

## **Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ (m) ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ.**

**Χρήστος Μπαντής  
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας  
Βιομηχανική Περιοχή Θεσσαλονίκης, Οικ. Τετρ. 45  
57022 Σίνδος, Θεσσαλονίκη  
e-mail: bandis@eim.org.gr**

Ξεκινώντας από τον ορισμό, το μέτρο στην Ελλάδα υλοποιείται με την χρήση δύο λέιζερ των οποίων η συχνότητα είναι σταθεροποιημένη με ατμούς ιωδίου. Τα λέιζερ αυτά χρησιμοποιούνται για την διακρίβωση άλλων λέιζερ που αποτελούν μέρος διατάξεων συμβολομετρίας. Με τις διατάξεις αυτές, υλοποιείται ο ορισμός του μέτρου και μπορεί κανείς να μετρήσει το μήκος συγκεκριμένων αποστάσεων ή αντικειμένων με πολύ μικρή αβεβαιότητα. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος εκτίμησης της αβεβαιότητας υλοποίησης του μέτρου από το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (Ε.Ι.Μ.), καθώς και τα αποτελέσματα των πειραμάτων και υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν στην Γαλλία κατά την διάρκεια της σύγκρισης του Ελληνικού προτύπου με το “femtosecond laser comb” σύστημα του Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων προτύπων πλακιδίων μήκους στα πλαίσια της EUROMET.L-K1.1 δι-εργαστηριακής με τη διάταξη συμβολής φωτός του εργαστηρίου διαστασιακών μετρήσεων του Ε.Ι.Μ.

*Λέξεις-Κλειδιά: Πρωτεύοντα πρότυπα μήκους, συμβολομετρία, λέιζερ σταθεροποιημένα με ατμούς ιωδίου, αβεβαιότητα.*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που το 1887, για πρώτη φορά, ο A. A. Michelson (Βραβείο Nobel 1907) πρότεινε την χρήση οπτικών διατάξεων συμβολής φωτός για μετρήσεις μήκους, μόλις το 1960, το μέτρο ορίστηκε σε σχέση με το μήκος κύματος οπτικής ακτινοβολίας ( $2p_{10}-5d_5$  μετάπτωση ηλεκτρονίων στα άτομα  $86 \text{ Kr}$ ). Σήμερα παρόλο που ο ορισμός του μέτρου στηρίζεται στον ορισμό της ταχύτητας του φωτός: ως ένα μέτρο ορίζεται η απόσταση που διανύει το φως στο κενό σε  $1/299\,792\,458$  δευτερόλεπτα<sup>1</sup> (ταχύτητα του φωτός:  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ ), η υλοποίησή του πραγματοποιείται με την χρήση διατάξεων συμβολής φωτός και λέιζερ με εξαιρετικά σταθερή συχνότητα<sup>2,3</sup>.

Στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (E.I.M.) ο ορισμός του μέτρου υλοποιείται με δύο πρότυπα He-Ne λέιζερ ( $633$  και  $543 \text{ nm}$ ) των οποίων η συχνότητα είναι σταθεροποιημένη με τη χρήση ατμών ιωδίου και γνωστή με τυπική αβεβαιότητα της τάξης των μερικών  $\text{kHz}$ . Η αβεβαιότητα αυτή επιβεβαιώνεται με διεθνείς διεργαστηριακές συγκρίσεις στις οποίες συμμετέχει μεταξύ των ινστιτούτων άλλων χωρών και το E.I.M. Τα αποτελέσματα που αφορούν τα Ελληνικά πρότυπα από την διεργαστηριακή «BIPM.L.K11 ongoing key comparison, 2005» θα παρουσιαστούν στην εργασία αυτή.

Τα σταθεροποιημένα με ατμούς ιωδίου πρότυπα λέιζερ χρησιμοποιούνται για την διακρίβωση της συχνότητας των λέιζερ οπτικών διατάξεων συμβολής φωτός που με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται για μετρήσεις μήκους. Στο E.I.M. η σύνδεση του άυλου ορισμού του μέτρου με φυσικά αντικείμενα πραγματοποιείται σε μια τέτοια διάταξη συμβολής φωτός με την οποία διακριβώνονται πρότυπα πλακίδια μήκους. Η τυπική αβεβαιότητα η οποία επιτυγχάνεται στο E.I.M. για πρότυπα πλακίδια μήκους είναι της τάξης των  $10 \text{ nm}$  όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα της διεθνούς διεργαστηριακής σύγκρισης EUROMET.L-K.1.1 που επίσης θα παρουσιαστούν στην εργασία αυτή.

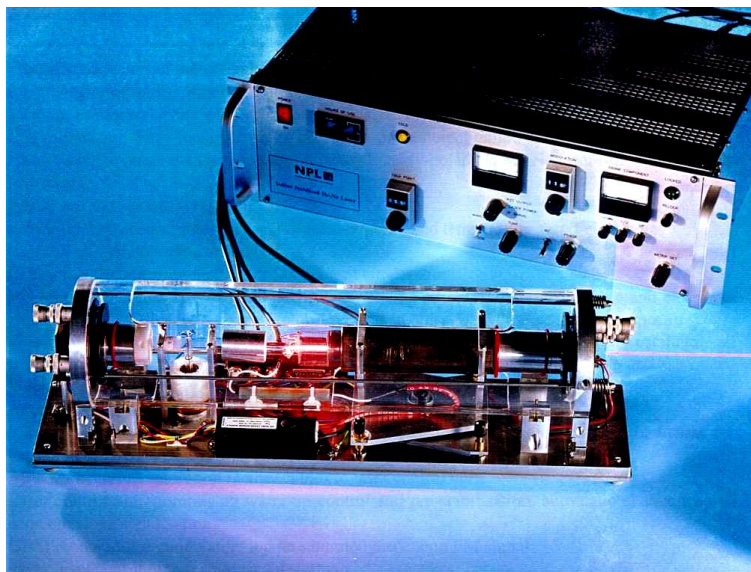
## 2. 633 nm He-Ne ΛΕΙΖΕΡ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

### 2.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Χωρίς καμία μορφή σταθεροποίησης η συχνότητα ενός He-Ne λέιζερ μπορεί να μεταβάλλεται σε όλο το εύρος όπου υπάρχει ενίσχυση (gain) με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα στη συχνότητα να είναι της τάξης του  $\pm 1$  στα  $10^6$ . Η μεταβολή αυτή και συνεπώς η αβεβαιότητα στη συχνότητα οφείλεται κυρίως στις αλλαγές του μήκους της οπτικής κοιλότητας του λέιζερ και θεωρείται ως πολύ μεγάλη για εφαρμογές προτύπων μήκους. Βελτίωση της σταθερότητας της συχνότητας επιτυγχάνεται με την χρήση των γραμμών απορρόφησης ενός αερίου έτσι ώστε οι συχνότητες τους να αποτελέσουν τις συχνότητες αναφοράς. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας μεθόδου είναι ότι η απορρόφηση οφείλεται σε διέγερση μορίων που βρίσκονται στην βασική τους κατάσταση και συνεπώς διαταραχές λόγω της ηλεκτρικής εκκένωσης στο σωλήνα του λέιζερ δεν υφίστανται. Η τεχνική αυτή γνωστή και ως σταθεροποίηση με κορεσμένη απορρόφηση (stabilization by saturated absorption), επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μίας κοιλότητας (σωλήνα) με χαμηλής πίεσης αέριο το οποίο έχει γραμμές απορρόφησης με συχνότητες μέσα στο εύρος συχνοτήτων της κοιλότητας του λέιζερ όπου υπάρχει ενίσχυση. Το ισχυρό στάσιμο κύμα του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στην κοιλότητα του λέιζερ έχει ως αποτέλεσμα τον κορεσμό

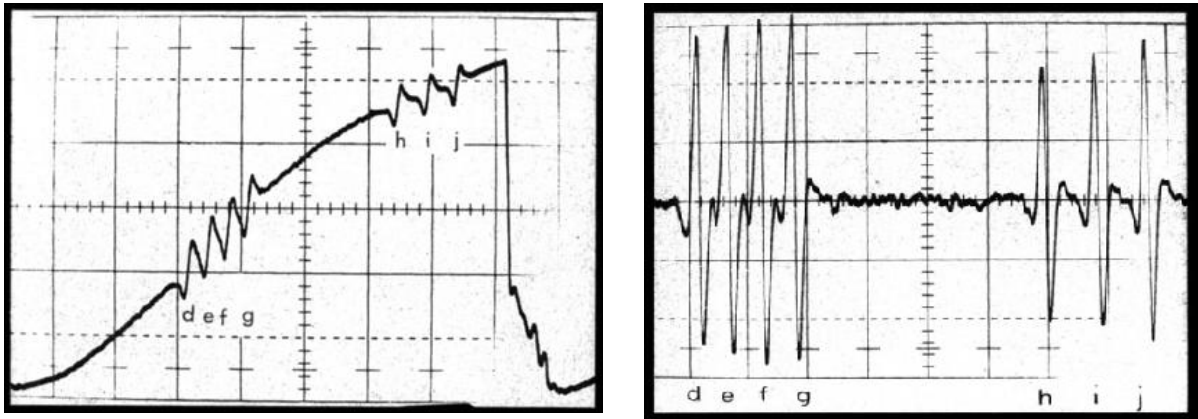
της απορρόφησης και κατά συνέπεια το σχηματισμό ενός βαθουλώματος με Λορετζιανή κατανομή στο κέντρο της γραμμής απορρόφησης. Το εύρος του βαθουλώματος χαρακτηρίζεται από το μικρό σχετικά φυσικό πλάτος της γραμμής απορρόφησης (natural width) και όχι από το φαινόμενο Doppler. Η μείωση αυτή της απορρόφησης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση στην ισχύ εξόδου του λέιζερ καθώς γίνεται ρύθμιση της συχνότητας του γύρω από τις γραμμές απορρόφησης του αερίου.

Το πρότυπο λέιζερ του E.I.M. (Σχήμα 1) χρησιμοποιεί ατμούς ιωδίου για την δημιουργία των χαρακτηριστικών κορεσμένης απορρόφησης. Η πειραματική ανίχνευση των χαρακτηριστικών αυτών γίνεται με το συνδυασμό της διαμόρφωσης του οπτικού μήκους της κοιλότητας του λέιζερ με συχνότητα  $586 \text{ Hz}$  σε οπτικό εύρος  $6 \text{ MHz}$  και τεχνικών ανίχνευσης ευαίσθητων σε φάση και συχνότητα (lock-in techniques). Η διαμόρφωση του οπτικού μήκους της κοιλότητας του λέιζερ καθώς και οι απαιτούμενες διορθώσεις αυτού πραγματοποιούνται με χρήση πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων πάνω στους οποίους είναι τοποθετημένα τα κάτοπτρα που σχηματίζουν την κοιλότητα του λέιζερ. Η ανίχνευση του σήματος της ισχύος εξόδου του λέιζερ με συχνότητα  $586 \text{ Hz}$  καθώς και της δεύτερης και τρίτης αρμονικής του που αντιστοιχεί στην πρώτη, δεύτερη και τρίτη παράγωγο του αντίστοιχα, καθιστά δυνατή την ανίχνευση των γραμμών απορρόφησης των ατμών ιωδίου και δυνατό το «κλειδώμα» σε μια από τις συχνότητες απορρόφησης αυτών.



Σχήμα 1. Το πρότυπο λέιζερ του E.I.M. σταθεροποιημένο ως προς την συχνότητα με ατμούς ιωδίου.

Οι παράγωγοι του σήματος της ισχύος εξόδου μπορούν να παρατηρηθούν σαν συνάρτηση του συχνότητας μεταβάλλοντας το μήκος της κοιλότητας του λέιζερ. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η μορφή των σημάτων αυτών με την βοήθεια των οποίων γίνονται συνεχείς διορθώσεις του μήκους της κοιλότητας του λέιζερ έτσι ώστε η συχνότητά του να παραμένει σταθερή και ίση με μία από τις γραμμές απορρόφησης των ατμών ιωδίου.



Σχήμα 2. Τυπική μορφή της πρώτης (α) και τρίτης (β) παραγώγου του σήματος της ισχύος εξόδου του λέιζερ. Τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά οφείλονται στην κορεσμένη απορρόφηση των ατμών ιωδίου, συνιστώσες d, e, f, g, h, i, j. Η συνιστώσα  $f$  για παράδειγμα οφείλεται στη μετάβαση 11-5, R(127) του  $^{127}\text{I}_2$  με συχνότητα  $f = 473\,612\,353\,604\text{ kHz}$  και  $\lambda = 632\,991\,212.58\text{ fm}^3$ .

## 2.2 Αποτελέσματα της «BIPM.L-K11 κύριας δι-εργαστηριακής».

Η κύρια δι-εργαστηριακή BIPM.L.K10 είχε ξεκινήσει το 1993 και αφορούσε τα σταθεροποιημένα με ατμούς ιωδίου λέιζερ στα 633 nm. Το μετρούμενο μέγεθος ήταν η συχνότητα των λέιζερ καθώς αυτά σταθεροποιούνταν στις d, e, f και g συνιστώσες της ηλεκτρονικής μετάβασης 11-5, R(127) των ατμών ιωδίου,  $^{127}\text{I}_2$ . Η τιμή αναφοράς που χρησιμοποιούνταν ήταν οι τιμές του BIPM-4 λέιζερ.

Τα τελευταία χρόνια η κατάσταση που αφορά την υλοποίηση του μέτρου έχει αλλάξει δραστικά με την χρήση femto-second laser comb διατάξεων και την δυνατότητα μέτρησης οπτικών συχνοτήτων με απευθείας ιχνηλασιμότητα στο δευτερόλεπτο. Έτσι το 2003 με απόφαση της Comité Consultative des Longueurs (CCL) αποφασίστηκε η έναρξη της δι-εργαστηριακής BIPM.L.K11 με την οποία πραγματοποιείται μέτρηση της συχνότητας των σταθεροποιημένων με ατμούς ιωδίου λέιζερ με χρήση της femto-second laser comb διάταξης του BIPM<sup>4</sup>. Η διάταξη αυτή βασίζεται σε ένα Kerr-lens mode-locked ring laser με συχνότητα παλμών  $\sim 740\text{ kHz}$ , τροφοδοτούμενο με 5 W, 532 nm ακτινοβολία από ένα Nd:YVO<sub>4</sub> λέιζερ. Μία ειδικά κατασκευασμένη οπτική ίνα (photonic-crystal fiber) μήκους 10 cm χρησιμοποιήθηκε ώστε οι οπτικές συχνότητες εξόδου της διάταξης να έχουν εύρος μεγαλύτερο από μία οκτάβα. Όλες οι γεννήτριες συχνοτήτων καθώς και όλοι οι μετρητές συχνοτήτων έπαιρναν την συχνότητα αναφοράς τους από το MASER υδρογόνου του εργαστηρίου χρόνου του BIPM του οποίου η συχνότητα είναι γνωστή με ακρίβεια 5 μέρη στα  $10^{14}$ . Η μέτρηση της συχνότητας του λέιζερ του E.I.M. πραγματοποιείται με συμβολή της δέσμης φωτός του με τη δέσμη από μία συνιστώσα της διάταξης comb και την δημιουργία διακροτήματος. Μέτρηση της συχνότητας του διακροτήματος μας δίνει τη διαφορά των δύο συχνοτήτων.

Οι παράγοντες που συνεισφέρουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων με την μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο ομάδες, μία

αυτή που αφορά τις πειραματικές μετρήσεις με τιμές που δίνονται στο Πίνακα 1 και μία ομάδα που αφορά τις παραμέτρους των σταθεροποιημένων με ατμούς ιωδίου λέιζερ (Πίνακας 2). Από τους Πίνακες 1 και 2 βλέπει κανείς ότι η συνολική αβεβαιότητα που οφείλεται στις πειραματικές μετρήσεις είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή που οφείλεται στη ρύθμιση των παραμέτρων του προτύπου του E.I.M. με κύρια συνιστώσα αυτή που οφείλεται στην τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

Πίνακας 1. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων αβεβαιότητας λόγω της διαδικασίας μέτρησης.

Προέλευση αβεβαιότητας	Τιμή	Μονάδες
Συχνότητα αναφοράς	30	Hz
Τυπική απόκλιση αποτελεσμάτων	256	Hz
Αβεβαιότητα μεθόδου	20	Hz
Σύνολο	258	Hz

Πίνακας 2. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων αβεβαιότητας που οφείλονται στις ρυθμίσεις των προτύπων.

Προέλευση Αβεβαιότητας	Τιμή	Μονάδες
Ισχύς λέιζερ	0.20	kHz
Πλάτος συχνότητας διαμόρφωσης	0.77	kHz
Θερμοκρασία ψυχρού δακτυλίου ιωδίου	1.49	kHz
Θερμοκρασία τοιχωμάτων κοιλότητας ιωδίου	0.12	kHz
Σφάλμα ηλεκτρονικών	0.58	kHz
Ευθυγράμμιση λέιζερ	0.87	kHz
Σύνολο	1.98	kHz

Πίνακας 3. Τελικές συχνότητες προτύπων.

Ινστιτούτο	$f$ [kHz]*	$u_1(f)$ [kHz]*	$u_2(f)$ [kHz]*	$u_c(f)$ [kHz]*
Ινστ/το 1	609.3	0.28	2.1	2.1
E.I.M.	610.7	0.26	2.0	2.0
Ινστ/το 2	612.7	0.28	4.1	4.1
Ινστ/το 3	606.9	0.20	2.4	2.4

\* $f$ : η μετρούμενη συχνότητα των προτύπων σε σχέση με τα 473 612 353 000 kHz.

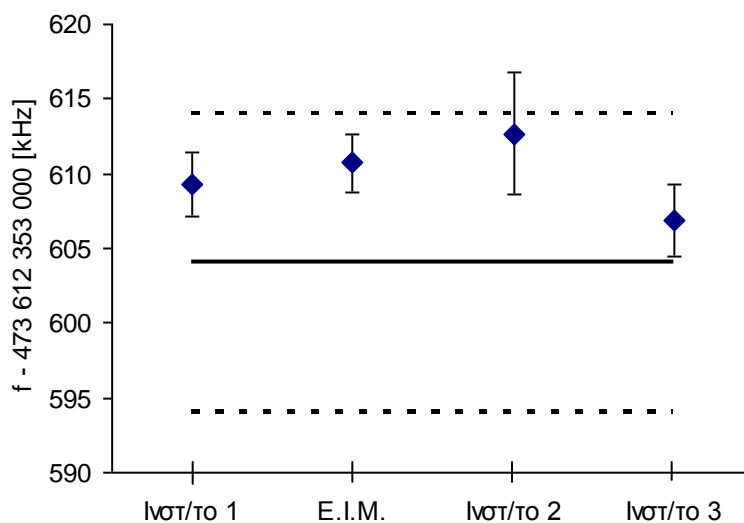
$u_1(f)$ : Η τυπική αβεβαιότητα που οφείλεται στις πειραματικές μετρήσεις.

$u_2(f)$ : Η τυπική αβεβαιότητα που οφείλεται στις παραμέτρους των οργάνων.

$u_c(f)$ : Η συνολική τυπική αβεβαιότητα με ποσοστό εμπιστοσύνης 68%.

Εκτός από το E.I.M. τρία άλλα ινστιτούτα από διαφορετικές χώρες πήραν μέρος στις μετρήσεις του Μαΐου του 2005, τα προκαταρκτικά αποτελέσματα των οποίων δίνονται συνοπτικά στο Πίνακα 3 και γραφικά στο Σχήμα 3 (Τα ονόματα των άλλων ινστιτούτων

δεν παρουσιάζονται μια και η δι-εργαστηριακή δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη, εκκρεμεί η τελική έγκριση των αποτελεσμάτων).



Σχήμα 3. Οι τιμές της συχνότητας των προτύπων λέιζερ, σε σχέση με τα  $473\,612\,353\,000\text{ kHz}$ , όπως αυτές δίνονται στο Πίνακα 3. Η συνεχόμενη γραμμή παρουσιάζει την συνιστώμενη τιμή για τα  $633\text{ nm}$  σταθεροποιημένα με ατμούς ιωδίου λέιζερ ενώ οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν την αβεβαιότητα της τιμής αυτής<sup>3</sup>.

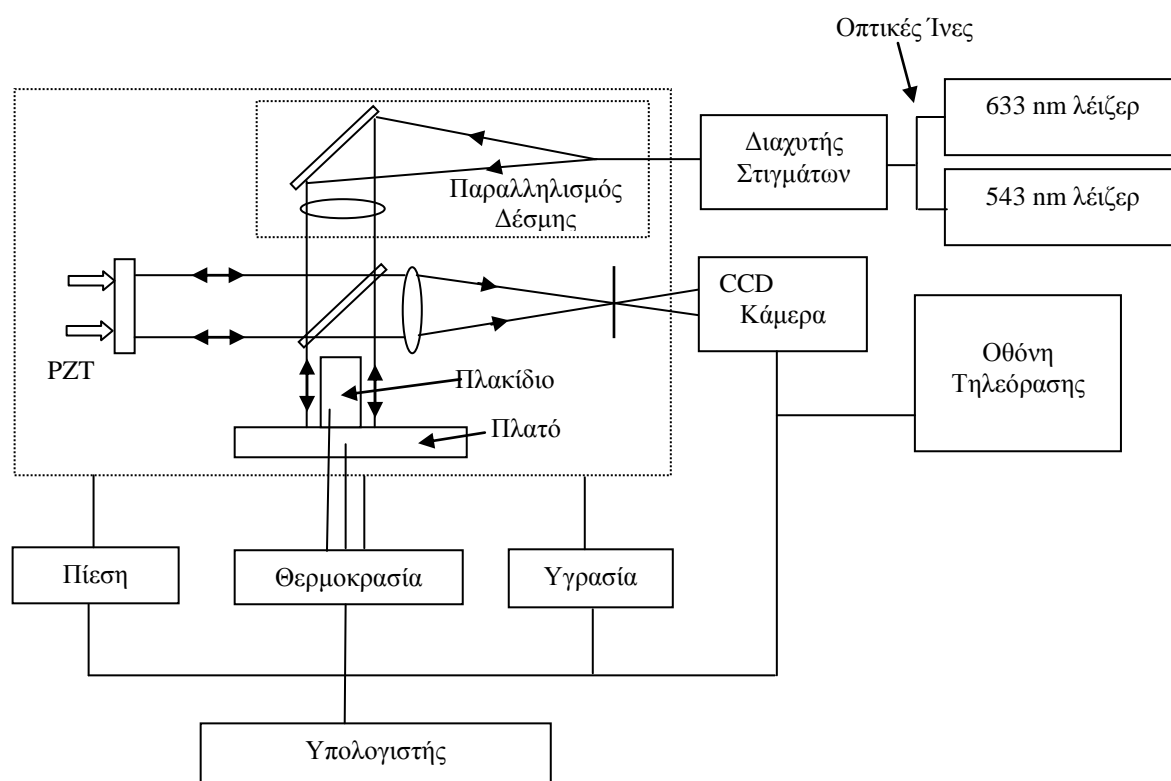
Η διακρίβωση άλλων λέιζερ όπως αυτών από διατάξεις συμβολής φωτός που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση μήκους, πραγματοποιείται με την συμβολή του φωτός του προτύπου και προς διακρίβωση λέιζερ και την μέτρηση της συχνότητας του διακροτήματος που δημιουργείται λόγω των παραπλήσιων συχνοτήτων των δύο δεσμών. Η συχνότητα του διακροτήματος αντιστοιχεί στη διαφορά των δύο συχνοτήτων και άρα γνώση της μίας εξ αυτών (συχνότητα προτύπου λέιζερ) συνεπάγεται και γνώση της άλλης. Με τον τρόπο αυτό αβεβαιότητες της τάξης των  $0.5\text{ MHz}$  επιτυγχάνονται στα εργαστήρια του E.I.M.

### 3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΠΛΑΚΙΔΙΩΝ ΜΗΚΟΥΣ ΜΕ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

#### 3.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

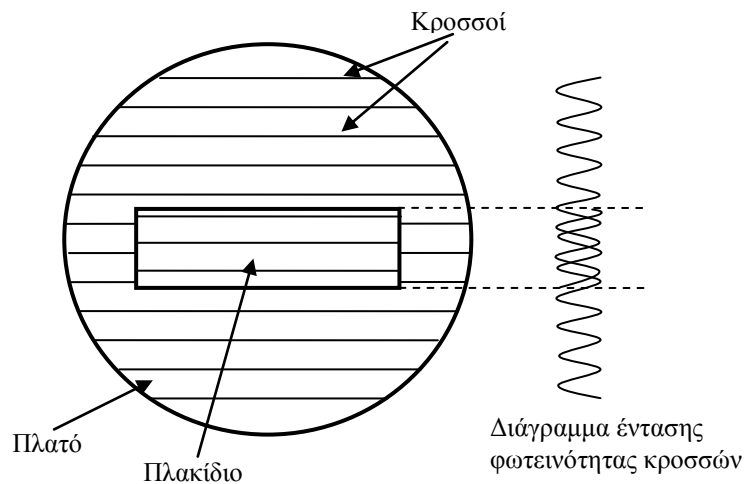
Η πειραματική διάταξη συμβολής φωτός με την οποία διακρίβώνονται πρότυπα πλακίδια μήκους περιγράφεται διαγραμματικά στο Σχήμα 4. Η διάταξη ουσιαστικά αποτελεί ένα συμβολόμετρο Michelson του οποίου ο ένας καθρέφτης έχει αντικατασταθεί με ένα πολύ επίπεδο πλατό πάνω στο οποίο τοποθετείται το προς μέτρηση πλακίδιο. Το πλακίδιο συγκρατείται στο πλατό με μοριακές κυρίως δυνάμεις οι οποίες οφείλονται στην

εγγύτητα των δύο «τέλειων» επιφανειών. Η διάταξη χρησιμοποιεί ως πηγές φωτός δυο λέιζερ (633 και 543 nm) των οποίων η συχνότητα διακρίβώνεται με την βοήθεια των προτύπων λέιζερ, ένα από τα οποία περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Ελέγχοντας με πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους την κλίση του άλλου καθρέφτη δημιουργούμε κροσσούς συμβολής οι οποίοι καταγράφονται από μία κάμερα από την εικόνα της οποίας η θέση των σκοτεινών κροσσών συμβολής υπολογίζεται. Από την σχετική μετατόπιση των κροσσών που προέρχονται από το πλατό και των κροσσών που προέρχονται από το προς μέτρηση πλακίδιο (Σχήμα 5) υπολογίζει κανείς το μήκος του πλακιδίου ως ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του φωτός συν  $\Delta\chi$ , όπου το  $\Delta\chi$  υπολογίζεται από το κλάσμα της σχετικής μετατόπισης των κροσσών. Επαναλαμβάνοντας την ίδια μέτρηση της σχετικής μετατόπισης των κροσσών και με το δεύτερο λέιζερ και γνωρίζοντας το μήκος του πλακιδίου με ακρίβεια περίπου 1.5  $\mu\text{m}$  ή καλύτερη, μπορεί κανείς να υπολογίσει το μήκος του με συνολική τυπική αβεβαιότητα καλύτερη από 20 nm<sup>5</sup>.



Σχήμα 4. Διάγραμμα διάταξης μέτρησης μήκους πρότυπων πλακιδίων με συμβολομετρία

Επειδή το μήκος του προς μέτρηση πλακιδίου υπολογίζεται ως πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του φωτός, ακριβής γνώση αυτού είναι απαραίτητη. Γνωρίζοντας με μεγάλη ακρίβεια την συχνότητα της ακτινοβολίας, επιπλέον απαιτείται γνώση με μεγάλη ακρίβεια του συντελεστή διάθλασης του αέρα, ο οποίος με την σειρά του είναι εξαιρετικά ευαίσθητος στην θερμοκρασία, υγρασία και πίεση του αέρα<sup>6,7</sup>. Οι μετρήσεις όλων αυτών των παραμέτρων πραγματοποιούνται καθ' όλη την διάρκεια της μέτρησης και μαζί με τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του πλατό και του προς διακρίβωση πλακιδίου χρησιμοποιούνται ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες διορθώσεις στο μήκος του προς διακρίβωση πλακιδίου.



Σχήμα 5. Κροσσοί συμβολής από το πλατό και το προς διακρίβωση πλακίδιο. Από την σχετική μετατόπιση των κροσσών όπως αυτή υπολογίζεται από το διάγραμμα έντασης φωτεινότητας υπολογίζεται το μήκος του πλακιδίου

### 3.2 Αβεβαιότητα μέτρησης πλακιδίων μήκους με συμβολομετρία στο E.I.M.

Στο Πίνακα 4 παρουσιάζονται όλοι παράγοντες που έχουν ουσιαστική συνεισφορά στην αβεβαιότητα του υπολογισμού του μήκους των πλακιδίων<sup>8</sup>, όπως αυτοί κατατέθηκαν κατά την διάρκεια της διεθνούς δι-εργαστηριακής (EUROMET.L-K1.1, Project 643)

Πίνακας 4. Πίνακας αβεβαιοτήτων μέτρησης πλακιδίων με συμβολομετρία στο EIM.

	$x_i$	$u(x_i)$	$n_i$	$c_i = \partial l / \partial x_i$	$u_i(l)$ (nm)
Wavelength 1	$\lambda_1$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	50	$L/2$	0,005 L
Wavelength 2	$\lambda_2$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	50	$L/2$	0,010 L
Fringe Fraction 1	$F_1$	0,14 fringe	5	$\lambda_1/4$	2,284
Fringe Fraction 1	$F_2$	0,14 fringe	5	$\lambda_2/4$	1,959
Air index of refraction	n	0,0174 nm/mm	50	L	0,017 L
Gauge block temperature	$\Delta t_g$	0,01 °C	50	$\alpha \cdot L$	0,043 L
Thermal coef. of expansion	$\alpha$	$5,77 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$	50	$\Delta t \cdot L$	0,017 L
Thermal effects 2 <sup>nd</sup> order	$\Delta t_g \alpha$ (2 <sup>nd</sup> ord.)	0,001 nm/mm	50	L	0,001 L
Obliquity	$\delta l_\Omega$	0,011 nm/mm	50	L	0,011 L
Source size	s	10 $\mu\text{m}$	50	$s/(8 f^2) L$	0,006 L
Wave-front errors	$\delta l_A$	3,406 nm	50	1	3,406
Flatness-parallelism	$\delta l_G$	2 nm	50	1	2,000
Wringing Film	$\delta l_w$	8 nm	50	1	8,000
Phase-change	$\delta l_\phi$	7,85 nm	50	1	7,850

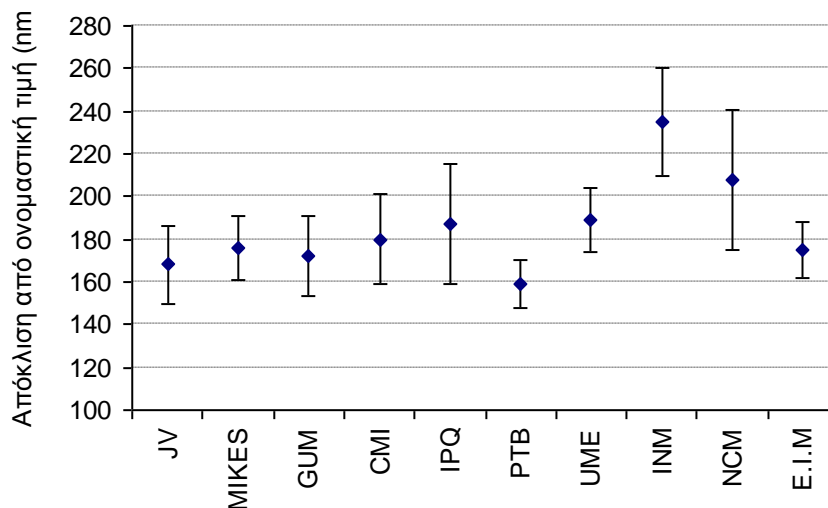


Από τον Πίνακα 4 για πλακίδια καρβίδιου του βολφραμίου και  $\alpha=4.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta t=0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $s=200 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $f=400 \text{ mm}$  η συνολική τυπική αβεβαιότητα δίνεται από:

$$u_c(l) = \sqrt{12,26^2 + 0,05^2 \cdot L^2} \quad (\text{nm})$$

Όπου L είναι σε mm. Η αβεβαιότητα των παραμέτρων του μήκους κύματος στο Πίνακα 4 συμπεριλαμβάνει την αβεβαιότητα διακρίβωσης των λέιζερ και την εκτίμηση πιθανών μακροπρόθεσμων μεταβολών. Από το Πίνακα 4 φαίνεται ότι οι σημαντικότερες πηγές αβεβαιότητας ειδικά για πλακίδια μεγαλύτερα των 20 mm προέρχονται από το υπολογισμό της θερμικής διαστολής των πλακιδίων καθώς και τον υπολογισμό του δείκτη διάθλασης του αέρα.

Στο Σχήμα 6 ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέτρησης ενός πλακιδίου των 100 mm, όπως αυτά προέκυψαν από την ίδια δι-εργαστηριακή EUROMET.L-K1.1, Project 643. Από την συμφωνία των αποτελεσμάτων του E.I.M. με αυτά των άλλων ινστιτούτων τεκμηριώνεται η ορθότητα των μεθόδων και των υπολογισμών των αβεβαιοτήτων που αφορούν την υλοποίηση του μέτρου.



Σχήμα 6. Αποτελέσματα μέτρησης πλακιδίου 100 mm, όπως αυτά προέκυψαν από την δι-εργαστηριακή EUROMET.L-K1.1, Project 643.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ορισμός του μέτρου στη Ελλάδα υλοποιείται με την χρήση δύο λέιζερ με συχνότητα σταθεροποιημένη με ατμούς ιωδίου καθώς και την χρήση διατάξεων συμβολής φωτός. Οι μετρητικές διαδικασίες που ακολουθούνται στο E.I.M. για την σύνδεση του άυλου ορισμού του μέτρου με φυσικά αντικείμενα και συγκεκριμένα πρότυπα πλακίδια μήκους έχουν ως τεκμηριωμένο μέσω διεθνών δι-εργαστηριακών αποτελέσματα ότι οι συνολικές τυπικές αβεβαιότητες που αφορούν την διακρίβωση πρότυπων πλακιδίων μήκους είναι της τάξης των 10 nm. Η υλοποίηση αυτή του μέτρου έχει ιχνηλασιμότητα, μετά και την συμμετοχή του ινστιτούτου μας στην δι-εργαστηριακή με τίτλο «BIPM.L.K11 ongoing key comparison, 2005» στα πρότυπα χρόνου του Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] *The International System of Units (SI)* (Bureau International des Poids et Mesures, 1998).
- [2] T. J. Quinn, *Metrologia* **36**, 211 (1999).
- [3] T. J. Quinn, *Metrologia* **40**, 103 (2003).
- [4] L.-S. Ma, L. Robertsson, J.-M. C. Susanne Picard, et al., *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **52**, 232 (2003).
- [5] D. J. Pugh and K. Jackson, *Proc. SPIE* **656**, 244 (1986).
- [6] G. Bönsch and E. Potulski, *Metrologia* **35**, 133 (1998).
- [7] B. Edlén, *Metrologia* **2**, 71 (1966).
- [8] J. E. Decker and J. R. Pekelsky, *Metrologia* **34**, 479 (1997).