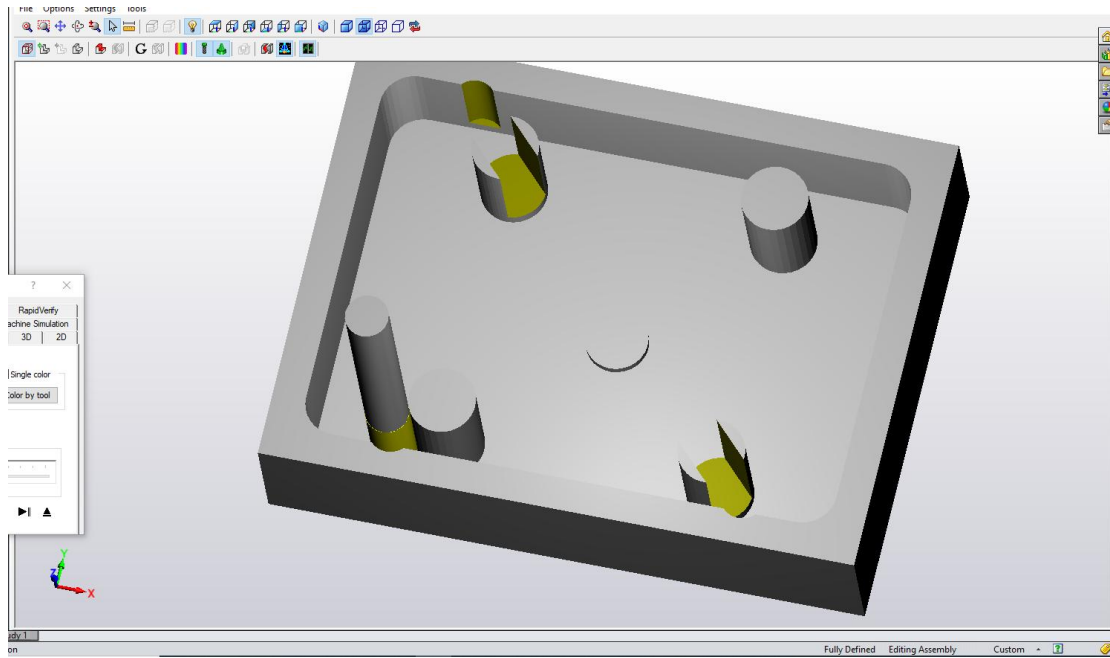


Σχήμα 6.10: Κοπή εσωτερικού βάσης (SolidCam).



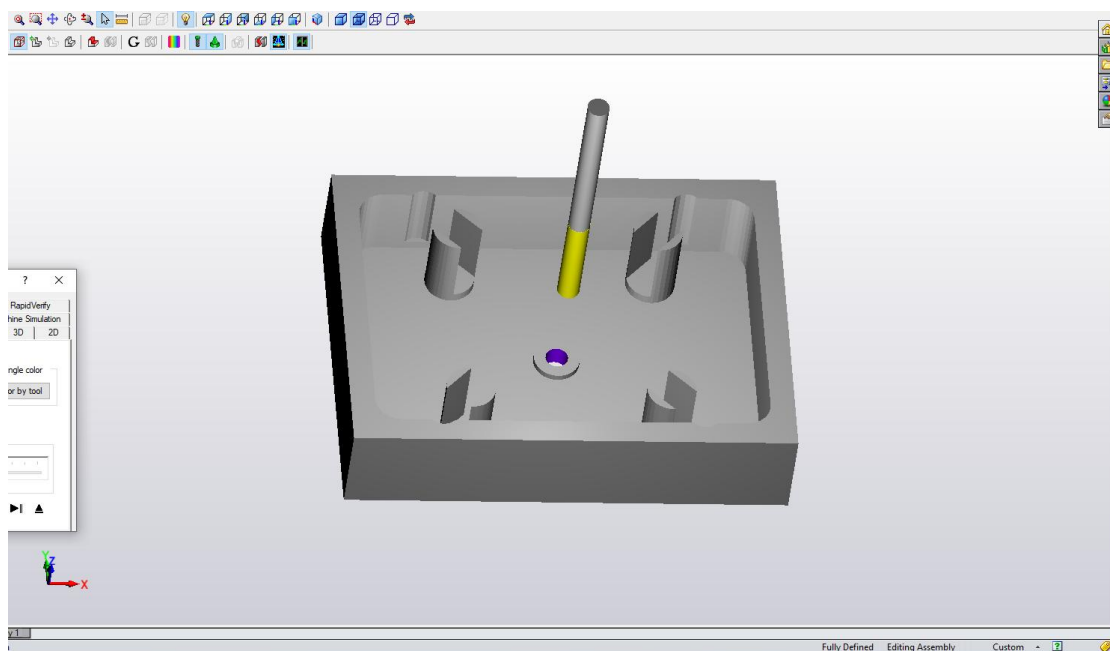
Σχήμα 6.11: Ενδιάμεση φάση κοπής της βάσης.

Το επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία των ροζετών που χρησιμοποιούνται για την συγκράτηση του σταυρού. Η κατεργασία αυτή έγινε με την χρησιμοποίηση EndMill διαμέτρου 13mm.



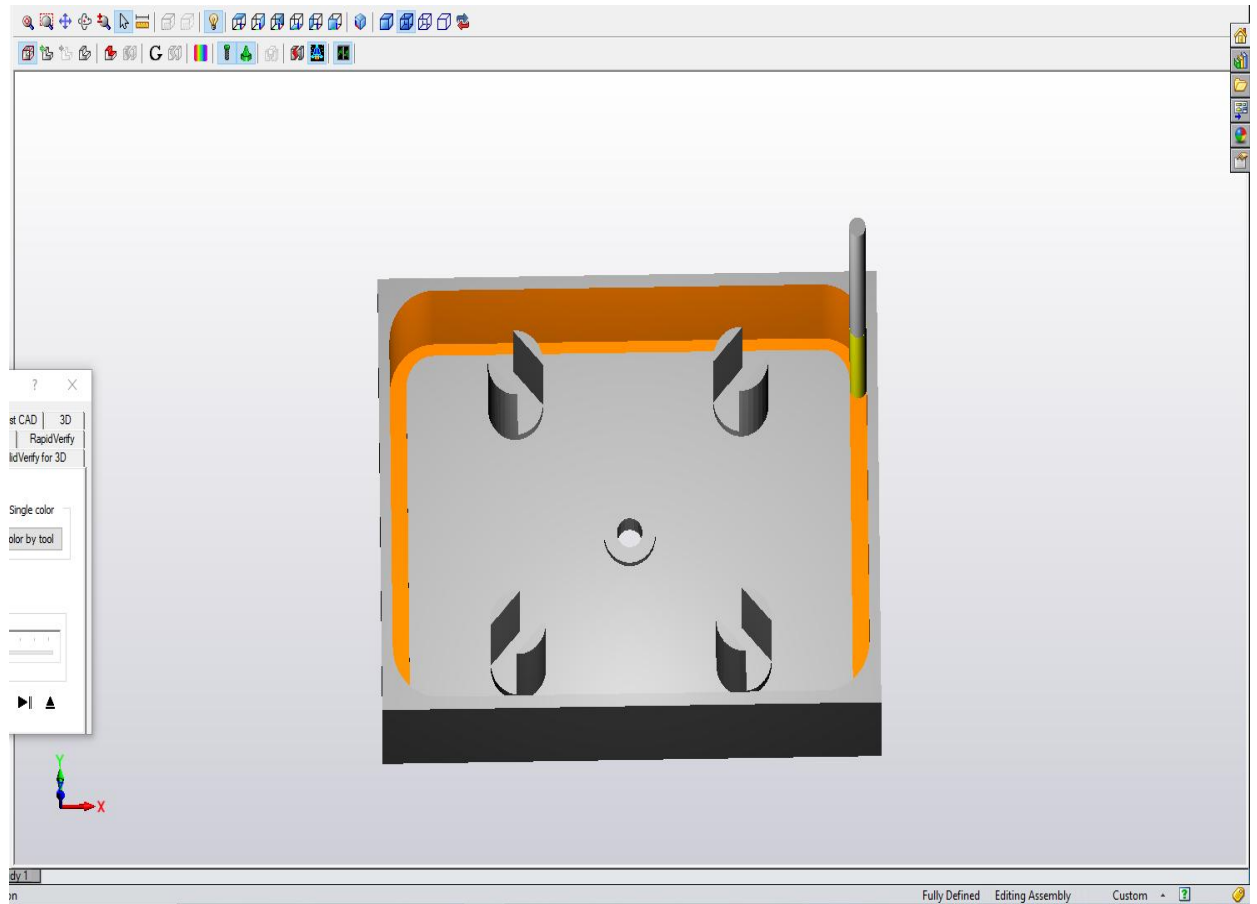
Σχήμα 6.12: Κοπή ροζετών (SolidCam).

Έπειτα ακολούθησε η διάτρηση της κεντρικής οπής στην οποία ενσωματώνεται το μικρόμετρο. Η διάτρηση έγινε με τρυπάνι διαμέτρου 9mm, με επαναλαμβανόμενη ράμφιση (G83).



Σχήμα 6.13: Διάτρηση εσωτερικής οπής (SolidCam).

Το τελικό βήμα της κοπής ήταν η κοπή του περιγράμματος, η οποία έγινε με την χρήση EndMill διαμέτρου 6mm,

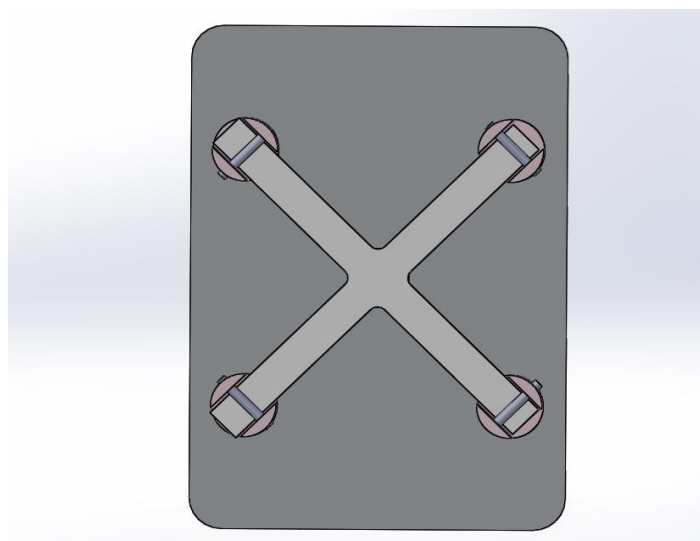


Σχήμα 6.14: Τελική διαδικασία κοπής βάσης (SolidCam).



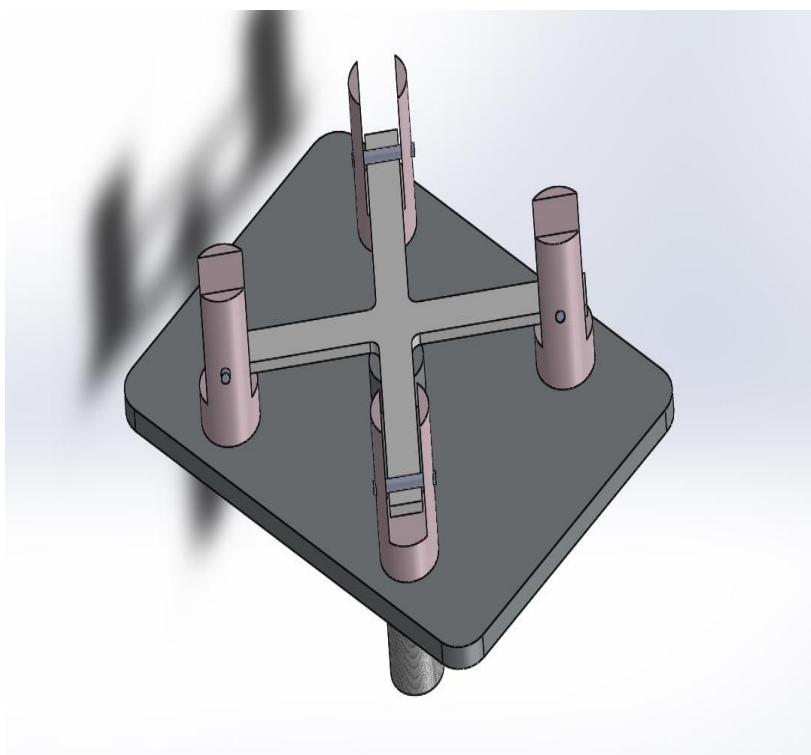
Σχήμα 6.15: Τελικό στάδιο διαμόρφωσης της βάσης.

6.2.2 Κατασκευή και Σχεδιασμός Υποστρώματος από ΡΜΜΑΣχήματος Σταυρού.



Σχήμα 6.16: Πολυμερικό εξάρτημα σταυρού.

Η μορφή της καμπύμενης δοκού έχει σχήμα σταυρού. Στα τέσσερα άκρα της στηρίζεται σε κυλίνδρους (άρθρωση) και στο κέντρο της έχει προσαρμοσθεί μικρόμετρο, το οποίο κάμπτεται προς τα άνω την δοκό σταυροειδούς σχήματος. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται εφελκυσμός και στις δύο διαστάσεις ίσου μέτρου στην άνω κεντρική επιφάνεια του πολυμερούς. Για τις δοκούς χρησιμοποιήθηκαν πολυμερή από πολυμεθακρυλικό μεθυλεστέρα (PMMA, Poly(methylmethacrylate)) και πολυκαρβονικό (polycarbonate, PC). Το PC είναι παρόμοιο πολυμερές με το PMMA αλλά με σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή και παραμορφωσιμότητα.



Σχήμα 6.17: Θέση του πολυμερικού εξαρτήματος σε σχέση με την βάση.

6.2.3 Καινοτομίες της νέας διάταξης.

Έχοντας λάβει υπόψη το σφάλμα της προηγούμενης συσκευής, λόγω της ύπαρξης της βίδας, η οποία είχε αποκλίσεις στη μέτρηση, προχωρήσαμε

στην προσθήκη μικρομέτρου (Σχήμα 6.18) προς αποφυγή σφαλμάτων που οδηγούσαν στην λανθασμένη συσχέτιση των μεγεθών. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το μικρόμετρο είναι ότι πρόκειται για το πιο διαδεδομένο όργανο μέτρησης ακρίβειας. Χρησιμοποιείται ευρέως στη μηχανολογία και ο τρόπος λειτουργίας του είναι τέτοιος ώστε η δύναμη μέτρησης να είναι πάντα ίδια. Γι' αυτό τον λόγο το μικρόμετρο αποτελεί το πιο αξιόπιστο και κατάλληλο όργανο μέτρησης. Έτσι εξαλείφτηκαν τυχόν φθορές οι οποίες υπήρχε περίπτωση να εμφανιστούν κατά την διάρκεια της διαδικασίας.

Επιπρόσθετα, με την εξ ολοκλήρου νέα κατασκευή της βάσης στο πρόγραμμα SolidWorks και την κοπή με την χρήση αυτοματοποιημένου συστήματος κοπής CNC, δημιουργήθηκε βάση η οποία αποτελείται από ένα σώμα βάσης-ροζετών πλέον, με αποτέλεσμα την διαστατική ακρίβεια και την εξάλειψη σφαλμάτων.

Τέλος, έγινε συγκεκριμένη μελέτη για την διαστασιολόγηση και την κατασκευή της βάσης, αλλά και του πολυμερικού εξαρτήματος, με σκοπό την εξασφάλιση των σωστών αποστάσεων και της σχετικής θέσης της διάταξης σε σχέση με το μικροσκόπιο Raman.



Σχήμα 6.18: Μικρόμετρο που ενσωματώθηκε, σχεδιασμένο στο πρόγραμμα SolidWorks.

6.3 Strain Gages

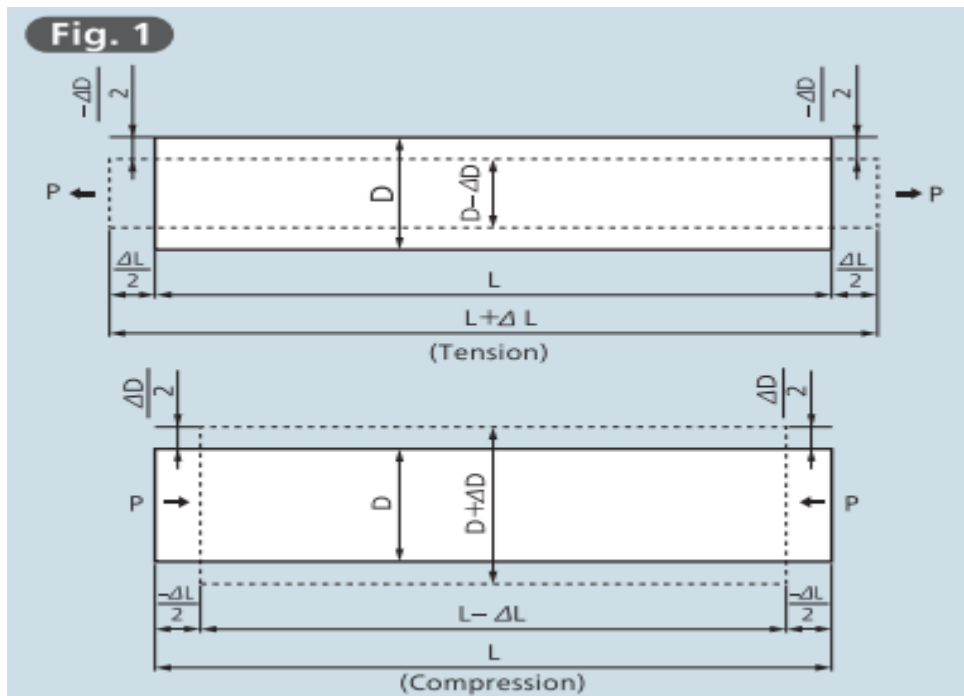
6.3.1 Εισαγωγή στα Strain Gages

Γενικότερα, ένας μετρητής τάσης (strain gage), ανιχνεύει μια διαστατική αλλαγή (καταπόνηση) ως ηλεκτρικό σήμα. Με την μέτρηση της καταπόνησης με τον μετρητή συνδεδεμένο με ένα υλικό ή δομή, η αντοχή ή η ασφάλεια θα είναι γνωστή. Αυτά, επιπλέον χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανίες όπως μηχανική αυτοκινήτων, ηλεκτρικών, και πολιτικών μηχανικών αλλά και στην ιατρική και στα τρόφιμα.

Ο μετρητής τάσης υιοθετείται επίσης ως αισθητήριο στοιχείο δύναμης, πίεσης, επιτάχυνσης, δόνησης, μετατόπισης και ροπής που χρησιμοποιείται για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της μέτρησης και του ελέγχου των γραμμών παραγωγής.(32)

6.3.2 Αρχή λειτουργίας του Strain Gage

Όταν ένα υλικό δέχεται δύναμη εφελκυσμού P , έχει τάση σ που αντιστοιχεί στην εφαρμοζόμενη δύναμη. Σε αναλογία με την πίεση, οι διατομές στενεύουν και το μήκος επιμηκύνει κατά ΔL από το μήκος L που είχε το υλικό πριν ασκήσουμε την εφελκυστική δύναμη, δηλαδή την αρχική του διάσταση.(32)



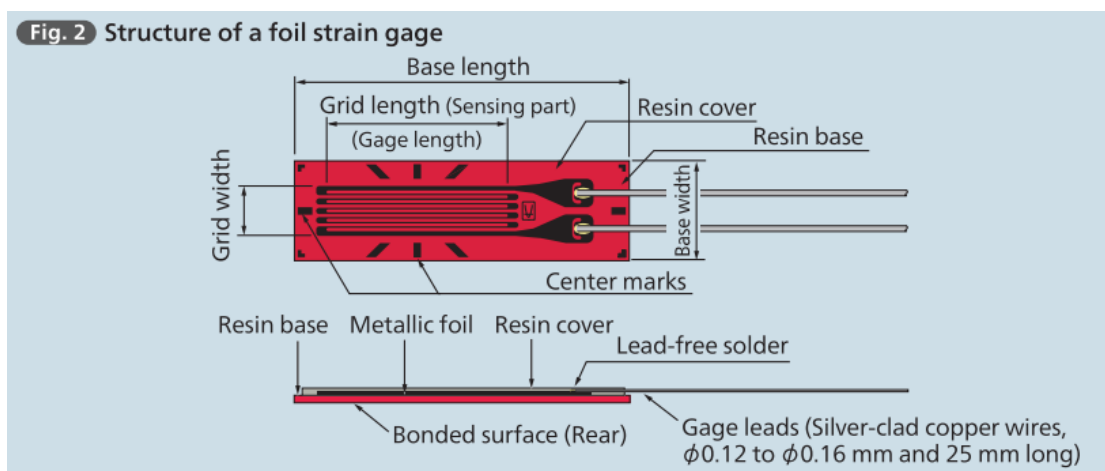
Σχήμα 6.19: Απεικόνιση διατομής του strain gage.(32)

Ένας μετρητής πίεσης, είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της καταπόνησης σε ένα αντικείμενο ο πιο συνηθισμένος τύπος περιτυπώματος καταπόνησης αποτελείται από ένα μονωτικό εύκαμπτο στήριγμα που υποστηρίζει ένα μεταλλικό σχέδιο αλουμινίου. Ο μετρητής προσαρτάται στο αντικείμενο μέσω κατάλληλης κόλλας, όπως κυανοακρυλικού. Καθώς το αντικείμενο παραμορφώνεται, το φύλλο παραμορφώνεται, προκαλώντας την αλλαγή της ηλεκτρικής του αντίστασης. Αυτή η αλλαγή αντίστασης, συνήθως μετριέται χρησιμοποιώντας γέφυρα Wheatstone, σχετίζεται με το στέλεχος από την ποσότητα που είναι γνωστή ως συντελεστής μέτρησης.

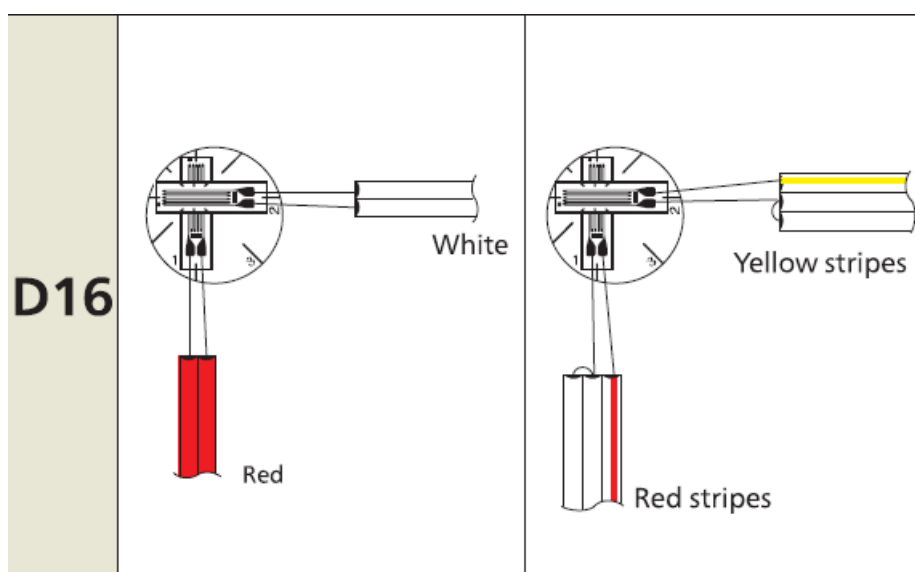
Ένας μετρητής τάσης εκμεταλλεύεται τη φυσική ιδιότητα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και την εξάρτησή του από τη γεωμετρία του αγωγού. Όταν ένας ηλεκτρικός αγωγός τεντώνεται εντός των ορίων την ελασικότητάς του έτσι ώστε να μην σπάει ή να παραμορφώνεται μόνιμα, θα γίνεται στενότερος και μακρύτερος, γεγονός που αυξάνει την ηλεκτρική του αντίσταση από άκρο σε άκρο. Αντίθετα, όταν ένας αγωγός συμπιέζεται έτσι ώστε να μην λυγίζει, θα διευρυνθεί και θα μειωθεί, γεγονός που μειώνει την ηλεκτρική του αντίσταση

από άκρο σε άκρο. Από τη μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση του μετρητή τάσης, μπορεί να συναχθεί το ποσό της επαγόμενης τάσης.

Ένας τυπικός μετρητής τάσης αποτελείται από μια μακριά, λεπτή αγωγίμη ταινία σε ένα σχέδιο ζιγκ-ζαγκ παράλληλων γραμμών. Η επιλογή του τύπου, εξαρτάται από την εκάστοτε διάταξη. Στην συγκεκριμένη διάταξη έγινε επιλογή του τύπου D16, λόγω της υπάρχουσας διάταξης σχήματος σταυρού. Παρακάτω απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του τύπου που έχει επιλεχθεί.(33)

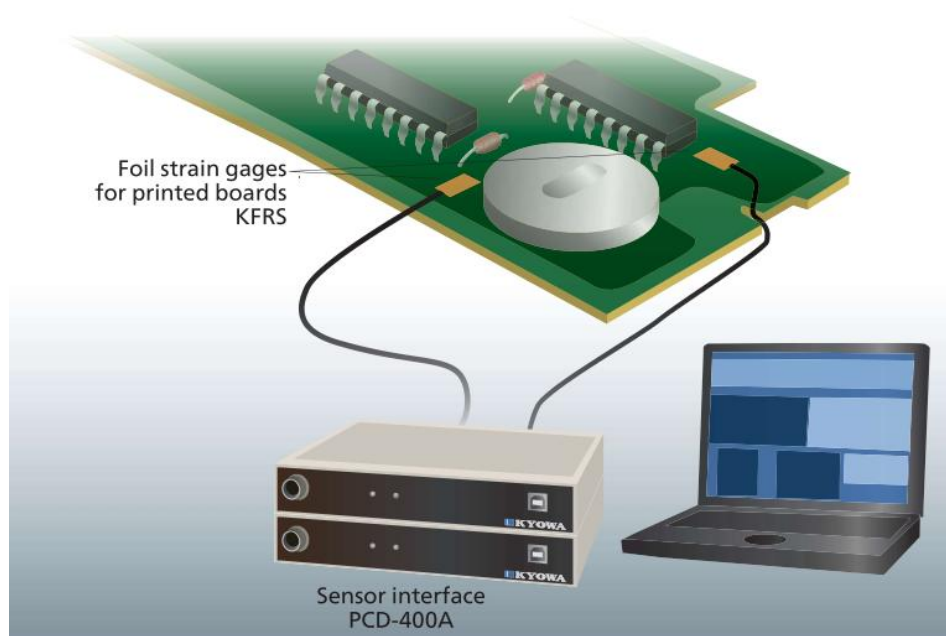


Σχήμα 6.20: Απεικόνιση δομής μεταλλικού φύλλου strain gage.(32)



Σχήμα 6.21: Strain Gage τύπου D16.(32)

Για την λήψη και επεξεργασία των παραμέτρων - μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο καταγραφικό συμβατό με πλαστικό υλικό. Το μοντέλο του καταγραφικού είναι το Sensor Interface PCD-400A. Παρακάτω απεικονίζεται το επιλεγόμενο μοντέλο και η διάταξή του.



Σχήμα 6.22: Μετρήσεις τάσεων όταν είναι τοποθετημένο ένα PCB.(32)

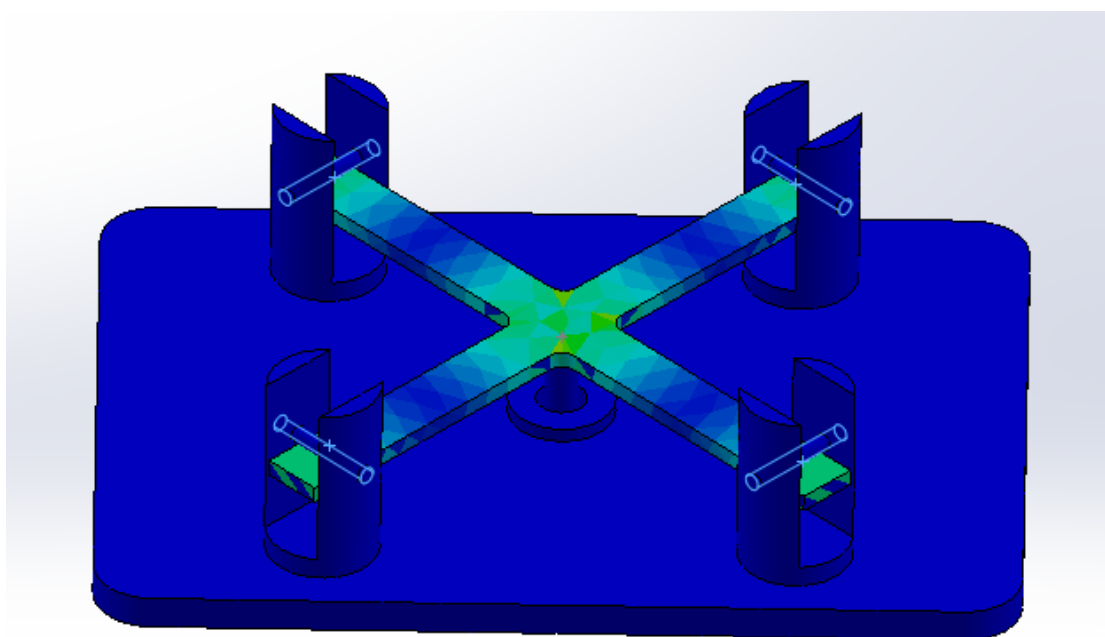
6.3.3 Βαθμονόμηση συσκευής με strain gages

Ο μετρητής τάσης προσαρτάται στην πάνω επιφάνεια του πολυμερικού εξαρτήματος, με χρήση κατάλληλης ρητίνης και κόλλας. Ο τύπος της ρητίνης και της κόλλας, εξαρτάται από το υλικό που εξετάζεται. Ο τύπος του μετρητή επιλέγεται βάση γεωμετρίας του εξεταζόμενου υλικού. Στην περίπτωση μας, επιλέχθηκε ο τύπος D16.

Ασκώντας συγκεκριμένη δύναμη στη κάτω επιφάνεια, στο μέσο του πολυμερικού εξαρτήματος, μετατοπίζεται η σχετική θέση του εξαρτήματος. Την μετατόπιση αυτή, το αρχικό μήκος, την τελική επιμήκυνση καθώς και την δύναμη που ασκείται, τα προσμετράμε και τα εισάγουμε με την χρήση ενός controller σε μια βάση δεδομένων, με στόχο την επεξεργασία και βαθμονόμηση της συσκευής. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SolidWorks,

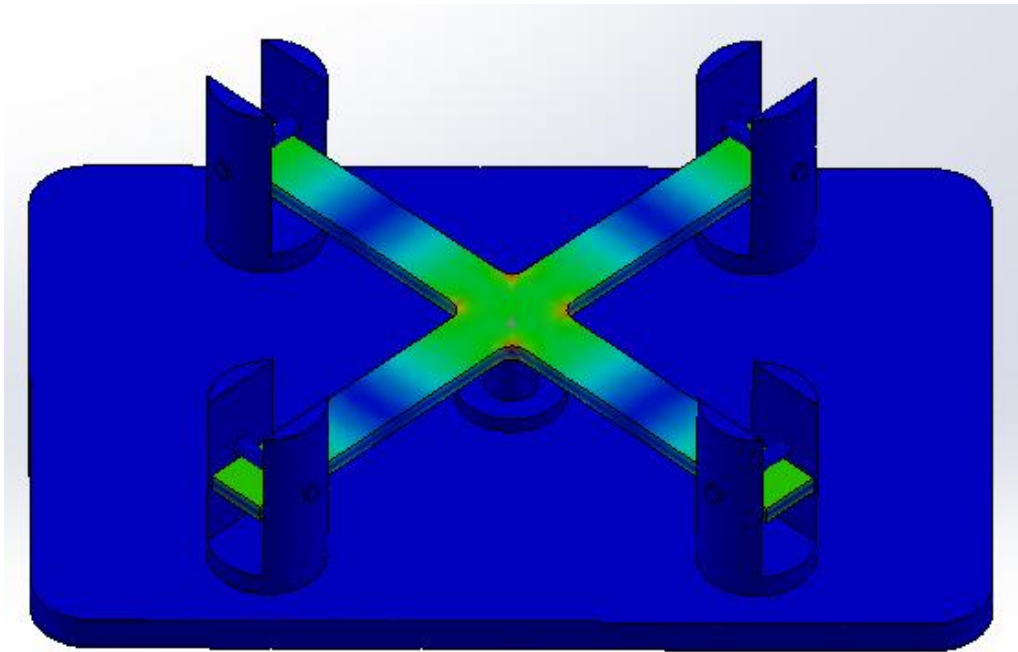
έχουμε την δυνατότητα να διακρίνουμε σε εικονική αναπαράσταση τις τάσεις που αναπτύσσονται πάνω στο εξάρτημα. Αποτέλεσμα είναι να παίρνουμε δεδομένα για τις διαφορών ειδών καταπονήσεις.

Με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήσαμε την ανάλυση των τάσεων που δέχεται ο πολυμερικός σταυρός κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της διαδικασίας. Για να επιτύχουμε αυτήν την ανάλυση χρησιμοποιήσαμε το SolidWorks Simulation. Εκεί ορίσαμε τις κατάλληλες παραμέτρους, όπως το είδος στήριξης ανάμεσα στους ήλους και τον σταυρό και το σημείο στο οποίο ασκείται η μετατόπιση από την άκρη του μικρομέτρου στον σταυρό. Η στήριξη που χρησιμοποιήσαμε είναι κύλιση και η μετατόπιση που ορίσαμε είναι της τάξεως των 100 μm . Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες κατά την διαδικασία χρήσης του προγράμματος SolidWorks Simulation.

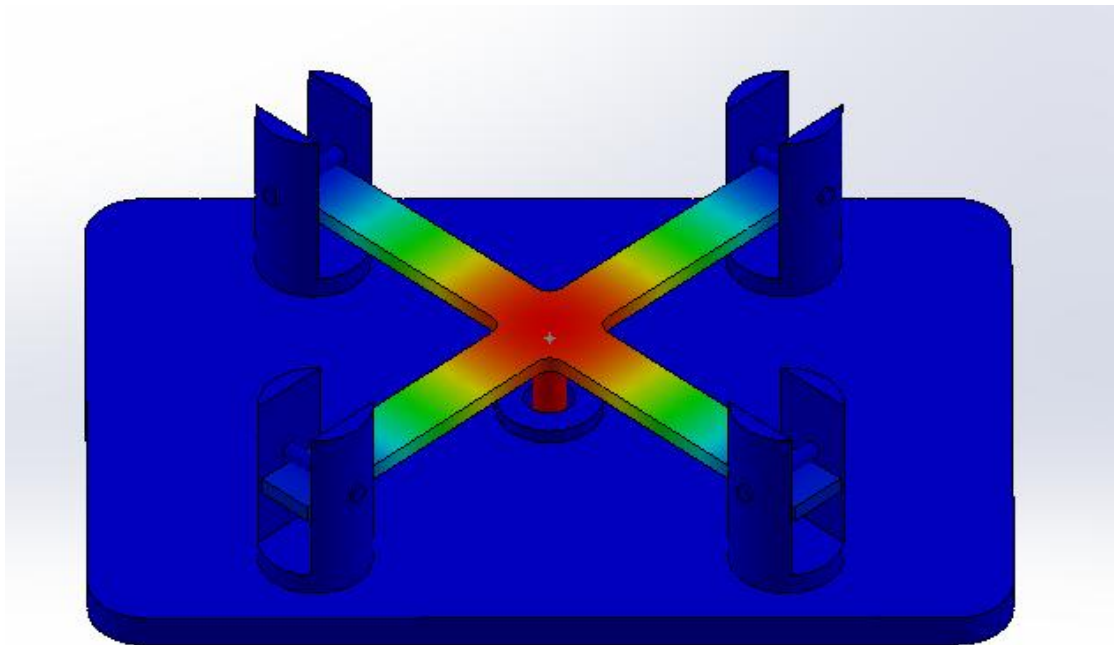


Σχήμα 6.23: Εικονική αναπαράσταση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και απεικόνιση της έντασης των καταπονήσεων.

Στην παραπάνω αναπαράσταση σχήμα 6.23 βλέπουμε ότι η τάση που δέχεται ο σταυρός είναι συσσωρευμένη στο κέντρο του καθώς σε εκείνο το σημείο δέχεται την καταπόνηση



Σχήμα 6.24: Εικονική αναπαράσταση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και απεικόνιση της έντασης των καταπονήσεων(σε N/m^2).



Σχήμα 6.25: Εικονική αναπαράσταση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και απεικόνιση της μετατόπισης

Στο παραπάνω σχήμα 6.25 απεικονίζεται η μετατόπιση που επιβάλλεται στον σταυρό, με το σημείο που απορροφά την πιο μεγάλη μετατόπιση να είναι πάλι το κέντρο του σταυρού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή είχε στόχο την εξέταση της μηχανικής συμπεριφοράς των δισδιάστατων υλικών που εναποτέθηκαν πάνω στην επιφάνεια του πολυμερικού εξαρτήματος σχήματος σταυρού με την χρήση συγκεκριμένων τεχνικών. Στο πειραματικό κομμάτι, έγινε εκτενής μελέτη, όσον αφορά την γεωμετρική κατασκευή της. Αρχικά, υπήρξε μελέτη της διάταξης και καταλήξαμε στην συγκεκριμένη τελική μορφή της. Έπειτα, με την χρήση κατάλληλων σχεδιαστικών προγραμμάτων, όπως SolidWorks, έγινε δημιουργία της διάταξης σε τρισδιάστατο περιβάλλον με χρήση συγκεκριμένων διαστάσεων ώστε να υπάρχει ευελιξία ως προς την χρήση της.

Σε επόμενη φάση έγινε προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του πολυμερικού εξαρτήματος σχήματος σταυρού σε σχέση με τα επιμέρους εξαρτήματα, αλλά και της συνολικής συμπεριφοράς της διάταξης. Το πρόγραμμα που επιλέξαμε ήταν το SolidWorks Simulation. Αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν η λήψη δεδομένων, όσον αφορά τις τάσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια του πολυμερικού εξαρτήματος.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήσαμε ότι το πιο σημαντικό εύρημα της μελέτης, αποτελεί η προσθήκη μικρομέτρου. Με την προσθήκη αυτή εξαλείφθηκαν σφάλματα που προϋπήρχαν στην διάταξη τα οποία προέρχονταν από την βίδα που υπήρχε και δημιουργούσε αποκλίσεις στη μέτρηση.

Τέλος, με την χρήση κατάλληλων οργάνων Strain Gages, πραγματοποιήσαμε βαθμονόμηση της διάταξης ταυτόχρονα σε όλες τις διευθύνσεις και καταλήξαμε στη συσχέτιση των μεγεθών και στην εξάλειψη των σφαλμάτων των μετρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Μελλοντικές Προτάσεις

Γενικότερα, όσον αφορά τους δισδιάστατους κρυστάλλους, το ερευνητικό τους πεδίο γίνεται ολοένα και πιο ενδιαφέρον. Μελλοντικά, θα υπάρξουν περισσότερα νέα υλικά προς μελέτη. Έτσι θα υπάρξει αναγκαιότητα να πραγματοποιηθούν πειράματα καταπονήσεων παρόμοιου τύπου με της εργασίας αυτής. Όσον αφορά την διαξονική παραμόρφωση αυτών των υλικών θα χρησιμοποιηθεί η συσκευή που προαναφέραμε. Η συσκευή αυτή μελλοντικά είναι δυνατόν να υποστεί κάποιες επιπρόσθετες βελτιώσεις. Οι βελτιώσεις αυτές έχουν να κάνουν με την διόρθωση του σφάλματος και την ακρίβεια του οργάνου, που χρησιμοποιείται για την μετακίνηση του πολυμερικού εξαρτήματος. Μελλοντικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιο όργανο ψηφιακού τύπου, το οποίο θα αποθηκεύει τις μετρήσεις σε μια βάση δεδομένων. Ενδεικτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια μητρική πλακέτα Arduino. Τέλος, σε μεταγενέστερο στάδιο θα εξεταστεί η δυνατότητα προσθήκης περαιτέρω εξαρτημάτων για μεγαλύτερη διευκόλυνση και ακρίβεια μετρήσεων.

9. Βιβλιογραφία

1. *Experimentally derived axial stress–strain relations graphene.*
2. Novoselov, K. S., και συνεργά. *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films.* [Ηλεκτρονικό] 22 Οκτώβριος 2004.
<https://science.sciencemag.org/content/306/5696/666>.
3. Αναστασία-Σοφία, Φιλατζικιώτη. *Χαρακτηρισμός Στρωμάτων Γραφενίου που παρασκευάστηκαν μέσω Μικρομηχανικής Αποφλοίωσης Γραφίτη.* Αθήνα : s.n., 2014.
4. Γ., Τσουκλέρη. *Μηχανική και Φασματοσκοπική Μελέτη Ενισχυτικών Μέσων με Βάση το Γραφένιο και Προτύπων Πολυμερικών Σύνθετων Υλικών.* ΠΑΤΡΑ : s.n., 2013.
5. Χαράλαμπος, Ανδρουλιδάκης. *Αναλυτική και Πειραματική Διερεύνηση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Μεμβρανών Γραφενίου υπό την Επίδραση Αξονικών Καταπονήσεων.* Πάτρα : s.n., 2016. Διδακτορική Διατριβή.
6. Xu, Zhanwei, και συν. *Large-scale production of graphene by microwave synthesis and rapid cooling.* [Εφημερίδα] Κίνα : s.n., 2011.
7. Ανδρουλιδάκης, Χαράλαμπος, και συν. *Scientific Reports. Failure Processes in Embedded Monolayer Graphene under Axial Compression.* [Ηλεκτρονικό] 12 Ιούνιος 2014. <https://www.nature.com/articles/srep05271>.
8. *Recent Advances in Graphene Based Humidity Sensors.*
9. Saint Jean Carbon Science Company. *Applications And Uses- Graphene.*
10. <http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2616>.
11. Graphenea. [Ηλεκτρονικό]
<https://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.Xl477qgzaUk>.
12. Γιαμινι, Σιγιαβα Αμιναλραγια. *Γραφένιο και δισδιάστατα υλικά για εφαρμογές στη Νανοηλεκτρονική.* Αθήνα : 2017.

13. The Graphene Experts. *Graphene Applications: What is Graphene used for?* [Άρθρο] 2019.

14. Zion Market Research. Zion Market Research. [Ηλεκτρονικό] 13 Σεπτεμβρίου 2017. <https://www.zionmarketresearch.com/news/graphene-market>.

15. Αντώνιος, Μιχαήλ. *Σύνθεση και οπτική φασματοσκοπία δισδιάστατων κρυστάλλων MoS₂*. Πάτρα : s.n., 2016. Ειδική Ερευνητική Εργασία.

16. Μυρσίνη, Νούση. *Χαμιλτονιανή και πρόβλημα ιδιοτιμών για μονοστρωματικό Mos₂*. 2019. Διπλωματική Εργασία.

17. *Electronic properties of MoS₂ nanoparticles*. T.Li and Galli, G. 2007, The Journal of Physical Chemistry, pp. 16192-16196.

18. Εμμανουήλ, Σπηλιάρωτης. *Νανοτεχνολογία για Ενεργειακές Εφαρμογές*. Μεταπτυχιακή Εργασία.

19. Λάμπρος, Σερεμέτης. *Μελέτη της αλληλεπίδρασης Γραφενίου/Πολυμερικού Υποστρώματος μέσω Φασματοσκοπίας Raman*. Πάτρα : s.n., 2013. Μεταπτυχιακή Εργασία.

20. Wikipedia. *Δισουλφίδιο του Βολφραμίου*.

21. Science Direct
.Superlubricity of Tungsten Disulfide Coatings in Ultra High Vacuum. Masanori, Iwaki : s.n., 2007.

22. Technical Memorandum. *Investigation of Molybdenum Disulfide and Tungsten Disulfide as Additives of Coatings for Foul Release Systems* Materials Engineering and Research Laboratory.

23. WS2 Coatings Ltd. ws2.co.uk. [Ηλεκτρονικό]
<https://www.ws2.co.uk/engineering-ws2-applications.php>.

24. Ράπτης, Ι. *Φασματοσκοπία Raman*. [Σημειώσεις Μαθήματος "Μέθοδοι Χαρακτηρισμού Υλικών"] Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.

25. Απόστολος, Κορδάτος. *Ανάπτυξη γραφενίου και δομικός χαρακτηρισμός σε μονοκρυσταλλικά υποστρώματα μετάλλων*. 2015.
26. Childres, Isaac, και συν. *Raman Spectroscopy of Graphene and Related Materials*.
27. Πανεπιστήμιο Πειραιά. *Οπτική και Ηλεκτρονική Μικροσκοπία*. [Σημειώσεις Μαθήματος] Αθήνα : s.n.
28. Σπυρίδων, Γραμματικόπουλος Δ. *Μελέτη, χαρακτηρισμός και ιδιότητες νέων υλικών υψηλής τεχνολογίας*. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα : s.n., 2013. Διδακτορική Διατριβή.
29. Future Labs. *Scanning Electron Microscope*. s.l. : http://www.futurelabs.co.in/?page_id=28.
30. The University of Newcastle Australia. newcastle.edu.au. *newcastle.edu.au*. [Ηλεκτρονικό] <https://www.newcastle.edu.au/research-and-innovation/resources/central-scientific-services/emx/tem>.
31. Ανεστόπουλος, Δ., και συν. *MoS2 and WS2 Bilayer Crystals Under Biaxial Strain*. Πάτρα : s.n., 2017. Επιστημονικό Άρθρο.
32. Strain Gages. *Strain Gages*. Πληροφορίες PDF.
33. Wikipedia. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki>. [Ηλεκτρονικό] https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge.

10. Παράρτημα

10.1 Κώδικας GCode

%

O5000 (BASH)

N100 (COMPENSATION-WEAR)

N102 (REV-0.70)

N104 (JUL-10-2020-6:16:46PM)

N106 (TOOL 1 - DIA 40.)

N108 (TOOL 2 - DIA 6.)

N110 (TOOL 3 - DIA 13.)

N112 (TOOL 4 - DIA 9.)

N1 G90 G17 G40 G80 G00

N114 M06 T1 ()

N116 T2

N118 (FM-facemill)

N120 G00 G54 G90 X-34. Y119.9998 S1500 M03

N122 G43 H1 Z50.

N124 Z10.

N126 Z5.

N128 G01 Z0. F33.

N130 X194. F100.

N132 Y94.9999 F200.

N134 X-34. F100.

N136 Y70. F200.

N138 X194. F100.

N140 Y45. F200.

N142 X-34. F100.

N144 Y20.0001 F200.

N146 X194. F100.

N148 Y-4.9998 F200.

N150 X-34. F100.

N152 G00 Z10.

N154 M05

N156 M01

N2 G90 G17 G40 G80 G00

N158 M06 T2 ()

N160 T3

N162 (P-contour2)

N164 G00 G54 G90 X64.9842 Y59.9713 S1000 M03

N166 G43 H2 Z50.

N168 Z10.

N170 Z2.

N172 G01 Z-5.64 F33.

N174 G02 X60.852 Y57.5 I-25.6442 J38.1887 F100.

N176 X68.8354 Y52.139 I-21.512 J-40.66

N178 X68.8354 Y62.861 I11.1646 J5.361

N180 X64.9842 Y59.9713 I-29.4954 J35.299

N182 G01 X63.3117 Y62.4619

N184 G02 X53.3316 Y57.5 I-23.9717 J35.6981

N186 X74.8451 Y41.0966 I-13.9916 J-40.66

N188 G01 X77.3223 Y42.789

N190 G02 X79.6505 Y39. I-37.9822 J-25.949

N192 G01 X80.3495

N194 G02 X85.361 Y46.3354 I40.3105 J-22.16

N196 X74.639 Y46.3354 I-5.361 J11.1646

N198 X77.3223 Y42.789 I-35.299 J-29.4954
N200 G01 X74.8451 Y41.0966
N202 G02 X77.8354 Y36. I-35.5051 J-24.2566
N204 G01 X82.1646
N206 G02 X96.6883 Y52.5381 I38.4954 J-19.16
N208 G01 X95.0158 Y55.0287
N210 G02 X99.148 Y57.5 I25.6442 J-38.1887
N212 X91.1646 Y62.861 I21.512 J40.66
N214 X91.1646 Y52.139 I-11.1646 J-5.361
N216 X95.0158 Y55.0287 I29.4954 J-35.299
N218 G01 X96.6883 Y52.5381
N220 G02 X106.6684 Y57.5 I23.9717 J-35.6981
N222 X85.1549 Y73.9034 I13.9916 J40.66
N224 G01 X82.6777 Y72.211
N226 G02 X80.3495 Y76. I37.9822 J25.949
N228 G01 X79.6505
N230 G02 X74.639 Y68.6646 I-40.3105 J22.16
N232 X74.639 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N234 X85.361 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N236 X82.6777 Y72.211 I35.299 J29.4954
N238 G01 X85.1549 Y73.9034
N240 G02 X82.1646 Y79. I35.5051 J24.2566
N242 G01 X77.8354
N244 G02 X63.3117 Y62.4619 I-38.4954 J19.16
N246 G01 X61.6393 Y64.9524
N248 G02 X33. Y58.6656 I-22.2993 J33.2076
N250 G01 Y56.3344
N252 G02 X75.9304 Y33. I6.34 J-39.4944
N254 G01 X84.0696
N256 G02 X127. Y56.3344 I36.5904 J-16.16
N258 G01 Y58.6656
N260 G02 X84.0696 Y82. I-6.34 J39.4944

N262 G01 X75.9304
N264 G02 X61.6393 Y64.9524 I-36.5904 J16.16
N266 G01 X59.9668 Y67.443
N268 G02 X30. Y62.3583 I-20.6268 J30.717
N270 G01 Y52.6417
N272 G02 X73.9205 Y30. I9.34 J-35.8017
N274 G01 X86.0795
N276 G02 X130. Y52.6417 I34.5805 J-13.16
N278 G01 Y62.3583
N280 G02 X86.0795 Y85. I-9.34 J35.8017
N282 G01 X73.9205
N284 G02 X59.9668 Y67.443 I-34.5806 J13.16
N286 G01 X58.2944 Y69.9336
N288 G02 X27. Y66.4784 I-18.9544 J28.2264
N290 G01 Y48.5216
N292 G02 X71.7865 Y27. I12.34 J-31.6816
N294 G01 X88.2135
N296 G02 X133. Y48.5216 I32.4465 J-10.16
N298 G01 Y66.4784
N300 G02 X88.2135 Y88. I-12.34 J31.6816
N302 G01 X71.7865
N304 G02 X58.2944 Y69.9336 I-32.4465 J10.16
N306 G01 X56.6219 Y72.4241
N308 G02 X24. Y71.2215 I-17.2819 J25.7359
N310 G01 Y43.7785
N312 G02 X69.5018 Y24. I15.34 J-26.9385
N314 G01 X90.4982
N316 G02 X136. Y43.7785 I30.1618 J-7.16
N318 G01 Y71.2215
N320 G02 X90.4982 Y91. I-15.34 J26.9385
N322 G01 X69.5018
N324 G02 X56.6219 Y72.4241 I-30.1618 J7.16

N326 G01 X54.9495 Y74.9147
N328 G02 X21. Y77.0024 I-15.6095 J23.2453
N330 G01 Y37.9976
N332 G02 X67.0292 Y21. I18.34 J-21.1576
N334 G01 X92.9708
N336 G02 X139. Y37.9976 I27.6892 J-4.16
N338 G01 Y77.0024
N340 G02 X92.9708 Y94. I-18.34 J21.1576
N342 G01 X67.0292
N344 G02 X54.9495 Y74.9147 I-27.6892 J4.16
N346 G01 X53.277 Y77.4053
N348 G02 X18. Y85.1368 I-13.937 J20.7547
N350 G01 Y29.8632
N352 G02 X64.3131 Y18. I21.34 J-13.0232
N354 G01 X95.6869
N356 G02 X142. Y29.8632 I24.9731 J-1.16
N358 G01 Y85.1368
N360 G02 X95.6869 Y97. I-21.34 J13.0232
N362 G01 X64.3131
N364 G02 X53.277 Y77.4053 I-24.9731 J1.16
N366 G01 X51.6046 Y79.8958
N368 G02 X17.4171 Y100. I-12.2646 J18.2642
N370 G01 X15.
N372 Y15.
N374 X17.4171
N376 G02 X61.2629 Y15. I21.9229 J1.84
N378 G01 X98.7371
N380 G02 X142.5829 Y15. I21.9229 J1.84
N382 G01 X145.
N384 Y100.
N386 X142.5829
N388 G02 X98.7371 Y100. I-21.9229 J-1.84

N390 G01 X61.2629
N392 G02 X51.6046 Y79.8958 I-21.9229 J-1.84
N394 G01 X49.9322 Y82.3864
N396 G02 X20.9668 Y103. I-10.5921 J15.7736
N398 G01 X12.
N400 Y12.
N402 X20.9668
N404 G02 X57.7132 Y12. I18.3732 J4.84
N406 G01 X102.2868
N408 G02 X139.0332 Y12. I18.3732 J4.84
N410 G01 X148.
N412 Y103.
N414 X139.0332
N416 G02 X102.2868 Y103. I-18.3732 J-4.84
N418 G01 X57.7132
N420 G02 X49.9322 Y82.3864 I-18.3732 J-4.84
N422 G01 X48.2597 Y84.877
N424 G02 X25.3924 Y106. I-8.9197 J13.283
N426 G01 X10.
N428 G03 X9. Y105. I0. J-1.
N430 G01 Y10.
N432 G03 X10. Y9. I1. J0.
N434 G01 X25.3924
N436 G02 X53.2876 Y9. I13.9476 J7.84
N438 G01 X106.7124
N440 G02 X134.6076 Y9. I13.9476 J7.84
N442 G01 X150.
N444 G03 X151. Y10. I0. J1.
N446 G01 Y105.
N448 G03 X150. Y106. I-1. J0.
N450 G01 X134.6076
N452 G02 X106.7124 Y106. I-13.9476 J-7.84

N454 G01 X53.2876

N456 G02 X48.2597 Y84.877 I-13.9476 J-7.84

N458 G01 X46.5873 Y87.3675

N460 G02 X32.164 Y109. I-7.2473 J10.7925

N462 G01 X10.

N464 G03 X6. Y105. I0. J-4.

N466 G01 Y10.

N468 G03 X10. Y6. I4. J0.

N470 G01 X32.164

N472 G02 X32.164 Y6. I7.176 J10.84

N474 X46.516 Y6. I7.176 J10.84

N476 G01 X113.484

N478 G02 X113.484 Y6. I7.176 J10.84

N480 X127.836 Y6. I7.176 J10.84

N482 G01 X150.

N484 G03 X154. Y10. I0. J4.

N486 G01 Y105.

N488 G03 X150. Y109. I-4. J0.

N490 G01 X127.836

N492 G02 X127.836 Y109. I-7.176 J-10.84

N494 X113.484 Y109. I-7.176 J-10.84

N496 G01 X46.516

N498 G02 X46.516 Y109. I-7.176 J-10.84

N500 X46.5873 Y87.3675 I-7.176 J-10.84

N502 G01 X46.593 Y87.359

N504 X47.3056 Y87.8737

N506 G03 X50.7137 Y104.4766 I-7.9656 J10.2863

N508 G01 X46.5873 Y111.9897

N510 Y112.

N512 X10.

N514 G03 X3. Y105. I0. J-7.

N516 G01 Y10.

N518 G03 X10. Y3. I7. J0.
N520 G01 X150.
N522 G03 X157. Y10. I0. J7.
N524 G01 Y105.
N526 G03 X150. Y112. I-7. J0.
N528 G01 X46.5873
N530 G00 Z10.
N532 X64.9842 Y59.9713
N534 Z-3.64
N536 G01 Z-11.28 F33.
N538 G02 X60.852 Y57.5 I-25.6442 J38.1887 F100.
N540 X68.8354 Y52.139 I-21.512 J-40.66
N542 X68.8354 Y62.861 I11.1646 J5.361
N544 X64.9842 Y59.9713 I-29.4954 J35.299
N546 G01 X63.3117 Y62.4619
N548 G02 X53.3316 Y57.5 I-23.9717 J35.6981
N550 X74.8451 Y41.0966 I-13.9916 J-40.66
N552 G01 X77.3223 Y42.789
N554 G02 X79.6505 Y39. I-37.9822 J-25.949
N556 G01 X80.3495
N558 G02 X85.361 Y46.3354 I40.3105 J-22.16
N560 X74.639 Y46.3354 I-5.361 J11.1646
N562 X77.3223 Y42.789 I-35.299 J-29.4954
N564 G01 X74.8451 Y41.0966
N566 G02 X77.8354 Y36. I-35.5051 J-24.2566
N568 G01 X82.1646
N570 G02 X96.6883 Y52.5381 I38.4954 J-19.16
N572 G01 X95.0158 Y55.0287
N574 G02 X99.148 Y57.5 I25.6442 J-38.1887
N576 X91.1646 Y62.861 I21.512 J40.66
N578 X91.1646 Y52.139 I-11.1646 J-5.361
N580 X95.0158 Y55.0287 I29.4954 J-35.299

N582 G01 X96.6883 Y52.5381
N584 G02 X106.6684 Y57.5 I23.9717 J-35.6981
N586 X85.1549 Y73.9034 I13.9916 J40.66
N588 G01 X82.6777 Y72.211
N590 G02 X80.3495 Y76. I37.9822 J25.949
N592 G01 X79.6505
N594 G02 X74.639 Y68.6646 I-40.3105 J22.16
N596 X74.639 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N598 X85.361 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N600 X82.6777 Y72.211 I35.299 J29.4954
N602 G01 X85.1549 Y73.9034
N604 G02 X82.1646 Y79. I35.5051 J24.2566
N606 G01 X77.8354
N608 G02 X63.3117 Y62.4619 I-38.4954 J19.16
N610 G01 X61.6393 Y64.9524
N612 G02 X33. Y58.6656 I-22.2993 J33.2076
N614 G01 Y56.3344
N616 G02 X75.9304 Y33. I6.34 J-39.4944
N618 G01 X84.0696
N620 G02 X127. Y56.3344 I36.5904 J-16.16
N622 G01 Y58.6656
N624 G02 X84.0696 Y82. I-6.34 J39.4944
N626 G01 X75.9304
N628 G02 X61.6393 Y64.9524 I-36.5904 J16.16
N630 G01 X59.9668 Y67.443
N632 G02 X30. Y62.3583 I-20.6268 J30.717
N634 G01 Y52.6417
N636 G02 X73.9205 Y30. I9.34 J-35.8017
N638 G01 X86.0795
N640 G02 X130. Y52.6417 I34.5805 J-13.16
N642 G01 Y62.3583
N644 G02 X86.0795 Y85. I-9.34 J35.8017

N646 G01 X73.9205

N648 G02 X59.9668 Y67.443 I-34.5806 J13.16

N650 G01 X58.2944 Y69.9336

N652 G02 X27. Y66.4784 I-18.9544 J28.2264

N654 G01 Y48.5216

N656 G02 X71.7865 Y27. I12.34 J-31.6816

N658 G01 X88.2135

N660 G02 X133. Y48.5216 I32.4465 J-10.16

N662 G01 Y66.4784

N664 G02 X88.2135 Y88. I-12.34 J31.6816

N666 G01 X71.7865

N668 G02 X58.2944 Y69.9336 I-32.4465 J10.16

N670 G01 X56.6219 Y72.4241

N672 G02 X24. Y71.2215 I-17.2819 J25.7359

N674 G01 Y43.7785

N676 G02 X69.5018 Y24. I15.34 J-26.9385

N678 G01 X90.4982

N680 G02 X136. Y43.7785 I30.1618 J-7.16

N682 G01 Y71.2215

N684 G02 X90.4982 Y91. I-15.34 J26.9385

N686 G01 X69.5018

N688 G02 X56.6219 Y72.4241 I-30.1618 J7.16

N690 G01 X54.9495 Y74.9147

N692 G02 X21. Y77.0024 I-15.6095 J23.2453

N694 G01 Y37.9976

N696 G02 X67.0292 Y21. I18.34 J-21.1576

N698 G01 X92.9708

N700 G02 X139. Y37.9976 I27.6892 J-4.16

N702 G01 Y77.0024

N704 G02 X92.9708 Y94. I-18.34 J21.1576

N706 G01 X67.0292

N708 G02 X54.9495 Y74.9147 I-27.6892 J4.16

N710 G01 X53.277 Y77.4053
N712 G02 X18. Y85.1368 I-13.937 J20.7547
N714 G01 Y29.8632
N716 G02 X64.3131 Y18. I21.34 J-13.0232
N718 G01 X95.6869
N720 G02 X142. Y29.8632 I24.9731 J-1.16
N722 G01 Y85.1368
N724 G02 X95.6869 Y97. I-21.34 J13.0232
N726 G01 X64.3131
N728 G02 X53.277 Y77.4053 I-24.9731 J1.16
N730 G01 X51.6046 Y79.8958
N732 G02 X17.4171 Y100. I-12.2646 J18.2642
N734 G01 X15.
N736 Y15.
N738 X17.4171
N740 G02 X61.2629 Y15. I21.9229 J1.84
N742 G01 X98.7371
N744 G02 X142.5829 Y15. I21.9229 J1.84
N746 G01 X145.
N748 Y100.
N750 X142.5829
N752 G02 X98.7371 Y100. I-21.9229 J-1.84
N754 G01 X61.2629
N756 G02 X51.6046 Y79.8958 I-21.9229 J-1.84
N758 G01 X49.9322 Y82.3864
N760 G02 X20.9668 Y103. I-10.5921 J15.7736
N762 G01 X12.
N764 Y12.
N766 X20.9668
N768 G02 X57.7132 Y12. I18.3732 J4.84
N770 G01 X102.2868
N772 G02 X139.0332 Y12. I18.3732 J4.84

N774 G01 X148.
N776 Y103.
N778 X139.0332
N780 G02 X102.2868 Y103. I-18.3732 J-4.84
N782 G01 X57.7132
N784 G02 X49.9322 Y82.3864 I-18.3732 J-4.84
N786 G01 X48.2597 Y84.877
N788 G02 X25.3924 Y106. I-8.9197 J13.283
N790 G01 X10.
N792 G03 X9. Y105. I0. J-1.
N794 G01 Y10.
N796 G03 X10. Y9. I1. J0.
N798 G01 X25.3924
N800 G02 X53.2876 Y9. I13.9476 J7.84
N802 G01 X106.7124
N804 G02 X134.6076 Y9. I13.9476 J7.84
N806 G01 X150.
N808 G03 X151. Y10. I0. J1.
N810 G01 Y105.
N812 G03 X150. Y106. I-1. J0.
N814 G01 X134.6076
N816 G02 X106.7124 Y106. I-13.9476 J-7.84
N818 G01 X53.2876
N820 G02 X48.2597 Y84.877 I-13.9476 J-7.84
N822 G01 X46.5873 Y87.3675
N824 G02 X32.164 Y109. I-7.2473 J10.7925
N826 G01 X10.
N828 G03 X6. Y105. I0. J-4.
N830 G01 Y10.
N832 G03 X10. Y6. I4. J0.
N834 G01 X32.164
N836 G02 X32.164 Y6. I7.176 J10.84

N838 X46.516 Y6. I7.176 J10.84

N840 G01 X113.484

N842 G02 X113.484 Y6. I7.176 J10.84

N844 X127.836 Y6. I7.176 J10.84

N846 G01 X150.

N848 G03 X154. Y10. I0. J4.

N850 G01 Y105.

N852 G03 X150. Y109. I-4. J0.

N854 G01 X127.836

N856 G02 X127.836 Y109. I-7.176 J-10.84

N858 X113.484 Y109. I-7.176 J-10.84

N860 G01 X46.516

N862 G02 X46.516 Y109. I-7.176 J-10.84

N864 X46.5873 Y87.3675 I-7.176 J-10.84

N866 G01 X46.593 Y87.359

N868 X47.3056 Y87.8737

N870 G03 X50.7137 Y104.4766 I-7.9656 J10.2863

N872 G01 X46.5873 Y111.9897

N874 Y112.

N876 X10.

N878 G03 X3. Y105. I0. J-7.

N880 G01 Y10.

N882 G03 X10. Y3. I7. J0.

N884 G01 X150.

N886 G03 X157. Y10. I0. J7.

N888 G01 Y105.

N890 G03 X150. Y112. I-7. J0.

N892 G01 X46.5873

N894 G00 Z10.

N896 X64.9842 Y59.9713

N898 Z-9.28

N900 G01 Z-16.92 F33.

N902 G02 X60.852 Y57.5 I-25.6442 J38.1887 F100.
N904 X68.8354 Y52.139 I-21.512 J-40.66
N906 X68.8354 Y62.861 I11.1646 J5.361
N908 X64.9842 Y59.9713 I-29.4954 J35.299
N910 G01 X63.3117 Y62.4619
N912 G02 X53.3316 Y57.5 I-23.9717 J35.6981
N914 X74.8451 Y41.0966 I-13.9916 J-40.66
N916 G01 X77.3223 Y42.789
N918 G02 X79.6505 Y39. I-37.9822 J-25.949
N920 G01 X80.3495
N922 G02 X85.361 Y46.3354 I40.3105 J-22.16
N924 X74.639 Y46.3354 I-5.361 J11.1646
N926 X77.3223 Y42.789 I-35.299 J-29.4954
N928 G01 X74.8451 Y41.0966
N930 G02 X77.8354 Y36. I-35.5051 J-24.2566
N932 G01 X82.1646
N934 G02 X96.6883 Y52.5381 I38.4954 J-19.16
N936 G01 X95.0158 Y55.0287
N938 G02 X99.148 Y57.5 I25.6442 J-38.1887
N940 X91.1646 Y62.861 I21.512 J40.66
N942 X91.1646 Y52.139 I-11.1646 J-5.361
N944 X95.0158 Y55.0287 I29.4954 J-35.299
N946 G01 X96.6883 Y52.5381
N948 G02 X106.6684 Y57.5 I23.9717 J-35.6981
N950 X85.1549 Y73.9034 I13.9916 J40.66
N952 G01 X82.6777 Y72.211
N954 G02 X80.3495 Y76. I37.9822 J25.949
N956 G01 X79.6505
N958 G02 X74.639 Y68.6646 I-40.3105 J22.16
N960 X74.639 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N962 X85.361 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N964 X82.6777 Y72.211 I35.299 J29.4954

N966 G01 X85.1549 Y73.9034
N968 G02 X82.1646 Y79. I35.5051 J24.2566
N970 G01 X77.8354
N972 G02 X63.3117 Y62.4619 I-38.4954 J19.16
N974 G01 X61.6393 Y64.9524
N976 G02 X33. Y58.6656 I-22.2993 J33.2076
N978 G01 Y56.3344
N980 G02 X75.9304 Y33. I6.34 J-39.4944
N982 G01 X84.0696
N984 G02 X127. Y56.3344 I36.5904 J-16.16
N986 G01 Y58.6656
N988 G02 X84.0696 Y82. I-6.34 J39.4944
N990 G01 X75.9304
N992 G02 X61.6393 Y64.9524 I-36.5904 J16.16
N994 G01 X59.9668 Y67.443
N996 G02 X30. Y62.3583 I-20.6268 J30.717
N998 G01 Y52.6417
N1000 G02 X73.9205 Y30. I9.34 J-35.8017
N1002 G01 X86.0795
N1004 G02 X130. Y52.6417 I34.5805 J-13.16
N1006 G01 Y62.3583
N1008 G02 X86.0795 Y85. I-9.34 J35.8017
N1010 G01 X73.9205
N1012 G02 X59.9668 Y67.443 I-34.5806 J13.16
N1014 G01 X58.2944 Y69.9336
N1016 G02 X27. Y66.4784 I-18.9544 J28.2264
N1018 G01 Y48.5216
N1020 G02 X71.7865 Y27. I12.34 J-31.6816
N1022 G01 X88.2135
N1024 G02 X133. Y48.5216 I32.4465 J-10.16
N1026 G01 Y66.4784
N1028 G02 X88.2135 Y88. I-12.34 J31.6816

N1030 G01 X71.7865
N1032 G02 X58.2944 Y69.9336 I-32.4465 J10.16
N1034 G01 X56.6219 Y72.4241
N1036 G02 X24. Y71.2215 I-17.2819 J25.7359
N1038 G01 Y43.7785
N1040 G02 X69.5018 Y24. I15.34 J-26.9385
N1042 G01 X90.4982
N1044 G02 X136. Y43.7785 I30.1618 J-7.16
N1046 G01 Y71.2215
N1048 G02 X90.4982 Y91. I-15.34 J26.9385
N1050 G01 X69.5018
N1052 G02 X56.6219 Y72.4241 I-30.1618 J7.16
N1054 G01 X54.9495 Y74.9147
N1056 G02 X21. Y77.0024 I-15.6095 J23.2453
N1058 G01 Y37.9976
N1060 G02 X67.0292 Y21. I18.34 J-21.1576
N1062 G01 X92.9708
N1064 G02 X139. Y37.9976 I27.6892 J-4.16
N1066 G01 Y77.0024
N1068 G02 X92.9708 Y94. I-18.34 J21.1576
N1070 G01 X67.0292
N1072 G02 X54.9495 Y74.9147 I-27.6892 J4.16
N1074 G01 X53.277 Y77.4053
N1076 G02 X18. Y85.1368 I-13.937 J20.7547
N1078 G01 Y29.8632
N1080 G02 X64.3131 Y18. I21.34 J-13.0232
N1082 G01 X95.6869
N1084 G02 X142. Y29.8632 I24.9731 J-1.16
N1086 G01 Y85.1368
N1088 G02 X95.6869 Y97. I-21.34 J13.0232
N1090 G01 X64.3131
N1092 G02 X53.277 Y77.4053 I-24.9731 J1.16

N1094 G01 X51.6046 Y79.8958

N1096 G02 X17.4171 Y100. I-12.2646 J18.2642

N1098 G01 X15.

N1100 Y15.

N1102 X17.4171

N1104 G02 X61.2629 Y15. I21.9229 J1.84

N1106 G01 X98.7371

N1108 G02 X142.5829 Y15. I21.9229 J1.84

N1110 G01 X145.

N1112 Y100.

N1114 X142.5829

N1116 G02 X98.7371 Y100. I-21.9229 J-1.84

N1118 G01 X61.2629

N1120 G02 X51.6046 Y79.8958 I-21.9229 J-1.84

N1122 G01 X49.9322 Y82.3864

N1124 G02 X20.9668 Y103. I-10.5921 J15.7736

N1126 G01 X12.

N1128 Y12.

N1130 X20.9668

N1132 G02 X57.7132 Y12. I18.3732 J4.84

N1134 G01 X102.2868

N1136 G02 X139.0332 Y12. I18.3732 J4.84

N1138 G01 X148.

N1140 Y103.

N1142 X139.0332

N1144 G02 X102.2868 Y103. I-18.3732 J-4.84

N1146 G01 X57.7132

N1148 G02 X49.9322 Y82.3864 I-18.3732 J-4.84

N1150 G01 X48.2597 Y84.877

N1152 G02 X25.3924 Y106. I-8.9197 J13.283

N1154 G01 X10.

N1156 G03 X9. Y105. I0. J-1.

N1158 G01 Y10.
N1160 G03 X10. Y9. I1. J0.
N1162 G01 X25.3924
N1164 G02 X53.2876 Y9. I13.9476 J7.84
N1166 G01 X106.7124
N1168 G02 X134.6076 Y9. I13.9476 J7.84
N1170 G01 X150.
N1172 G03 X151. Y10. I0. J1.
N1174 G01 Y105.
N1176 G03 X150. Y106. I-1. J0.
N1178 G01 X134.6076
N1180 G02 X106.7124 Y106. I-13.9476 J-7.84
N1182 G01 X53.2876
N1184 G02 X48.2597 Y84.877 I-13.9476 J-7.84
N1186 G01 X46.5873 Y87.3675
N1188 G02 X32.164 Y109. I-7.2473 J10.7925
N1190 G01 X10.
N1192 G03 X6. Y105. I0. J-4.
N1194 G01 Y10.
N1196 G03 X10. Y6. I4. J0.
N1198 G01 X32.164
N1200 G02 X32.164 Y6. I7.176 J10.84
N1202 X46.516 Y6. I7.176 J10.84
N1204 G01 X113.484
N1206 G02 X113.484 Y6. I7.176 J10.84
N1208 X127.836 Y6. I7.176 J10.84
N1210 G01 X150.
N1212 G03 X154. Y10. I0. J4.
N1214 G01 Y105.
N1216 G03 X150. Y109. I-4. J0.
N1218 G01 X127.836
N1220 G02 X127.836 Y109. I-7.176 J-10.84

N1222 X113.484 Y109. I-7.176 J-10.84

N1224 G01 X46.516

N1226 G02 X46.516 Y109. I-7.176 J-10.84

N1228 X46.5873 Y87.3675 I-7.176 J-10.84

N1230 G01 X46.593 Y87.359

N1232 X47.3056 Y87.8737

N1234 G03 X50.7137 Y104.4766 I-7.9656 J10.2863

N1236 G01 X46.5873 Y111.9897

N1238 Y112.

N1240 X10.

N1242 G03 X3. Y105. I0. J-7.

N1244 G01 Y10.

N1246 G03 X10. Y3. I7. J0.

N1248 G01 X150.

N1250 G03 X157. Y10. I0. J7.

N1252 G01 Y105.

N1254 G03 X150. Y112. I-7. J0.

N1256 G01 X46.5873

N1258 G00 Z10.

N1260 X64.9842 Y59.9713

N1262 Z-14.92

N1264 G01 Z-22.56 F33.

N1266 G02 X60.852 Y57.5 I-25.6442 J38.1887 F100.

N1268 X68.8354 Y52.139 I-21.512 J-40.66

N1270 X68.8354 Y62.861 I11.1646 J5.361

N1272 X64.9842 Y59.9713 I-29.4954 J35.299

N1274 G01 X63.3117 Y62.4619

N1276 G02 X53.3316 Y57.5 I-23.9717 J35.6981

N1278 X74.8451 Y41.0966 I-13.9916 J-40.66

N1280 G01 X77.3223 Y42.789

N1282 G02 X79.6505 Y39. I-37.9822 J-25.949

N1284 G01 X80.3495

N1286 G02 X85.361 Y46.3354 I40.3105 J-22.16
N1288 X74.639 Y46.3354 I-5.361 J11.1646
N1290 X77.3223 Y42.789 I-35.299 J-29.4954
N1292 G01 X74.8451 Y41.0966
N1294 G02 X77.8354 Y36. I-35.5051 J-24.2566
N1296 G01 X82.1646
N1298 G02 X96.6883 Y52.5381 I38.4954 J-19.16
N1300 G01 X95.0158 Y55.0287
N1302 G02 X99.148 Y57.5 I25.6442 J-38.1887
N1304 X91.1646 Y62.861 I21.512 J40.66
N1306 X91.1646 Y52.139 I-11.1646 J-5.361
N1308 X95.0158 Y55.0287 I29.4954 J-35.299
N1310 G01 X96.6883 Y52.5381
N1312 G02 X106.6684 Y57.5 I23.9717 J-35.6981
N1314 X85.1549 Y73.9034 I13.9916 J40.66
N1316 G01 X82.6777 Y72.211
N1318 G02 X80.3495 Y76. I37.9822 J25.949
N1320 G01 X79.6505
N1322 G02 X74.639 Y68.6646 I-40.3105 J22.16
N1324 X74.639 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N1326 X85.361 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N1328 X82.6777 Y72.211 I35.299 J29.4954
N1330 G01 X85.1549 Y73.9034
N1332 G02 X82.1646 Y79. I35.5051 J24.2566
N1334 G01 X77.8354
N1336 G02 X63.3117 Y62.4619 I-38.4954 J19.16
N1338 G01 X61.6393 Y64.9524
N1340 G02 X33. Y58.6656 I-22.2993 J33.2076
N1342 G01 Y56.3344
N1344 G02 X75.9304 Y33. I6.34 J-39.4944
N1346 G01 X84.0696
N1348 G02 X127. Y56.3344 I36.5904 J-16.16

N1350 G01 Y58.6656

N1352 G02 X84.0696 Y82. I-6.34 J39.4944

N1354 G01 X75.9304

N1356 G02 X61.6393 Y64.9524 I-36.5904 J16.16

N1358 G01 X59.9668 Y67.443

N1360 G02 X30. Y62.3583 I-20.6268 J30.717

N1362 G01 Y52.6417

N1364 G02 X73.9205 Y30. I9.34 J-35.8017

N1366 G01 X86.0795

N1368 G02 X130. Y52.6417 I34.5805 J-13.16

N1370 G01 Y62.3583

N1372 G02 X86.0795 Y85. I-9.34 J35.8017

N1374 G01 X73.9205

N1376 G02 X59.9668 Y67.443 I-34.5806 J13.16

N1378 G01 X58.2944 Y69.9336

N1380 G02 X27. Y66.4784 I-18.9544 J28.2264

N1382 G01 Y48.5216

N1384 G02 X71.7865 Y27. I12.34 J-31.6816

N1386 G01 X88.2135

N1388 G02 X133. Y48.5216 I32.4465 J-10.16

N1390 G01 Y66.4784

N1392 G02 X88.2135 Y88. I-12.34 J31.6816

N1394 G01 X71.7865

N1396 G02 X58.2944 Y69.9336 I-32.4465 J10.16

N1398 G01 X56.6219 Y72.4241

N1400 G02 X24. Y71.2215 I-17.2819 J25.7359

N1402 G01 Y43.7785

N1404 G02 X69.5018 Y24. I15.34 J-26.9385

N1406 G01 X90.4982

N1408 G02 X136. Y43.7785 I30.1618 J-7.16

N1410 G01 Y71.2215

N1412 G02 X90.4982 Y91. I-15.34 J26.9385

N1414 G01 X69.5018

N1416 G02 X56.6219 Y72.4241 I-30.1618 J7.16

N1418 G01 X54.9495 Y74.9147

N1420 G02 X21. Y77.0024 I-15.6095 J23.2453

N1422 G01 Y37.9976

N1424 G02 X67.0292 Y21. I18.34 J-21.1576

N1426 G01 X92.9708

N1428 G02 X139. Y37.9976 I27.6892 J-4.16

N1430 G01 Y77.0024

N1432 G02 X92.9708 Y94. I-18.34 J21.1576

N1434 G01 X67.0292

N1436 G02 X54.9495 Y74.9147 I-27.6892 J4.16

N1438 G01 X53.277 Y77.4053

N1440 G02 X18. Y85.1368 I-13.937 J20.7547

N1442 G01 Y29.8632

N1444 G02 X64.3131 Y18. I21.34 J-13.0232

N1446 G01 X95.6869

N1448 G02 X142. Y29.8632 I24.9731 J-1.16

N1450 G01 Y85.1368

N1452 G02 X95.6869 Y97. I-21.34 J13.0232

N1454 G01 X64.3131

N1456 G02 X53.277 Y77.4053 I-24.9731 J1.16

N1458 G01 X51.6046 Y79.8958

N1460 G02 X17.4171 Y100. I-12.2646 J18.2642

N1462 G01 X15.

N1464 Y15.

N1466 X17.4171

N1468 G02 X61.2629 Y15. I21.9229 J1.84

N1470 G01 X98.7371

N1472 G02 X142.5829 Y15. I21.9229 J1.84

N1474 G01 X145.

N1476 Y100.

N1478 X142.5829

N1480 G02 X98.7371 Y100. I-21.9229 J-1.84

N1482 G01 X61.2629

N1484 G02 X51.6046 Y79.8958 I-21.9229 J-1.84

N1486 G01 X49.9322 Y82.3864

N1488 G02 X20.9668 Y103. I-10.5921 J15.7736

N1490 G01 X12.

N1492 Y12.

N1494 X20.9668

N1496 G02 X57.7132 Y12. I18.3732 J4.84

N1498 G01 X102.2868

N1500 G02 X139.0332 Y12. I18.3732 J4.84

N1502 G01 X148.

N1504 Y103.

N1506 X139.0332

N1508 G02 X102.2868 Y103. I-18.3732 J-4.84

N1510 G01 X57.7132

N1512 G02 X49.9322 Y82.3864 I-18.3732 J-4.84

N1514 G01 X48.2597 Y84.877

N1516 G02 X25.3924 Y106. I-8.9197 J13.283

N1518 G01 X10.

N1520 G03 X9. Y105. I0. J-1.

N1522 G01 Y10.

N1524 G03 X10. Y9. I1. J0.

N1526 G01 X25.3924

N1528 G02 X53.2876 Y9. I13.9476 J7.84

N1530 G01 X106.7124

N1532 G02 X134.6076 Y9. I13.9476 J7.84

N1534 G01 X150.

N1536 G03 X151. Y10. I0. J1.

N1538 G01 Y105.

N1540 G03 X150. Y106. I-1. J0.

N1542 G01 X134.6076

N1544 G02 X106.7124 Y106. I-13.9476 J-7.84

N1546 G01 X53.2876

N1548 G02 X48.2597 Y84.877 I-13.9476 J-7.84

N1550 G01 X46.5873 Y87.3675

N1552 G02 X32.164 Y109. I-7.2473 J10.7925

N1554 G01 X10.

N1556 G03 X6. Y105. I0. J-4.

N1558 G01 Y10.

N1560 G03 X10. Y6. I4. J0.

N1562 G01 X32.164

N1564 G02 X32.164 Y6. I7.176 J10.84

N1566 X46.516 Y6. I7.176 J10.84

N1568 G01 X113.484

N1570 G02 X113.484 Y6. I7.176 J10.84

N1572 X127.836 Y6. I7.176 J10.84

N1574 G01 X150.

N1576 G03 X154. Y10. I0. J4.

N1578 G01 Y105.

N1580 G03 X150. Y109. I-4. J0.

N1582 G01 X127.836

N1584 G02 X127.836 Y109. I-7.176 J-10.84

N1586 X113.484 Y109. I-7.176 J-10.84

N1588 G01 X46.516

N1590 G02 X46.516 Y109. I-7.176 J-10.84

N1592 X46.5873 Y87.3675 I-7.176 J-10.84

N1594 G01 X46.593 Y87.359

N1596 X47.3056 Y87.8737

N1598 G03 X50.7137 Y104.4766 I-7.9656 J10.2863

N1600 G01 X46.5873 Y111.9897

N1602 Y112.

N1604 X10.

N1606 G03 X3. Y105. I0. J-7.
N1608 G01 Y10.
N1610 G03 X10. Y3. I7. J0.
N1612 G01 X150.
N1614 G03 X157. Y10. I0. J7.
N1616 G01 Y105.
N1618 G03 X150. Y112. I-7. J0.
N1620 G01 X46.5873
N1622 G00 Z10.
N1624 X64.9842 Y59.9713
N1626 Z-20.56
N1628 G01 Z-28.2 F33.
N1630 G02 X60.852 Y57.5 I-25.6442 J38.1887 F100.
N1632 X68.8354 Y52.139 I-21.512 J-40.66
N1634 X68.8354 Y62.861 I11.1646 J5.361
N1636 X64.9842 Y59.9713 I-29.4954 J35.299
N1638 G01 X63.3117 Y62.4619
N1640 G02 X53.3316 Y57.5 I-23.9717 J35.6981
N1642 X74.8451 Y41.0966 I-13.9916 J-40.66
N1644 G01 X77.3223 Y42.789
N1646 G02 X79.6505 Y39. I-37.9822 J-25.949
N1648 G01 X80.3495
N1650 G02 X85.361 Y46.3354 I40.3105 J-22.16
N1652 X74.639 Y46.3354 I-5.361 J11.1646
N1654 X77.3223 Y42.789 I-35.299 J-29.4954
N1656 G01 X74.8451 Y41.0966
N1658 G02 X77.8354 Y36. I-35.5051 J-24.2566
N1660 G01 X82.1646
N1662 G02 X96.6883 Y52.5381 I38.4954 J-19.16
N1664 G01 X95.0158 Y55.0287
N1666 G02 X99.148 Y57.5 I25.6442 J-38.1887
N1668 X91.1646 Y62.861 I21.512 J40.66

N1670 X91.1646 Y52.139 I-11.1646 J-5.361
N1672 X95.0158 Y55.0287 I29.4954 J-35.299
N1674 G01 X96.6883 Y52.5381
N1676 G02 X106.6684 Y57.5 I23.9717 J-35.6981
N1678 X85.1549 Y73.9034 I13.9916 J40.66
N1680 G01 X82.6777 Y72.211
N1682 G02 X80.3495 Y76. I37.9822 J25.949
N1684 G01 X79.6505
N1686 G02 X74.639 Y68.6646 I-40.3105 J22.16
N1688 X74.639 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N1690 X85.361 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N1692 X82.6777 Y72.211 I35.299 J29.4954
N1694 G01 X85.1549 Y73.9034
N1696 G02 X82.1646 Y79. I35.5051 J24.2566
N1698 G01 X77.8354
N1700 G02 X63.3117 Y62.4619 I-38.4954 J19.16
N1702 G01 X61.6393 Y64.9524
N1704 G02 X33. Y58.6656 I-22.2993 J33.2076
N1706 G01 Y56.3344
N1708 G02 X75.9304 Y33. I6.34 J-39.4944
N1710 G01 X84.0696
N1712 G02 X127. Y56.3344 I36.5904 J-16.16
N1714 G01 Y58.6656
N1716 G02 X84.0696 Y82. I-6.34 J39.4944
N1718 G01 X75.9304
N1720 G02 X61.6393 Y64.9524 I-36.5904 J16.16
N1722 G01 X59.9668 Y67.443
N1724 G02 X30. Y62.3583 I-20.6268 J30.717
N1726 G01 Y52.6417
N1728 G02 X73.9205 Y30. I9.34 J-35.8017
N1730 G01 X86.0795
N1732 G02 X130. Y52.6417 I34.5805 J-13.16

N1734 G01 Y62.3583
N1736 G02 X86.0795 Y85. I-9.34 J35.8017
N1738 G01 X73.9205
N1740 G02 X59.9668 Y67.443 I-34.5806 J13.16
N1742 G01 X58.2944 Y69.9336
N1744 G02 X27. Y66.4784 I-18.9544 J28.2264
N1746 G01 Y48.5216
N1748 G02 X71.7865 Y27. I12.34 J-31.6816
N1750 G01 X88.2135
N1752 G02 X133. Y48.5216 I32.4465 J-10.16
N1754 G01 Y66.4784
N1756 G02 X88.2135 Y88. I-12.34 J31.6816
N1758 G01 X71.7865
N1760 G02 X58.2944 Y69.9336 I-32.4465 J10.16
N1762 G01 X56.6219 Y72.4241
N1764 G02 X24. Y71.2215 I-17.2819 J25.7359
N1766 G01 Y43.7785
N1768 G02 X69.5018 Y24. I15.34 J-26.9385
N1770 G01 X90.4982
N1772 G02 X136. Y43.7785 I30.1618 J-7.16
N1774 G01 Y71.2215
N1776 G02 X90.4982 Y91. I-15.34 J26.9385
N1778 G01 X69.5018
N1780 G02 X56.6219 Y72.4241 I-30.1618 J7.16
N1782 G01 X54.9495 Y74.9147
N1784 G02 X21. Y77.0024 I-15.6095 J23.2453
N1786 G01 Y37.9976
N1788 G02 X67.0292 Y21. I18.34 J-21.1576
N1790 G01 X92.9708
N1792 G02 X139. Y37.9976 I27.6892 J-4.16
N1794 G01 Y77.0024
N1796 G02 X92.9708 Y94. I-18.34 J21.1576

N1798 G01 X67.0292

N1800 G02 X54.9495 Y74.9147 I-27.6892 J4.16

N1802 G01 X53.277 Y77.4053

N1804 G02 X18. Y85.1368 I-13.937 J20.7547

N1806 G01 Y29.8632

N1808 G02 X64.3131 Y18. I21.34 J-13.0232

N1810 G01 X95.6869

N1812 G02 X142. Y29.8632 I24.9731 J-1.16

N1814 G01 Y85.1368

N1816 G02 X95.6869 Y97. I-21.34 J13.0232

N1818 G01 X64.3131

N1820 G02 X53.277 Y77.4053 I-24.9731 J1.16

N1822 G01 X51.6046 Y79.8958

N1824 G02 X17.4171 Y100. I-12.2646 J18.2642

N1826 G01 X15.

N1828 Y15.

N1830 X17.4171

N1832 G02 X61.2629 Y15. I21.9229 J1.84

N1834 G01 X98.7371

N1836 G02 X142.5829 Y15. I21.9229 J1.84

N1838 G01 X145.

N1840 Y100.

N1842 X142.5829

N1844 G02 X98.7371 Y100. I-21.9229 J-1.84

N1846 G01 X61.2629

N1848 G02 X51.6046 Y79.8958 I-21.9229 J-1.84

N1850 G01 X49.9322 Y82.3864

N1852 G02 X20.9668 Y103. I-10.5921 J15.7736

N1854 G01 X12.

N1856 Y12.

N1858 X20.9668

N1860 G02 X57.7132 Y12. I18.3732 J4.84

N1862 G01 X102.2868
N1864 G02 X139.0332 Y12. I18.3732 J4.84
N1866 G01 X148.
N1868 Y103.
N1870 X139.0332
N1872 G02 X102.2868 Y103. I-18.3732 J-4.84
N1874 G01 X57.7132
N1876 G02 X49.9322 Y82.3864 I-18.3732 J-4.84
N1878 G01 X48.2597 Y84.877
N1880 G02 X25.3924 Y106. I-8.9197 J13.283
N1882 G01 X10.
N1884 G03 X9. Y105. I0. J-1.
N1886 G01 Y10.
N1888 G03 X10. Y9. I1. J0.
N1890 G01 X25.3924
N1892 G02 X53.2876 Y9. I13.9476 J7.84
N1894 G01 X106.7124
N1896 G02 X134.6076 Y9. I13.9476 J7.84
N1898 G01 X150.
N1900 G03 X151. Y10. I0. J1.
N1902 G01 Y105.
N1904 G03 X150. Y106. I-1. J0.
N1906 G01 X134.6076
N1908 G02 X106.7124 Y106. I-13.9476 J-7.84
N1910 G01 X53.2876
N1912 G02 X48.2597 Y84.877 I-13.9476 J-7.84
N1914 G01 X46.5873 Y87.3675
N1916 G02 X32.164 Y109. I-7.2473 J10.7925
N1918 G01 X10.
N1920 G03 X6. Y105. I0. J-4.
N1922 G01 Y10.
N1924 G03 X10. Y6. I4. J0.

N1926 G01 X32.164
N1928 G02 X32.164 Y6. I7.176 J10.84
N1930 X46.516 Y6. I7.176 J10.84
N1932 G01 X113.484
N1934 G02 X113.484 Y6. I7.176 J10.84
N1936 X127.836 Y6. I7.176 J10.84
N1938 G01 X150.
N1940 G03 X154. Y10. I0. J4.
N1942 G01 Y105.
N1944 G03 X150. Y109. I-4. J0.
N1946 G01 X127.836
N1948 G02 X127.836 Y109. I-7.176 J-10.84
N1950 X113.484 Y109. I-7.176 J-10.84
N1952 G01 X46.516
N1954 G02 X46.516 Y109. I-7.176 J-10.84
N1956 X46.5873 Y87.3675 I-7.176 J-10.84
N1958 G01 X46.593 Y87.359
N1960 X47.3056 Y87.8737
N1962 G03 X50.7137 Y104.4766 I-7.9656 J10.2863
N1964 G01 X46.5873 Y111.9897
N1966 Y112.
N1968 X10.
N1970 G03 X3. Y105. I0. J-7.
N1972 G01 Y10.
N1974 G03 X10. Y3. I7. J0.
N1976 G01 X150.
N1978 G03 X157. Y10. I0. J7.
N1980 G01 Y105.
N1982 G03 X150. Y112. I-7. J0.
N1984 G01 X46.5873
N1986 G00 Z10.
N1988 X64.9842 Y59.9713

N1990 Z-26.2

N1992 G01 Z-33.84 F33.

N1994 G02 X60.852 Y57.5 I-25.6442 J38.1887 F100.

N1996 X68.8354 Y52.139 I-21.512 J-40.66

N1998 X68.8354 Y62.861 I11.1646 J5.361

N2000 X64.9842 Y59.9713 I-29.4954 J35.299

N2002 G01 X63.3117 Y62.4619

N2004 G02 X53.3316 Y57.5 I-23.9717 J35.6981

N2006 X74.8451 Y41.0966 I-13.9916 J-40.66

N2008 G01 X77.3223 Y42.789

N2010 G02 X79.6505 Y39. I-37.9822 J-25.949

N2012 G01 X80.3495

N2014 G02 X85.361 Y46.3354 I40.3105 J-22.16

N2016 X74.639 Y46.3354 I-5.361 J11.1646

N2018 X77.3223 Y42.789 I-35.299 J-29.4954

N2020 G01 X74.8451 Y41.0966

N2022 G02 X77.8354 Y36. I-35.5051 J-24.2566

N2024 G01 X82.1646

N2026 G02 X96.6883 Y52.5381 I38.4954 J-19.16

N2028 G01 X95.0158 Y55.0287

N2030 G02 X99.148 Y57.5 I25.6442 J-38.1887

N2032 X91.1646 Y62.861 I21.512 J40.66

N2034 X91.1646 Y52.139 I-11.1646 J-5.361

N2036 X95.0158 Y55.0287 I29.4954 J-35.299

N2038 G01 X96.6883 Y52.5381

N2040 G02 X106.6684 Y57.5 I23.9717 J-35.6981

N2042 X85.1549 Y73.9034 I13.9916 J40.66

N2044 G01 X82.6777 Y72.211

N2046 G02 X80.3495 Y76. I37.9822 J25.949

N2048 G01 X79.6505

N2050 G02 X74.639 Y68.6646 I-40.3105 J22.16

N2052 X74.639 Y68.6646 I5.361 J-11.1646

N2054 X85.361 Y68.6646 I5.361 J-11.1646
N2056 X82.6777 Y72.211 I35.299 J29.4954
N2058 G01 X85.1549 Y73.9034
N2060 G02 X82.1646 Y79. I35.5051 J24.2566
N2062 G01 X77.8354
N2064 G02 X63.3117 Y62.4619 I-38.4954 J19.16
N2066 G01 X61.6393 Y64.9524
N2068 G02 X33. Y58.6656 I-22.2993 J33.2076
N2070 G01 Y56.3344
N2072 G02 X75.9304 Y33. I6.34 J-39.4944
N2074 G01 X84.0696
N2076 G02 X127. Y56.3344 I36.5904 J-16.16
N2078 G01 Y58.6656
N2080 G02 X84.0696 Y82. I-6.34 J39.4944
N2082 G01 X75.9304
N2084 G02 X61.6393 Y64.9524 I-36.5904 J16.16
N2086 G01 X59.9668 Y67.443
N2088 G02 X30. Y62.3583 I-20.6268 J30.717
N2090 G01 Y52.6417
N2092 G02 X73.9205 Y30. I9.34 J-35.8017
N2094 G01 X86.0795
N2096 G02 X130. Y52.6417 I34.5805 J-13.16
N2098 G01 Y62.3583
N2100 G02 X86.0795 Y85. I-9.34 J35.8017
N2102 G01 X73.9205
N2104 G02 X59.9668 Y67.443 I-34.5806 J13.16
N2106 G01 X58.2944 Y69.9336
N2108 G02 X27. Y66.4784 I-18.9544 J28.2264
N2110 G01 Y48.5216
N2112 G02 X71.7865 Y27. I12.34 J-31.6816
N2114 G01 X88.2135
N2116 G02 X133. Y48.5216 I32.4465 J-10.16

N2118 G01 Y66.4784
N2120 G02 X88.2135 Y88. I-12.34 J31.6816
N2122 G01 X71.7865
N2124 G02 X58.2944 Y69.9336 I-32.4465 J10.16
N2126 G01 X56.6219 Y72.4241
N2128 G02 X24. Y71.2215 I-17.2819 J25.7359
N2130 G01 Y43.7785
N2132 G02 X69.5018 Y24. I15.34 J-26.9385
N2134 G01 X90.4982
N2136 G02 X136. Y43.7785 I30.1618 J-7.16
N2138 G01 Y71.2215
N2140 G02 X90.4982 Y91. I-15.34 J26.9385
N2142 G01 X69.5018
N2144 G02 X56.6219 Y72.4241 I-30.1618 J7.16
N2146 G01 X54.9495 Y74.9147
N2148 G02 X21. Y77.0024 I-15.6095 J23.2453
N2150 G01 Y37.9976
N2152 G02 X67.0292 Y21. I18.34 J-21.1576
N2154 G01 X92.9708
N2156 G02 X139. Y37.9976 I27.6892 J-4.16
N2158 G01 Y77.0024
N2160 G02 X92.9708 Y94. I-18.34 J21.1576
N2162 G01 X67.0292
N2164 G02 X54.9495 Y74.9147 I-27.6892 J4.16
N2166 G01 X53.277 Y77.4053
N2168 G02 X18. Y85.1368 I-13.937 J20.7547
N2170 G01 Y29.8632
N2172 G02 X64.3131 Y18. I21.34 J-13.0232
N2174 G01 X95.6869
N2176 G02 X142. Y29.8632 I24.9731 J-1.16
N2178 G01 Y85.1368
N2180 G02 X95.6869 Y97. I-21.34 J13.0232

N2182 G01 X64.3131
N2184 G02 X53.277 Y77.4053 I-24.9731 J1.16
N2186 G01 X51.6046 Y79.8958
N2188 G02 X17.4171 Y100. I-12.2646 J18.2642
N2190 G01 X15.
N2192 Y15.
N2194 X17.4171
N2196 G02 X61.2629 Y15. I21.9229 J1.84
N2198 G01 X98.7371
N2200 G02 X142.5829 Y15. I21.9229 J1.84
N2202 G01 X145.
N2204 Y100.
N2206 X142.5829
N2208 G02 X98.7371 Y100. I-21.9229 J-1.84
N2210 G01 X61.2629
N2212 G02 X51.6046 Y79.8958 I-21.9229 J-1.84
N2214 G01 X49.9322 Y82.3864
N2216 G02 X20.9668 Y103. I-10.5921 J15.7736
N2218 G01 X12.
N2220 Y12.
N2222 X20.9668
N2224 G02 X57.7132 Y12. I18.3732 J4.84
N2226 G01 X102.2868
N2228 G02 X139.0332 Y12. I18.3732 J4.84
N2230 G01 X148.
N2232 Y103.
N2234 X139.0332
N2236 G02 X102.2868 Y103. I-18.3732 J-4.84
N2238 G01 X57.7132
N2240 G02 X49.9322 Y82.3864 I-18.3732 J-4.84
N2242 G01 X48.2597 Y84.877
N2244 G02 X25.3924 Y106. I-8.9197 J13.283

N2246 G01 X10.
N2248 G03 X9. Y105. I0. J-1.
N2250 G01 Y10.
N2252 G03 X10. Y9. I1. J0.
N2254 G01 X25.3924
N2256 G02 X53.2876 Y9. I13.9476 J7.84
N2258 G01 X106.7124
N2260 G02 X134.6076 Y9. I13.9476 J7.84
N2262 G01 X150.
N2264 G03 X151. Y10. I0. J1.
N2266 G01 Y105.
N2268 G03 X150. Y106. I-1. J0.
N2270 G01 X134.6076
N2272 G02 X106.7124 Y106. I-13.9476 J-7.84
N2274 G01 X53.2876
N2276 G02 X48.2597 Y84.877 I-13.9476 J-7.84
N2278 G01 X46.5873 Y87.3675
N2280 G02 X32.164 Y109. I-7.2473 J10.7925
N2282 G01 X10.
N2284 G03 X6. Y105. I0. J-4.
N2286 G01 Y10.
N2288 G03 X10. Y6. I4. J0.
N2290 G01 X32.164
N2292 G02 X32.164 Y6. I7.176 J10.84
N2294 X46.516 Y6. I7.176 J10.84
N2296 G01 X113.484
N2298 G02 X113.484 Y6. I7.176 J10.84
N2300 X127.836 Y6. I7.176 J10.84
N2302 G01 X150.
N2304 G03 X154. Y10. I0. J4.
N2306 G01 Y105.
N2308 G03 X150. Y109. I-4. J0.

N2310 G01 X127.836
N2312 G02 X127.836 Y109. I-7.176 J-10.84
N2314 X113.484 Y109. I-7.176 J-10.84
N2316 G01 X46.516
N2318 G02 X46.516 Y109. I-7.176 J-10.84
N2320 X46.5873 Y87.3675 I-7.176 J-10.84
N2322 G01 X46.593 Y87.359
N2324 X47.3056 Y87.8737
N2326 G03 X50.7137 Y104.4766 I-7.9656 J10.2863
N2328 G01 X46.5873 Y111.9897
N2330 Y112.
N2332 X10.
N2334 G03 X3. Y105. I0. J-7.
N2336 G01 Y10.
N2338 G03 X10. Y3. I7. J0.
N2340 G01 X150.
N2342 G03 X157. Y10. I0. J7.
N2344 G01 Y105.
N2346 G03 X150. Y112. I-7. J0.
N2348 G01 X46.5873
N2350 G00 Z10.
N2352 (P-contour6)
N2354 S1500
N2356 X80. Y57.885
N2358 Z10.
N2360 Z2.
N2362 G01 Z-4.4671 F33.
N2364 G03 X80. Y57.885 I0. J-0.385 F100.
N2366 G01 Y60.885
N2368 G03 X80. Y60.885 I0. J-3.385
N2370 G01 Y63.885
N2372 G03 X80. Y63.885 I0. J-6.385

N2374 G00 Z10.
N2376 Y57.885
N2378 Z-2.4671
N2380 G01 Z-8.9343 F33.
N2382 G03 X80. Y57.885 I0. J-0.385 F100.
N2384 G01 Y60.885
N2386 G03 X80. Y60.885 I0. J-3.385
N2388 G01 Y63.885
N2390 G03 X80. Y63.885 I0. J-6.385
N2392 G00 Z10.
N2394 Y57.885
N2396 Z-6.9343
N2398 G01 Z-13.4014 F33.
N2400 G03 X80. Y57.885 I0. J-0.385 F100.
N2402 G01 Y60.885
N2404 G03 X80. Y60.885 I0. J-3.385
N2406 G01 Y63.885
N2408 G03 X80. Y63.885 I0. J-6.385
N2410 G00 Z10.
N2412 Y57.885
N2414 Z-11.4014
N2416 G01 Z-17.8686 F33.
N2418 G03 X80. Y57.885 I0. J-0.385 F100.
N2420 G01 Y60.885
N2422 G03 X80. Y60.885 I0. J-3.385
N2424 G01 Y63.885
N2426 G03 X80. Y63.885 I0. J-6.385
N2428 G00 Z10.
N2430 Y57.885
N2432 Z-15.8686
N2434 G01 Z-22.3357 F33.
N2436 G03 X80. Y57.885 I0. J-0.385 F100.

N2438 G01 Y60.885
N2440 G03 X80. Y60.885 I0. J-3.385
N2442 G01 Y63.885
N2444 G03 X80. Y63.885 I0. J-6.385
N2446 G00 Z10.
N2448 Y57.885
N2450 Z-20.3357
N2452 G01 Z-26.8029 F33.
N2454 G03 X80. Y57.885 I0. J-0.385 F100.
N2456 G01 Y60.885
N2458 G03 X80. Y60.885 I0. J-3.385
N2460 G01 Y63.885
N2462 G03 X80. Y63.885 I0. J-6.385
N2464 G00 Z10.
N2466 Y57.885
N2468 Z-24.8029
N2470 G01 Z-31.27 F33.
N2472 G03 X80. Y57.885 I0. J-0.385 F100.
N2474 G01 Y60.885
N2476 G03 X80. Y60.885 I0. J-3.385
N2478 G01 Y63.885
N2480 G03 X80. Y63.885 I0. J-6.385
N2482 G00 Z10.
N2484 M05
N2486 M01

N3 G90 G17 G40 G80 G00
N2488 M06 T3 ()
N2490 T4
N2492 (F-contour5)
N2494 G00 G54 G90 X133.1036 Y4.3823 S1500 M03
N2496 G43 H3 Z50.

N2498 Z10.

N2500 Z2.

N2502 G01 Z-30. F33.

N2504 X26.8823 Y110.6036 F100.

N2506 G00 Z10.

N2508 Y4.3964

N2510 Z2.

N2512 G01 Z-30. F33.

N2514 X133.1036 Y110.6177 F100.

N2516 G00 Z10.

N2518 M05

N2520 M01

N4 G90 G17 G40 G80 G00

N2522 M06 T4 ()

N2524 T2

N2526 (D-drill)

N2528 G00 G54 G90 X80. Y57.5 S1500 M03

N2530 G43 H4 Z50.

N2532 Z10.

N2534 G98 G83 X80. Y57.5 Z-42.5439 R-29.27 Q0. F33.

N2536 G80

N2538 M05

N2540 M01

N5 G90 G17 G40 G80 G00

N2542 M06 T2 ()

N2544 (F-contour7)

N2546 G00 G54 G90 X45. Y-3. S1500 M03

N2548 G43 H2 Z50.

N2550 Z10.

N2552 Z2.

N2554 G01 Z-39.84 F33.
N2556 X150. F100.
N2558 G03 X163. Y10. I0. J13.
N2560 G01 Y105.
N2562 G03 X150. Y118. I-13. J0.
N2564 G01 X10.
N2566 G03 X-3. Y105. I0. J-13.
N2568 G01 Y10.
N2570 G03 X10. Y-3. I13. J0.
N2572 G01 X150.
N2574 G03 X163. Y10. I0. J13.
N2576 G01 Y105.
N2578 G03 X150. Y118. I-13. J0.
N2580 G01 X10.
N2582 G03 X-3. Y105. I0. J-13.
N2584 G01 Y10.
N2586 G03 X10. Y-3. I13. J0.
N2588 G01 X150.
N2590 G03 X163. Y10. I0. J13.
N2592 G01 Y105.
N2594 G03 X150. Y118. I-13. J0.
N2596 G01 X10.
N2598 G03 X-3. Y105. I0. J-13.
N2600 G01 Y10.
N2602 G03 X10. Y-3. I13. J0.
N2604 G01 X150.
N2606 G03 X163. Y10. I0. J13.
N2608 G01 Y105.
N2610 G03 X150. Y118. I-13. J0.
N2612 G01 X10.
N2614 G03 X-3. Y105. I0. J-13.
N2616 G01 Y10.

N2618 G03 X10. Y-3. I13. J0.
N2620 G01 X150.
N2622 G03 X163. Y10. I0. J13.
N2624 G01 Y105.
N2626 G03 X150. Y118. I-13. J0.
N2628 G01 X10.
N2630 G03 X-3. Y105. I0. J-13.
N2632 G01 Y10.
N2634 G03 X10. Y-3. I13. J0.
N2636 G01 X150.
N2638 G03 X163. Y10. I0. J13.
N2640 G01 Y105.
N2642 G03 X150. Y118. I-13. J0.
N2644 G01 X10.
N2646 G03 X-3. Y105. I0. J-13.
N2648 G01 Y10.
N2650 G03 X10. Y-3. I13. J0.
N2652 G01 X45.
N2654 G00 Z10.
N2656 M05
N2658 G00 G28 G91 Z0
N2660 G00 G28 G91 X-15.0 Y0.
N2662 G90
N2664 M06 T1
N2666 M30
%