

## **Encoder lineare con risoluzione sub-nanometrica realizzato con tecnologia laser Doppler, insensibile alla polarizzazione e con moltiplicatore di risoluzione ottico a multi-riflessione**

*Titolo originale:*

Sub-nanometer resolution linear encoder with polarization insensitive laser Doppler displacement meter technology and multi-reflection optics

Gianmarco Liotto<sup>1</sup>, Charles Wang<sup>2</sup> and Deming Shu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Optodyne Laser Metrology, Bernareggio, *ITALY*

<sup>2</sup> Optodyne, Inc, Rancho Dominguez, CA, USA

<sup>3</sup> Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill, USA

[optodyne@optodyne.it](mailto:optodyne@optodyne.it) [www.optodyne.it](http://www.optodyne.it)

### **Sunto:**

La nuova scienza della nanotecnologia necessita di trasduttori ed attuatori che hanno nello stesso tempo alte prestazioni ed un prezzo raggiungibile. Questa combinazione è stata resa possibile dalla tecnologia LDDM ( Laser Doppler Displacement Meter) [1,2] che è un interferometro con un singolo raggio coassiale (che ritorna lungo lo stesso percorso dell'andata) insensibile alla polarizzazione, che può usare ottiche a riflessione multipla, che moltiplicano la risoluzione del laser per il numero dei rimbalzi. Si possono realizzare sistemi di posizionamento contro-reazionati con risoluzione altissima e dimensioni compatte, con i quali si possono costruire sistemi di posizionamento per applicazioni scientifiche ed industriali. La tecnologia LDDM include e combina: singolo raggio laser coassiale, alta velocità, basso rumore ed elevata sensibilità; tutte caratteristiche necessarie per la realizzazione di apparati che possano avere risoluzione inferiore al nanometro e un elevato campo di movimento. In questo articolo si illustrerà brevemente la tecnologia LDDM, l'implementazione pratica di un moltiplicatore ottico, e la applicazione pratica in nano-posizionatori per raggi-X di forte intensità utilizzati per esperimenti scientifici al sincrotrone di Argonne National Laboratory (ANL).

### **1. Introduzione**

Per una misura interferometrica la risoluzione tipica è 2-10 nm. Comunque, a causa della circolazione dell'aria o turbolenza, il reale percorso del raggio laser (OPD) fluttua in lunghezza. La fluttuazione limita la precisione della misura laser. Viene usata una media su tempi lunghi per minimizzare l'effetto della turbolenza. Comunque, una integrazione troppo forte può portare ad un ritardo e ad inconvenienti nella misura. La risoluzione del laser è limitata dalla non linearità e dal rumore elettrico nel moltiplicatore. Per elevate prestazioni viene raggiunta una

risoluzione di 0,62 nm dividendo  $\lambda$  per 1024, ma è richiesto un elevato rapporto segnale/rumore S/N. Il segnale è condizionato dalla turbolenza dell'aria, dalla vibrazione e dal rumore acustico e aumentare la risoluzione, aumentando solo il fattore di divisione, è molto difficile da ottenersi.

## 2. Tecnologia LDDM

LDDM che non è sensibile alla polarizzazione, è basato sul principio del radar, l'effetto Doppler e l'eterodina ottica. Simile ad un laser Doppler, un bersaglio o un retroriflettore è illuminato dal raggio laser. La luce riflessa dallo specchio è modulata in frequenza dal movimento dello specchio. Un demodulatore di fase misura la variazione di fase, la quale corrisponde al movimento del riflettore all'interno di una semionda. Un contatore registra il numero delle lunghezze d'onda. L'uscita del demodulatore di fase è una funzione lineare che può essere convertita direttamente da un convertitore analogico digitale A/D e sommata al contatore. LDDM ha un singolo raggio coassiale con singola apertura ed è compatibile con un retroriflettore catadiottrico molto piccolo (1-3 mm) o uno specchio piano come bersaglio. Il raggio coassiale in combinazione con la elevata tolleranza di disallineamento può essere usato in uno svariata combinazione di schemi ottici, incluso il multiplo rimbalzo (o passo) per incrementare la risoluzione e la stabilità.

## 3. Ottica a rimbalzo multiplo per attuatore lineare a singolo asse.

L'ottica a rimbalzo multiplo è una combinazione ottica, che provvede a far rimbalzare più volte in raggio laser tra il retroriflettore e specchi o prismi solidali al laser. Si è verificato che l'ottica a rimbalzo multiplo aumenta la risoluzione e riduce l'effetto della turbolenza dell'aria. L'ottica a rimbalzo multiplo sviluppata da Optodyne può essere facilmente utilizzata attaccando l'accessorio 'adattatore ottico' alla testa laser del sistema di calibrazione laser MCV-500 ed usando un retroriflettore di diametro 25mm come bersaglio come illustrato in fig.1. Il numero di rimbalzi tra riflettore e laser è moltiplicato per 6, il che trasforma un movimento del retroriflettore di 1 mm in 6 mm di percorso ottico effettivo. Per un MCV-500 standard il campo operativo è maggiore di 12m. Per cui il campo operativo dell'adattatore a 6-passi diventa 2m. Siccome la massima velocità è 5 m/s la massima velocità con l'adattatore a 6-passi diventa 800 mm/s.

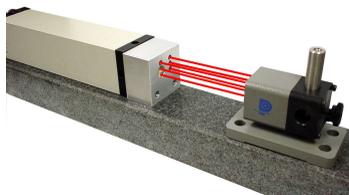


Fig. 1: Immagine di un adattatore ottico 6-passi.

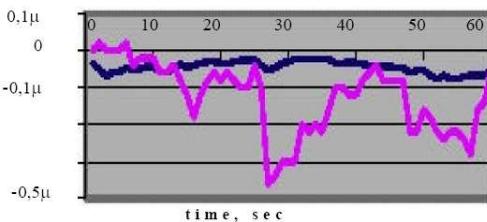
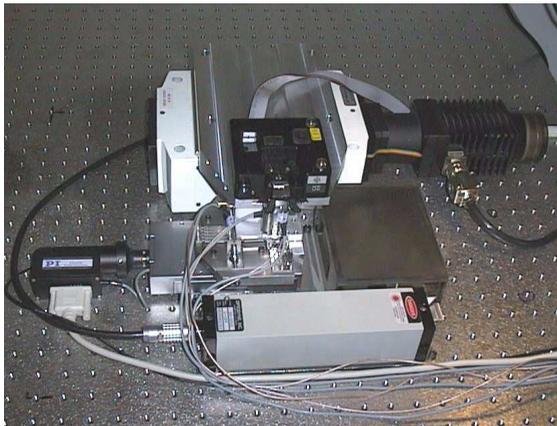


Fig. 2: Effetto della circolazione dell'aria di un adattatore 6-passi rispetto al singolo passo.

per verificare che l'ottica a rimbalzo multiplo può ridurre l'effetto della variazione dell'indice di rifrazione dell'aria, sono stati posti due sistemi sullo stesso asse con i retroriflettori montati sullo stesso supporto e con uguale distanza tra i laser.

Un tipico risultato è illustrato in fig. 2 . La linea scura è la fluttuazione del 6-passi mentre la linea chiara è il sistema a singolo passo. L'effetto della circolazione dell'aria e il cambiamento dell'indice di rifrazione, è considerevolmente ridotto con l'ottica a 6-passi.



All'Advanced Photon Source (APS), Argonne National Laboratory (ANL) negli USA, è stato sviluppato e provato un attuatore lineare singolo asse a laser Doppler, con risoluzione controllata a circuito chiuso di 1-angstrom e 50mm di corsa utilizzando un sistema LDDM e con un ottica a 12-passi sviluppata in ANL, con meccanismo di

riduzione meccanica lineare (high-stiffness weak-link) e controllo basato su DSP [3].

#### 4. Misura su 3 dimensioni con ottica a rimbalzo multiplo

Come parte fondamentale della struttura di caratterizzazione di APS, per il Centro di Nano-Materiali (CNM) all'interno di ANL, è stato costruito uno strumento di selezione per raggi X ad alta energia o hard x-ray nanoprobe [7] con scala nanometrica e controllo attivo delle vibrazioni. Uno speciale sistema LDDM progettato per l'applicazione garantisce una doppia misura differenziale di spostamento con risoluzione nanometrica dello spostamento della piastra con l'ottica a raggi x e il supporto del campione [4]. Il sensore a eterodina dell' LDDM è inscatolato coassialmente all'interno della sorgente laser stabilizzata in frequenza, e solidale all'ottica autoallineante ad 8 riflessioni, il raggio laser è riflesso avanti e indietro 8 volte tra la base fissa e il bersaglio mobile

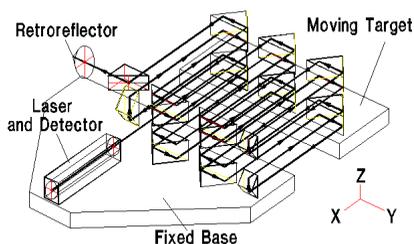


Fig. 3: adattatore ottico 25-passi.

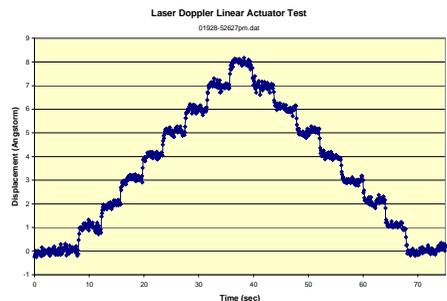


Fig. 4: Risultato sperimentale che illustra passi di 1-angstrom .

## 5. Futuri sviluppi e sommario.

In USA un programma congiunto DOE del (Dipartiment Of Energy) denominato CRADA (Cooperative Research and Development Agreement) tra ANL ed Optodyne è stato costituito per lo sviluppo di un prototipo di LDDM a rumore ultra-basso per misure di risoluzione sub-nanometrica per applicazioni con radiazioni generate da sincrotrone. Per ottenere un migliore rapporto segnale disturbo, dobbiamo migliorare l'efficienza dell'eterodina e ridurre lo shot noise del sensore mediante una opportuna schermatura e con l'aggiunta di un filtro passa basso. Un LDDM con un rumore di fondo di  $\sim 1\text{nm}$  è stato dimostrato usando un nuovo e migliorato sistema LDDM con ottica a riflessione singola come illustrato in Fig. 5. Attualmente è in corso la prova di un nuovo sistema LDDM con ottica a passaggio multiplo e passi di 0,1 nm e feedback a loop chiuso .

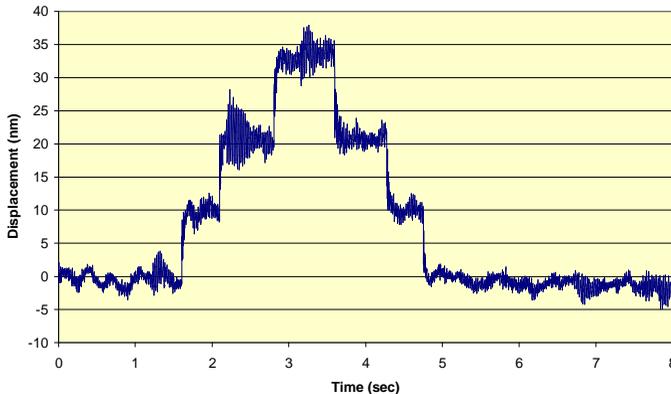


Fig. 5: Passi di 10 nm steps , Open-loop misurati con sistema LDDM con ottica a singolo passaggio

## Acknowledgments

D. Shu and work at Argonne is supported by the U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Basic Energy Sciences, under Contract No. DE-AC02-06CH11357.

## References

- [1] LDDM is a trademark of the Optodyne Inc., CA 90220, U.S.A.
- [2] C. P. Wang, *Laser & Optronics*, 4 (9) 69-71 (Sept. 1987)
- [3] D. Shu, Y. Han, T. S. Toellner, and E. E. Alp, "A linear actuator with 1-angstrom closed-loop control resolution and 50-milimeter travel range", *Proceedings of SPIE Vol.4771* (2002) 78-90.
- [4] D. Shu, J. Maser, M. Holt, R. Winarski, C. Preissner, B. Lai, S. Vogt, and G.B. Stephenson, *Nucl. Instrum. and Methods A* 582 (2007) 159-161.
- [5] G. Liotto "Applicazioni dell'interferometria laser ad alta risoluzione". Workshop Metrologia per le nanotecnologie Torino 12-13 Maggio 2004
- [6] Charles P.Wang Gianmarco Liotto "Nanometer Positioning by Laser Doppler Scale Feedback and Multiple-Pass Optic, an Application of High-Resolution Laser Interferometry" *Nanotec newsletters* No2 Ottobre 2004
- [7] Hard x-ray nanoprobe wikipedia [http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray\\_nanoprobe](http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_nanoprobe)



# HARD X-RAY NANOPROBE

The Hard X-ray Nanoprobe provides X-ray microscopy at a spatial resolution of 30 nm, deploying nearly all well-established powerful X-ray analysis capabilities, with application to a wide range of materials. X-ray analysis capabilities available allow quantitative elemental analysis with sub-attogram detection sensitivity and parts-per-billion trace sensitivity, chemical/electronic analysis, crystallographic phase determination, and crystallographic texture mapping. Additionally, the dynamics of materials can be studied at the nanoscale by using such techniques as speckle-interferometry.



*Advanced Photon Source in Argonne National Laboratory:  
One of the brightest x-ray sources in the world.*

