

Interferometria di Talbot-Lau con raggi X di alta energia e sorgenti convenzionali

Matteo Abis
matteo.abis@psi.ch

Scuola Galileiana di Studi Superiori
Classe di Scienze Naturali

22 Novembre 2013

Radiografia e assorbimento



Figura: Una delle prime radiografie realizzate da Wilhelm Röntgen, 1886.

Interazione dei raggi X

- Indice di rifrazione complesso $n = 1 - \delta + i\beta$.
- Legge di Beer-Lambert

$$\begin{aligned}\psi_f &= e^{-ik(\delta-i\beta)z} \psi_i \\ &= e^{-i\varphi z} e^{-\mu z} \psi_i\end{aligned}$$

- $\delta \rightarrow$ interazione di fase, rifrazione
- $\beta \rightarrow$ assorbimento

Effetto Talbot

1836



Figura: Henry Fox Talbot nel 1864.

Effetto Talbot

Propagatore di Fresnel

- Propagazione come moltiplicazione nello spazio di Fourier:

$$\psi(z = z_0) = \mathcal{F}_x^{-1} \mathcal{P} \mathcal{F}_x \psi(z = 0)$$

- Onda con periodo p_1 lungo x , propagazione lungo z .
- Vettore d'onda $\vec{k} = (k_x, k_z)$.
- Propagatore a distanza z_0 ($k_{xj} = 2\pi j/p_1$):

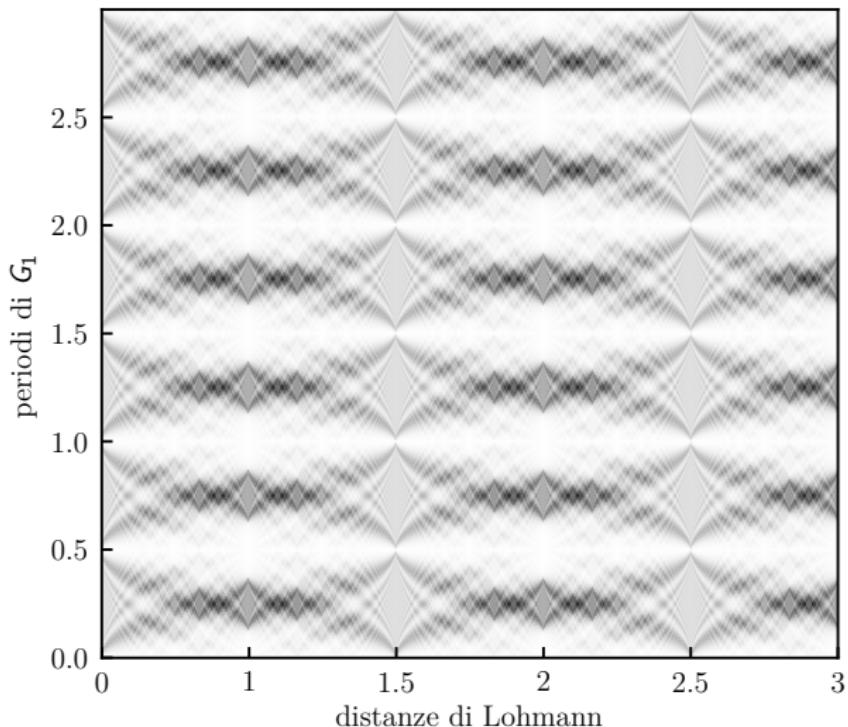
$$\mathcal{P} = e^{-iz_0 k_{xj}^2 / 2k}$$

- Il propagatore è uguale a 1 per distanze

$$\mathcal{P} = 1 \iff z_n = n \frac{p_1^2}{2\lambda}$$

Effetto Talbot

immagine di un reticolo ricreata a distanze regolari



Interferometro di Talbot

Principio fondamentale

Rifrazione → spostamento laterale delle frange.

Confrontare la figura d'interferenza con e senza il reticolo fornisce informazioni su δ .

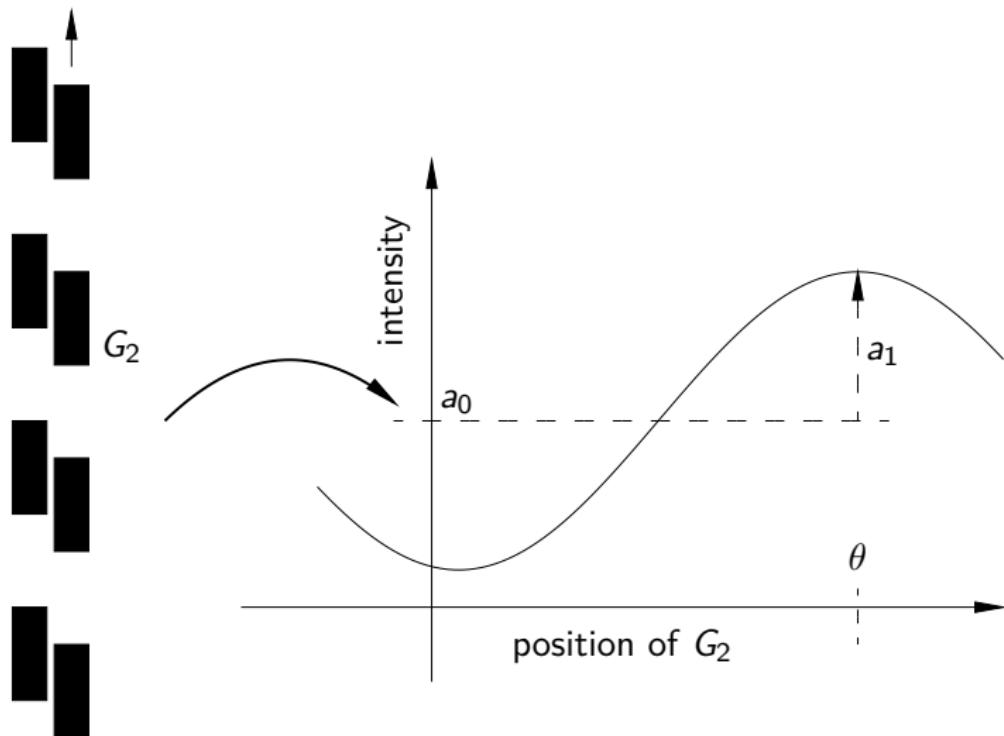
Angolo di rifrazione

$$\alpha = -\frac{1}{k} \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

Interferometro di Talbot

Periodo microscopico e reticolo analizzatore

Scansione della figura d'interferenza con un secondo reticolo G_2 .



Analisi dati

Tre segnali dalle curve di *phase stepping*

Confronto delle curve con (s_c) e senza (s_s) campione

$$s(x) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{p_2}x + \theta\right)$$

Analisi dei parametri a_0 , a_1 e θ

assorbimento

$$A = a_{0c}/a_{0s} \quad \text{radiografia tradizionale}$$

fase differenziale

$$P = \theta_c - \theta_f \quad \text{spostamento laterale delle frange}$$

riduzione di visibilità

$$B = \frac{a_{1c}}{a_{1s}} \frac{a_{0s}}{a_{0c}} \quad \text{disomogeneità su scala microscopica}$$

Sensibilità e visibilità

Visibilità

rapporto tra ampiezza e media della curva senza campione

$$v = \frac{2a_1}{a_0}$$

Sensibilità

Errore statistico sull'angolo di rifrazione

$$\sigma_\alpha \propto \frac{p_2}{v}$$

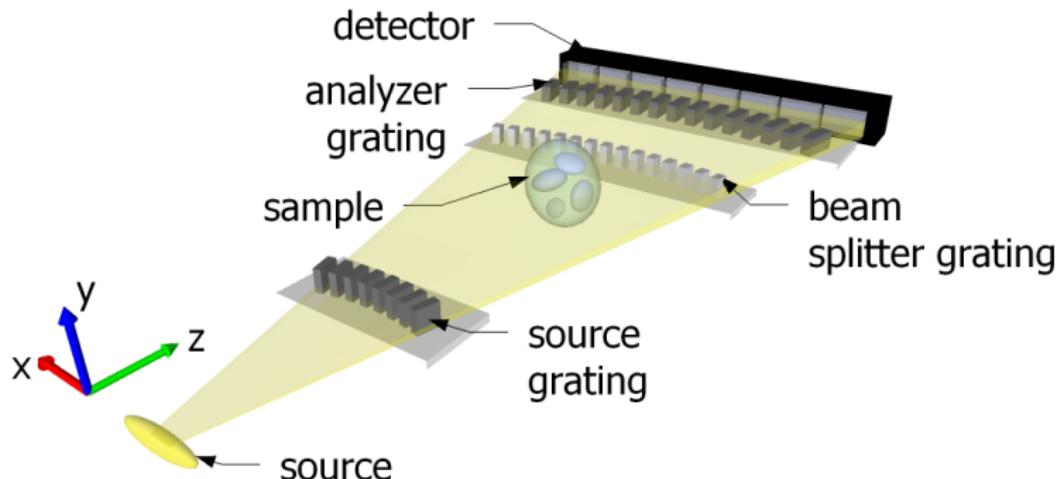
necessari periodi piccoli ($2.8 \mu\text{m}$) e visibilità elevata

Visibilità

Per aumentare la visibilità sono necessari

- assorbimento $\approx 100\%$ della radiazione nei reticoli
- massima omogeneità e qualità dei reticoli
- allineamento su scale di $\approx 10 \mu\text{m}$

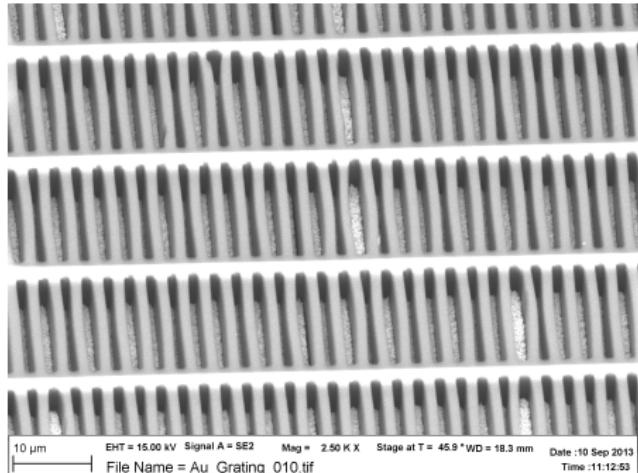
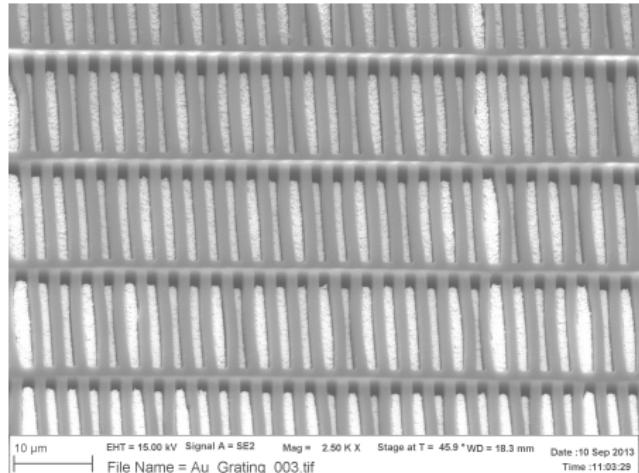
Geometria edge-on



- assorbimento fino a 160 keV → spessore di 800 μm d'oro
- impossibile da fabbricare con periodo di 2.8 μm
- illuminazione da un lato → reticolli unidimensionali ma profondi

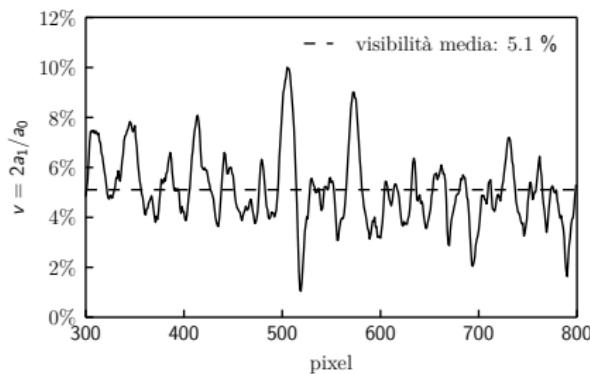
Reticoli al microscopio elettronico

Deformazioni e sviluppo incompleto di alcune aree.

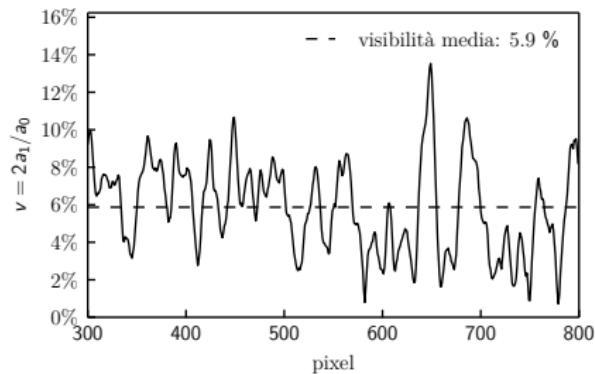


Prestazioni

Visibilità ridotta dai difetti nei reticolati
massimo teorico $\approx 25\%$



(a) 100 keV



(b) 120 keV

Immagini

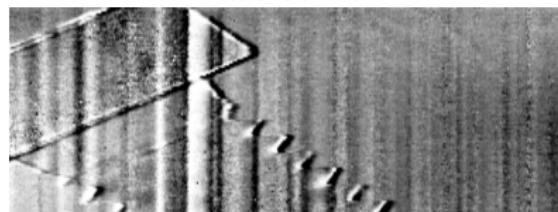
Vite di zinco a 100 keV

scansione verticale di 1 cm con 100 linee.

assorbimento



fase differenziale



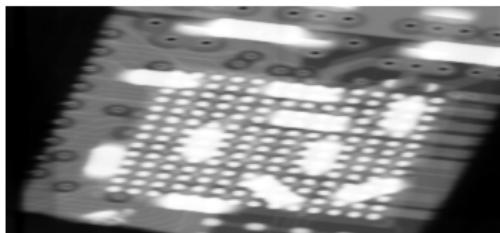
riduzione di visibilità



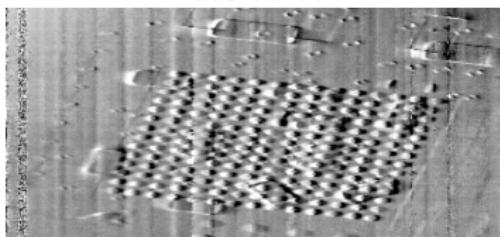
Immagini

Chip a 100 keV

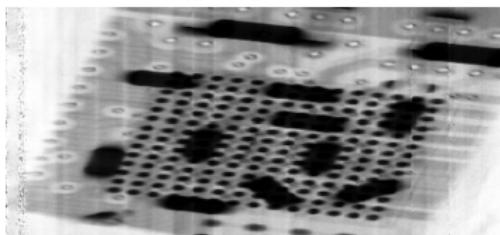
assorbimento



fase differenziale



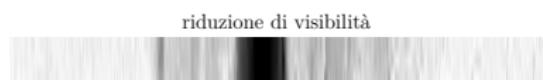
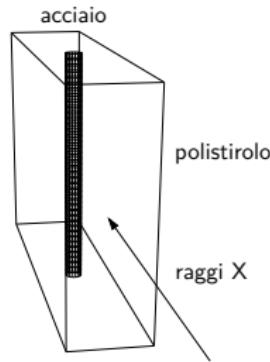
riduzione di visibilità



Immagini

Complementarietà dei segnali

Campione di polistirolo e acciaio, 120 keV



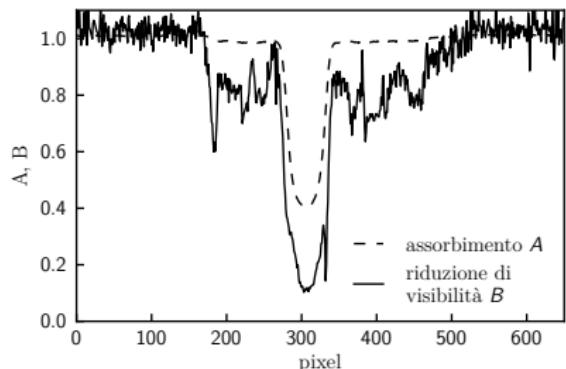
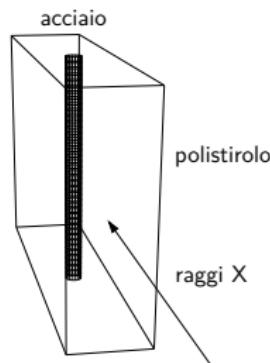
Assorbimento polistirolo $\approx 2\%$

Scattering $\approx 20\%$

Immagini

Complementarietà dei segnali

Campione di polistirolo e acciaio, 120 keV



Assorbimento polistirolo $\approx 2\%$

Scattering $\approx 20\%$

Conclusioni

- Realizzazione di due interferometri con energie di 100/120 keV
- Illuminazione *edge-on* possibile anche a energie superiori
- Dimostrazione della complementarietà dei segnali
- Possibile riduzione del tempo di esposizione di un ordine di grandezza con il miglioramento dei reticolì
- Applicabile a scanner di sicurezza e per la tomografia, che richiedono voltaggi elevati