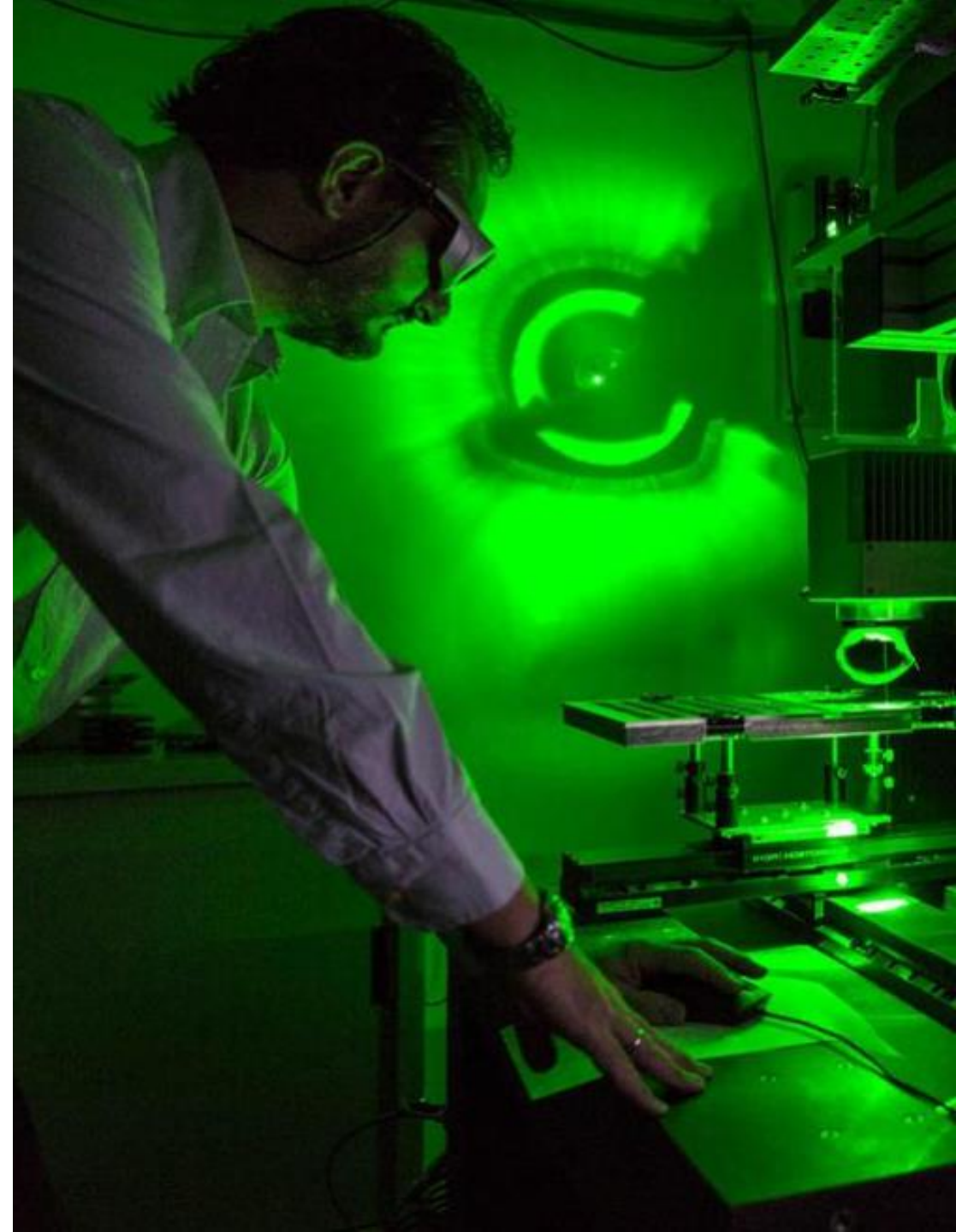


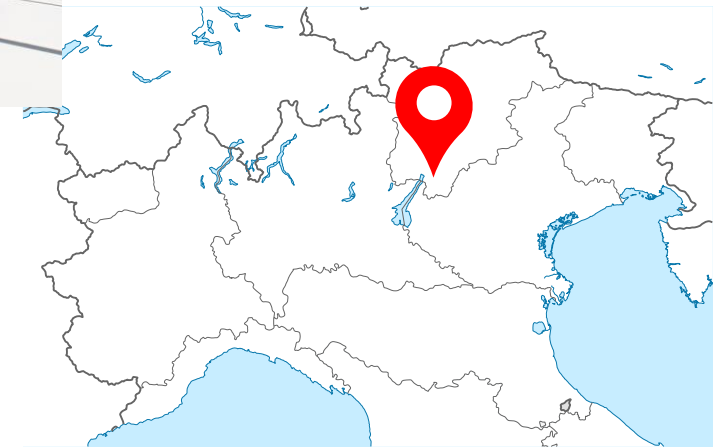
# Acquisizione automatica di immagini topografiche SEM per la ricostruzione 3D di microlavorazioni laser

Dr. Matteo Verdi  
Kirana srl  
[m.verdi@kirana-laser.it](mailto:m.verdi@kirana-laser.it)

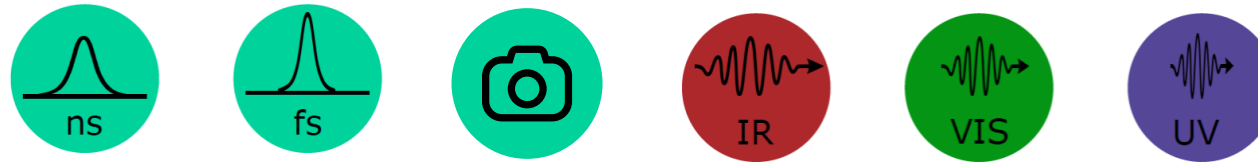
Kirana è un'azienda specializzata nello sviluppo di **processi di microlavorazione laser** finalizzati ad attività di **produzione conto terzi**.



Fondata nel **2012**, Kirana è  
una SME insediata Polo  
Meccatronica di Rovereto

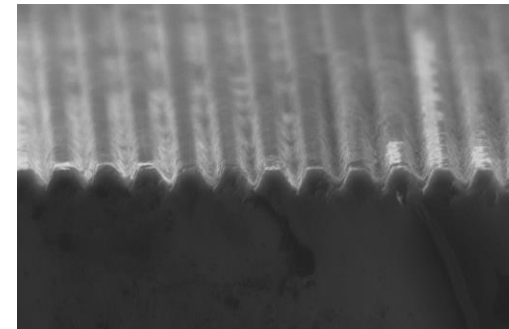
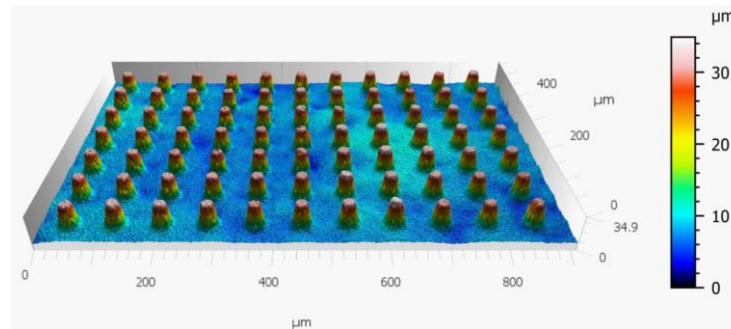


La variegata gamma di sorgenti laser funzionanti presso i laboratori di Kirana permette di scegliere di volta in volta il sistema più appropriato al fine di processare, con specifiche molto spinte, qualsiasi tipo di materiale industriale: metalli, ceramiche, polimeri, dielettrici, semiconduttori e compositi.



Inoltre, il reparto produttivo ha il supporto di strumenti metrologici avanzati usati per la validazione dei processi e il controllo qualità.

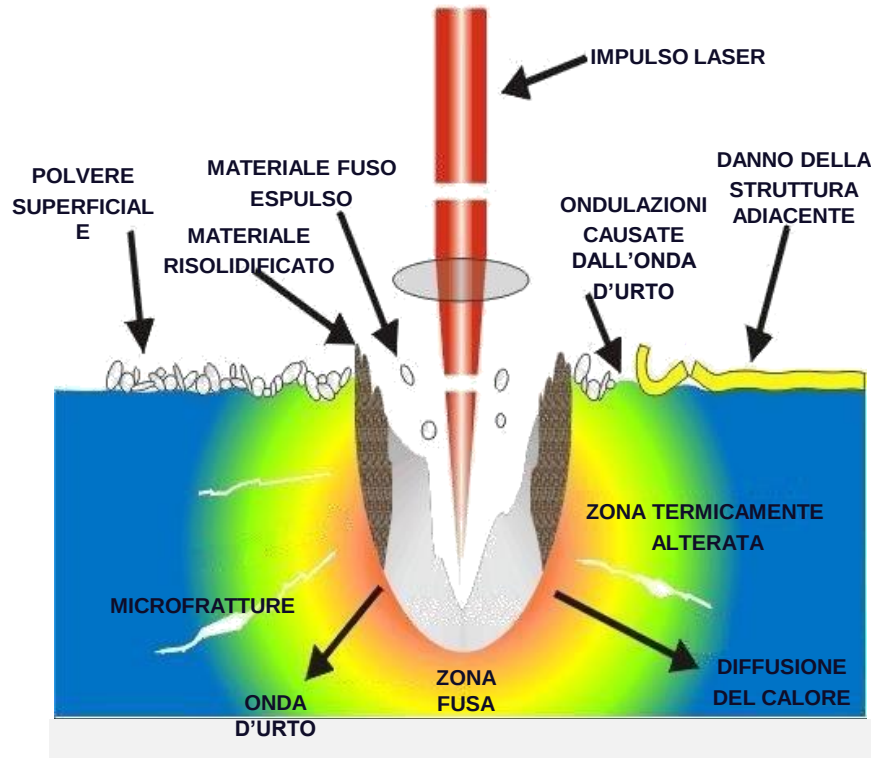
3D White light  
interferometer



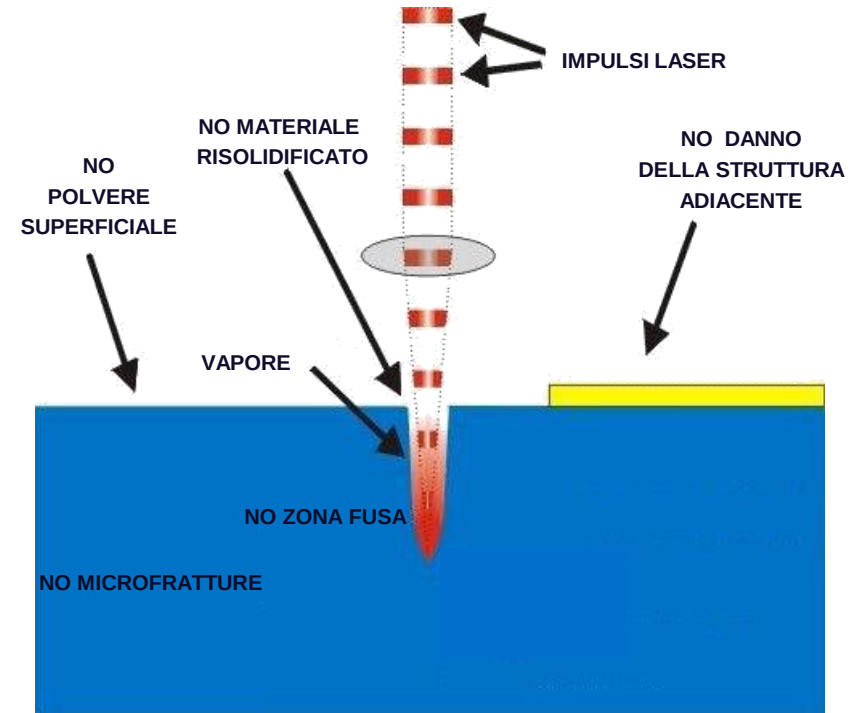
SEM

Kirana svolge, un servizio completo che va dallo studio di fattibilità allo sviluppo di processo, fino alla lavorazione conto terzi su prototipi, pre-serie e lotti in grandi volumi produttivi.

# Rimozione del materiale: Termica vs ablazione fredda



- Diffusione del calore
- Presente zona termicamente alterata
- Il materiale viene fuso e rimosso sotto forma di gocce di liquido
- Deposito superficiale: lavorazione non “pulita”
- Elevato spessore di materiale risolidificato sulle pareti
- Micro-cricche sulle pareti
- Scarsa ripetibilità

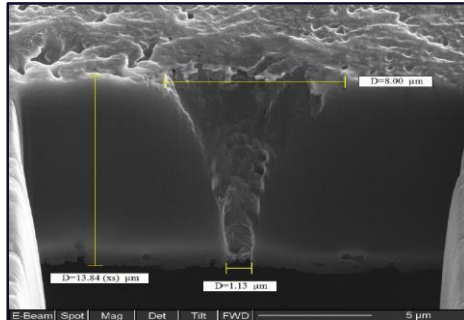


- La superficie vaporizza “istantaneamente”
- Il materiale viene rimosso sotto forma di vapore
- Lavorazione “pulita”
- No zona termicamente alterata
- No micro-cricche sulle pareti
- Elevata ripetibilità

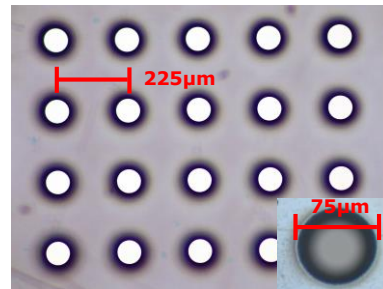
## Micro-foratura:

Fori fino ad 1 micron di diametro su materiali metallici e non metallici, tipicamente con spessore fino al millimetro.

- Fori da 1 $\mu$ m per “flow cell” microforate che costituiscono il componente principale del sistema di detection di nanoparticelle.



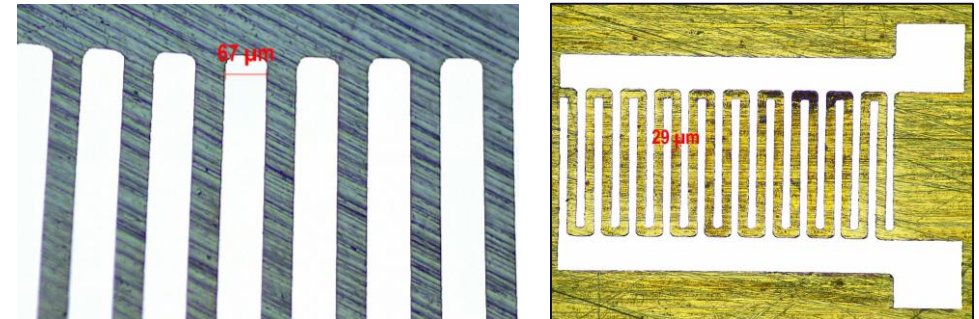
- Microfori calibrati su vetro per leak test per fiale, flaconi, sacche e siringhe.
- Microfori su membrane polimeriche per analisi cellulare.



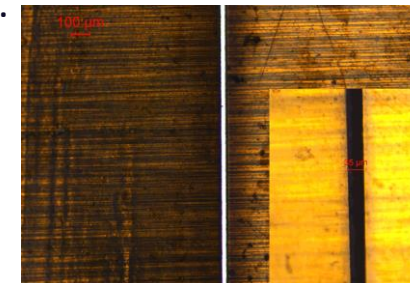
## Micro-taglio laser:

La capacità di ottenere kerf inferiori a 10 micron permette di realizzare microstrutture per componenti ad elevata specializzazione.

- Maschere ottiche e per deposizione materiali realizzate su acciaio e ottone.

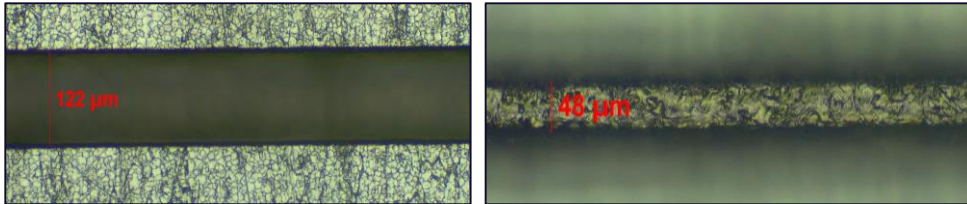


- Microtaglio di polimeri avanzati: fessura di 35  $\mu$ m su 100  $\mu$ m di Kapton.

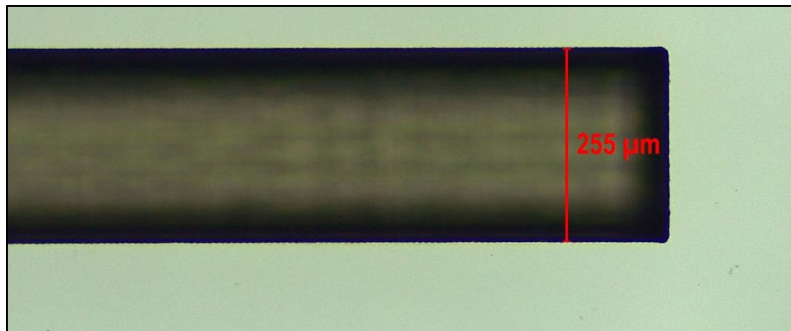


## Micro-incisione:

- Microcanali su acciaio, con applicazioni per micro fluidica, componenti per strumenti ottici, microelettronici e micromeccanici.

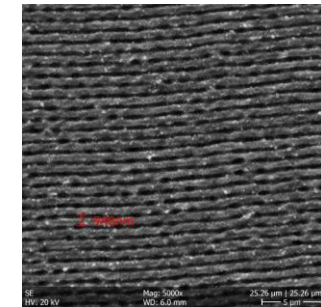
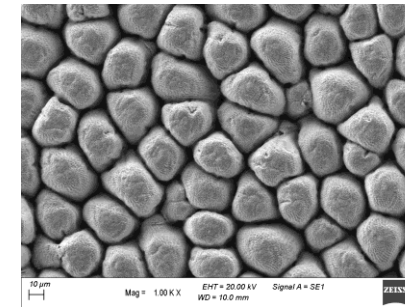


- Microcanali su vetro.

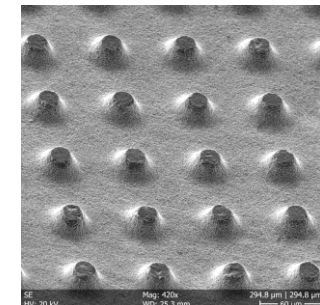
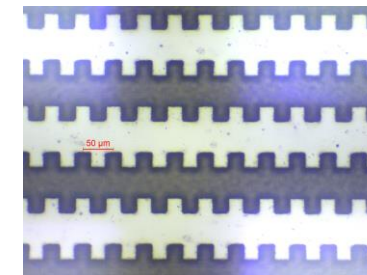


## Micro-strutturazione superficiale:

- Laser Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) superfici a bagnabilità ed attrito variabile.



- Superfici tribologiche per controllo attrito realizzate su vetro.

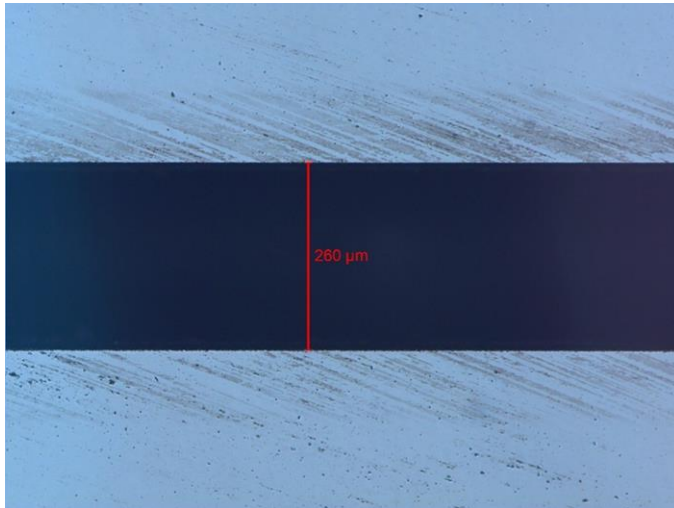


- Strutturazione per SOFC.

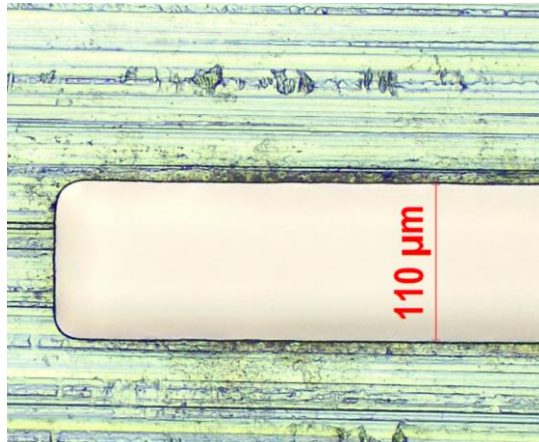
$\mu\text{m}$    $\text{nm}$

Poche centinaia di micron

Canale su Silicio

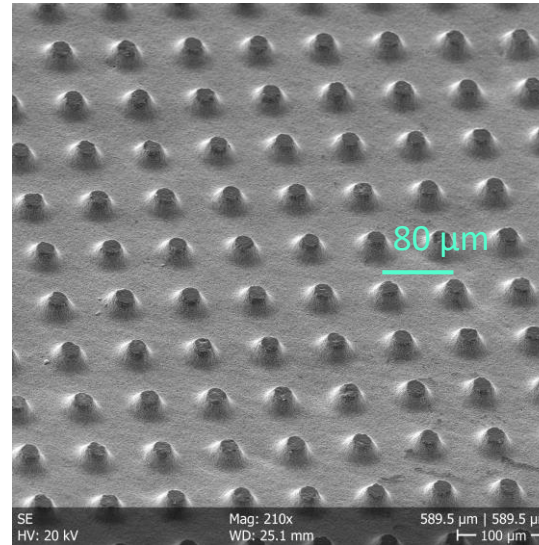


Taglio alluminio

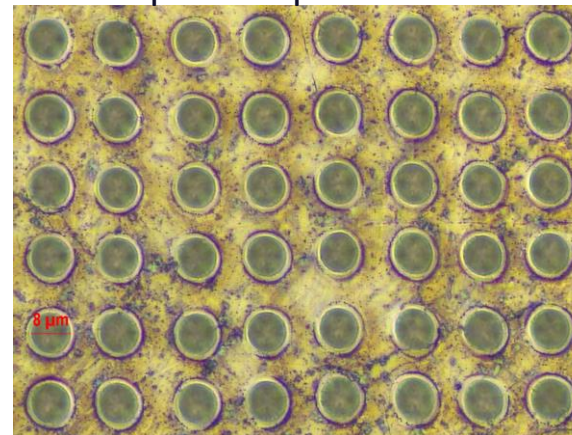


Poche decine di micron

Pillars su materiale ceramico con passo 80  $\mu\text{m}$

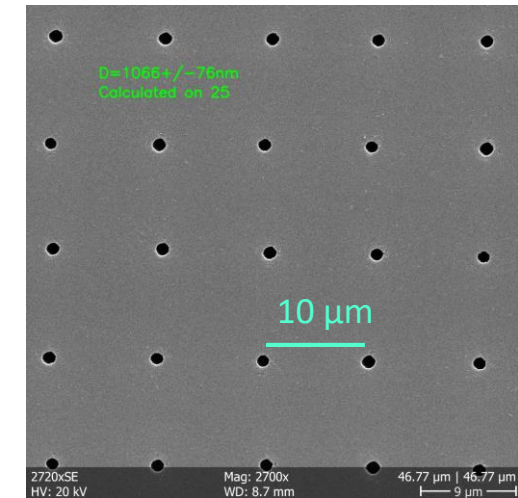


Dimples di 8  $\mu\text{m}$  su acciaio

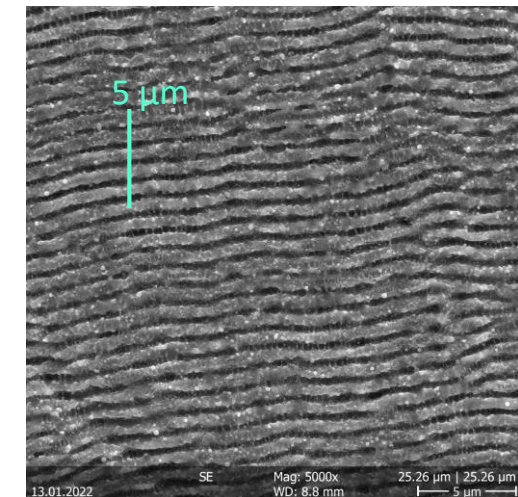


Strutture sub-micrometriche

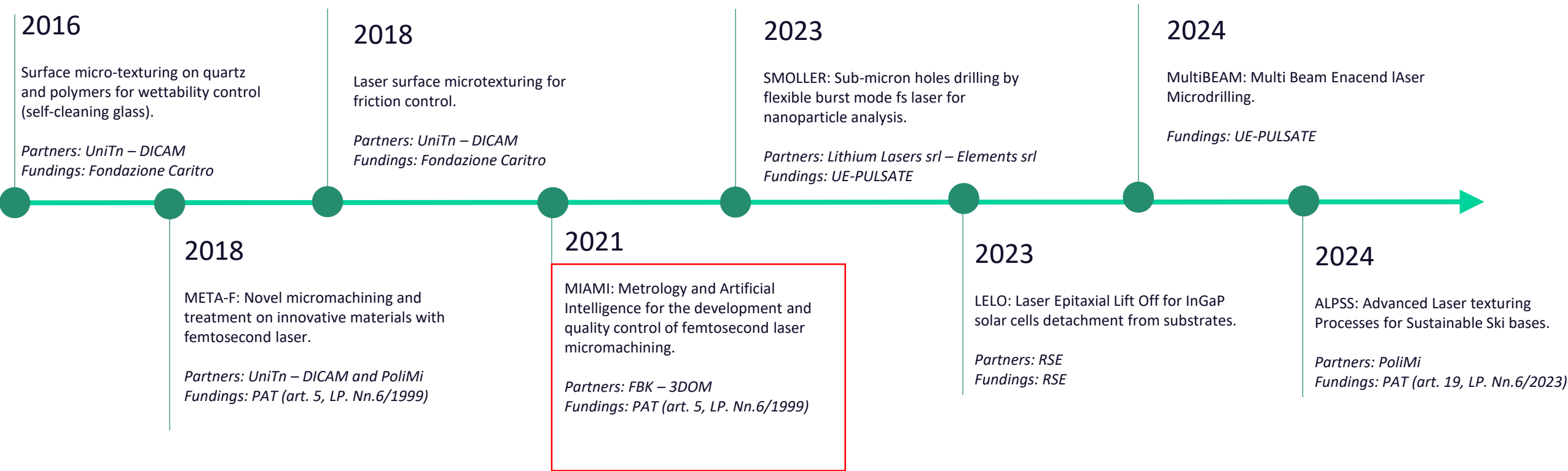
Matrice di fori da 1  $\mu\text{m}$  su Kapton



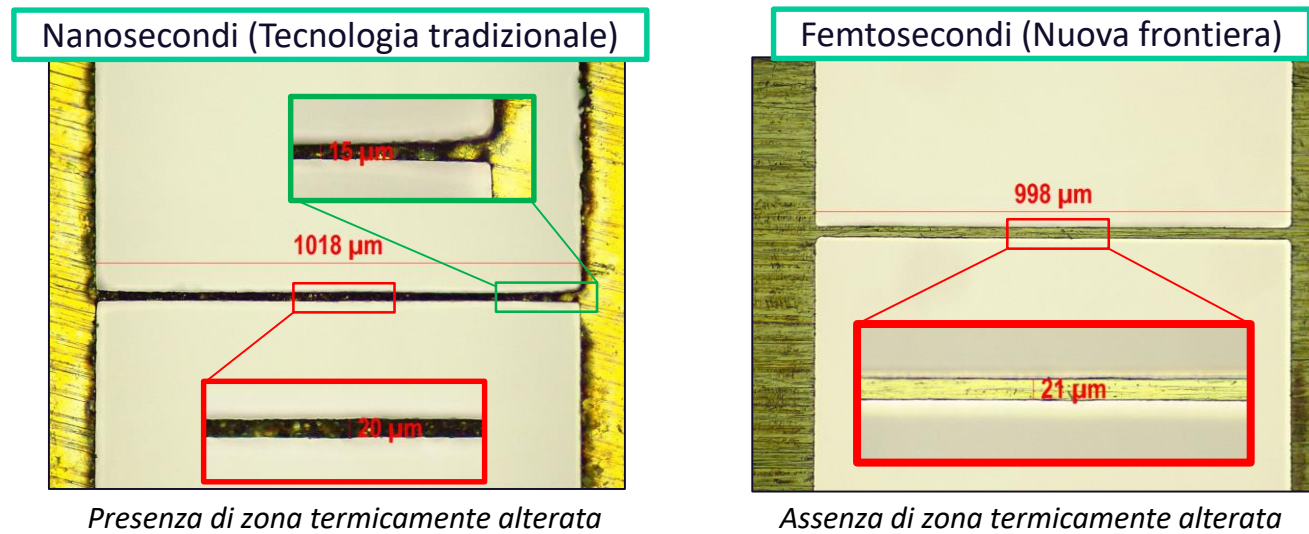
LIPSS su acciaio



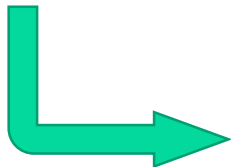
Il team di R&D è costantemente impegnato con università e centri di ricerca di eccellenza in progetti di ricerca volti a trovare e sviluppare nuovi processi di microlavorazione laser per nuove applicazioni. Queste collaborazioni garantiscono un continuo aumento del know-how di kirana. Questo si traduce in un servizio all'avanguardia per i clienti.



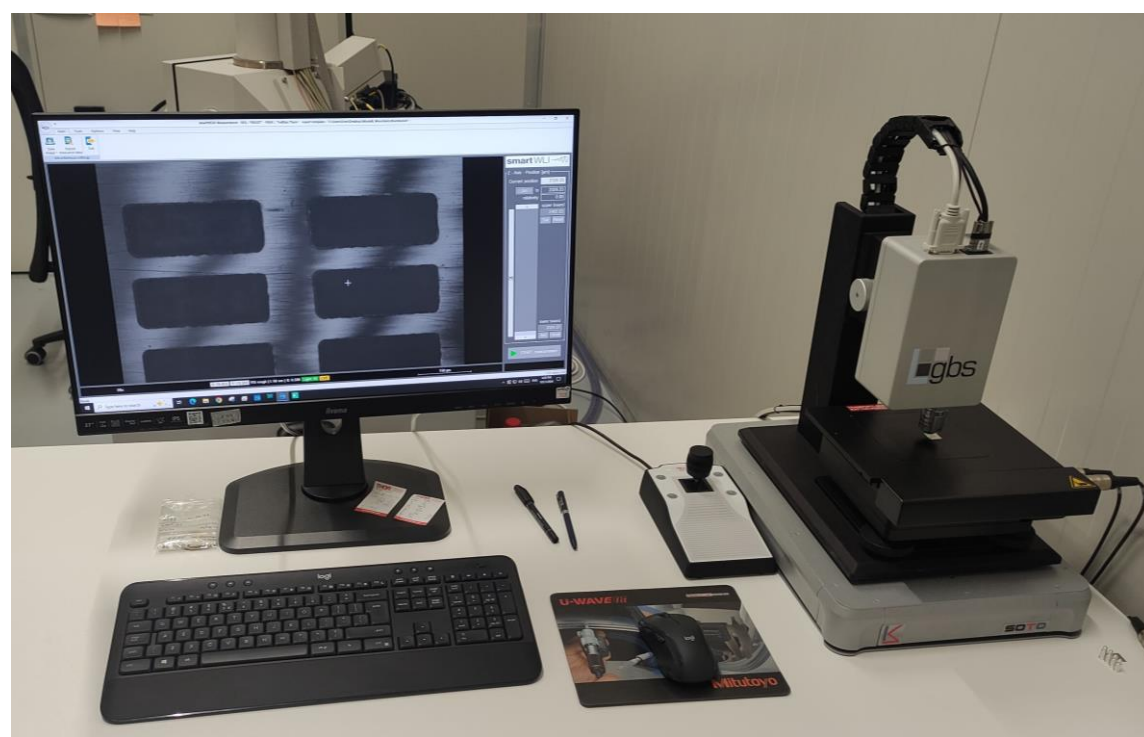
- I laser a **femtosecondi** rappresentano l'ultima frontiera tecnologica nel settore delle microlavorazioni sui materiali. Questa tecnologia, caratterizzata dalla generazione di impulsi laser estremamente brevi, permette di asportare materiale senza che il calore influisca sul processo, rendendo quindi possibile la cosiddetta "ablazione fredda" che favorisce l'estrema precisione e qualità delle microlavorazioni.



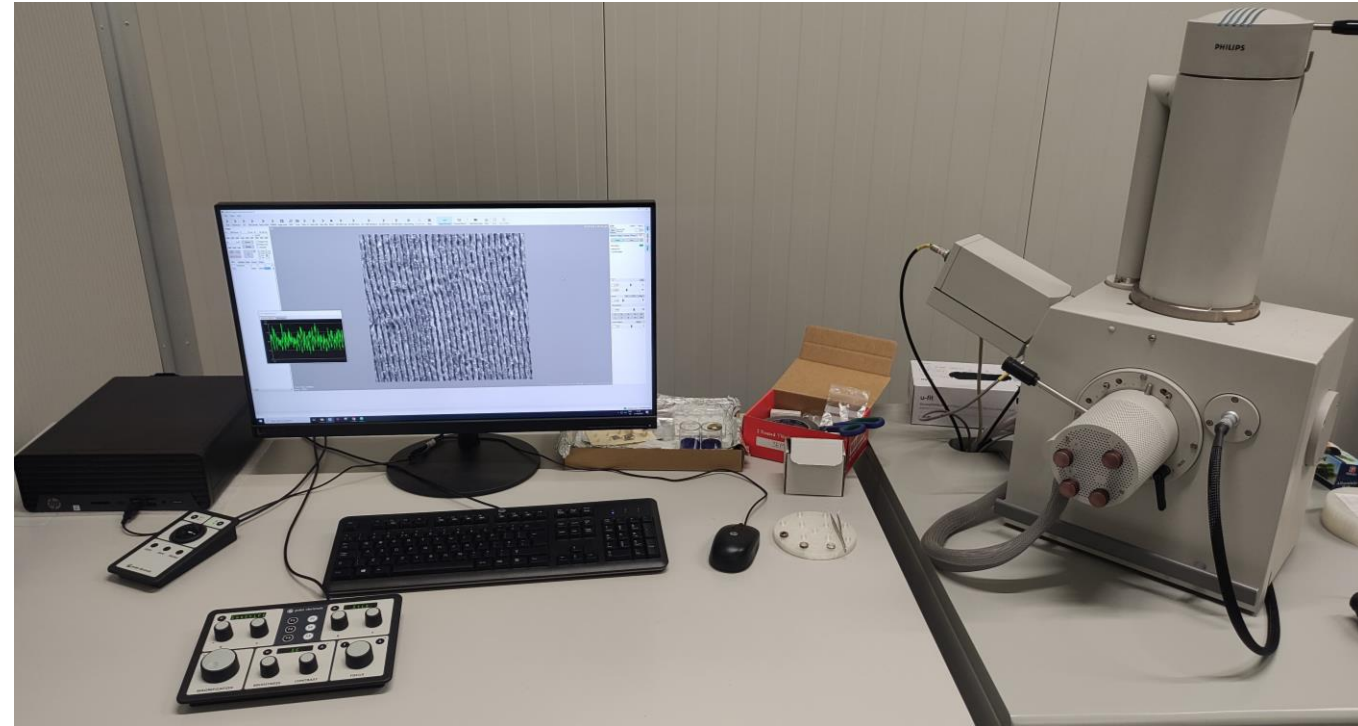
- Lo sviluppo di nuovi processi con tecnologia laser a femtosecondi risulta tuttavia estremamente complesso, data la necessità di gestire e comprendere le relazioni di causa-effetto tra una notevole quantità di parametri, correlati tra loro in modo tipicamente non lineare.



MIAMI – Metrologia e AI per supportare l'operatore nella messa a punto dei processi.

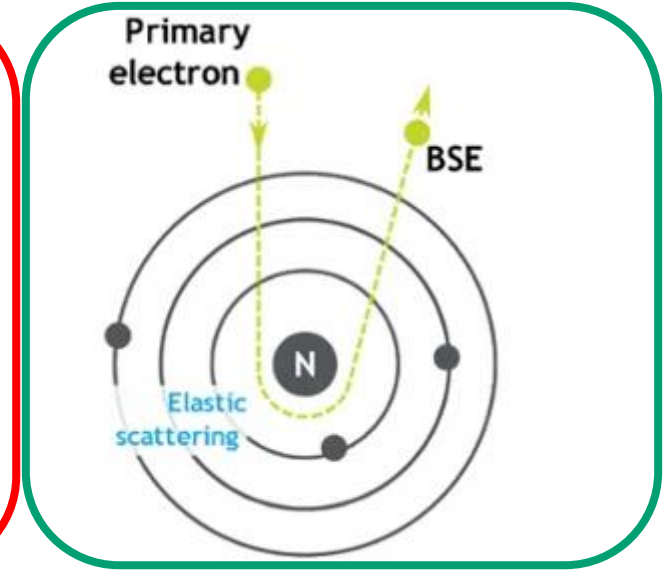
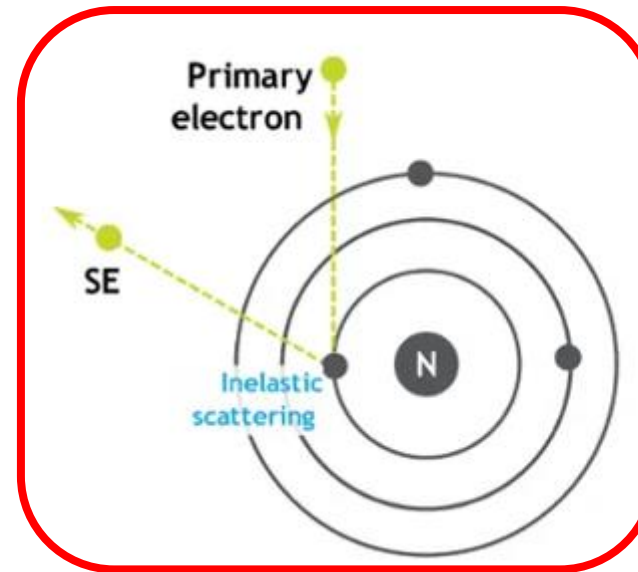
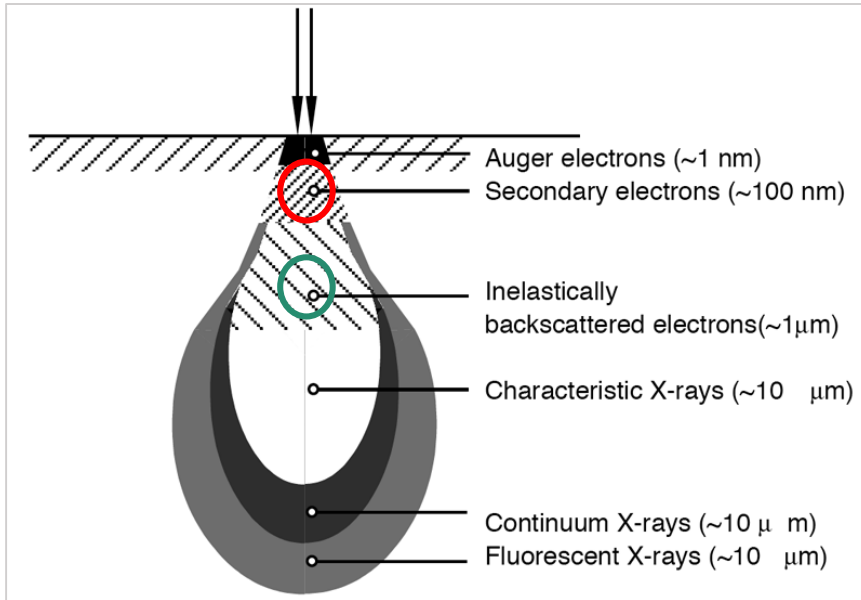


- SmartWLI compact di GBS
- 10nm risoluzione in Z
- Obiettivo interferometrico 20x
- Stage X, Y motorizzato
- Mountain Map software



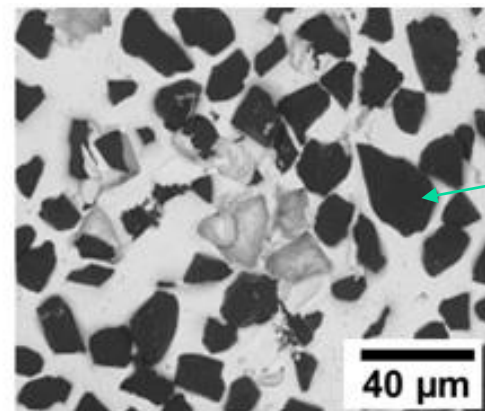
- SEM XL30 Philips
- Elettronica di controllo aggiornata, Point Electronics
- Detector SE
- Detector 4Q-BSE

## Interazione del fascio elettronico con il campione



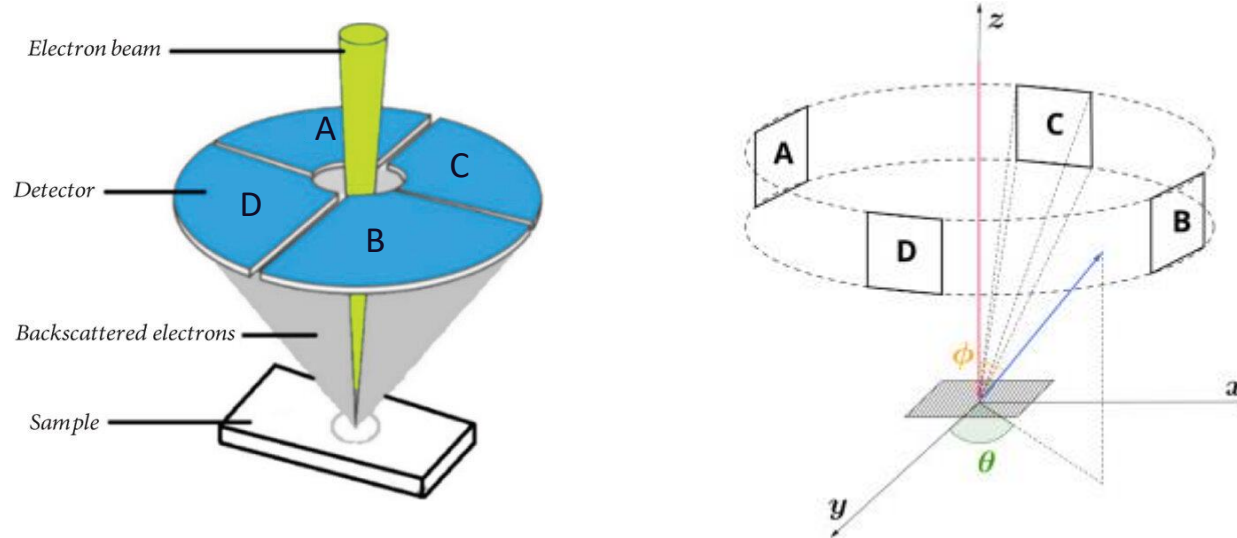
Efficienza

$$\eta_{BSD} = \frac{i_{BSD}}{i_P} \approx \begin{matrix} 10\% \text{ bassi } Z \\ 50\% \text{ alti } Z \end{matrix}$$



BSE compositional image

Carbonio

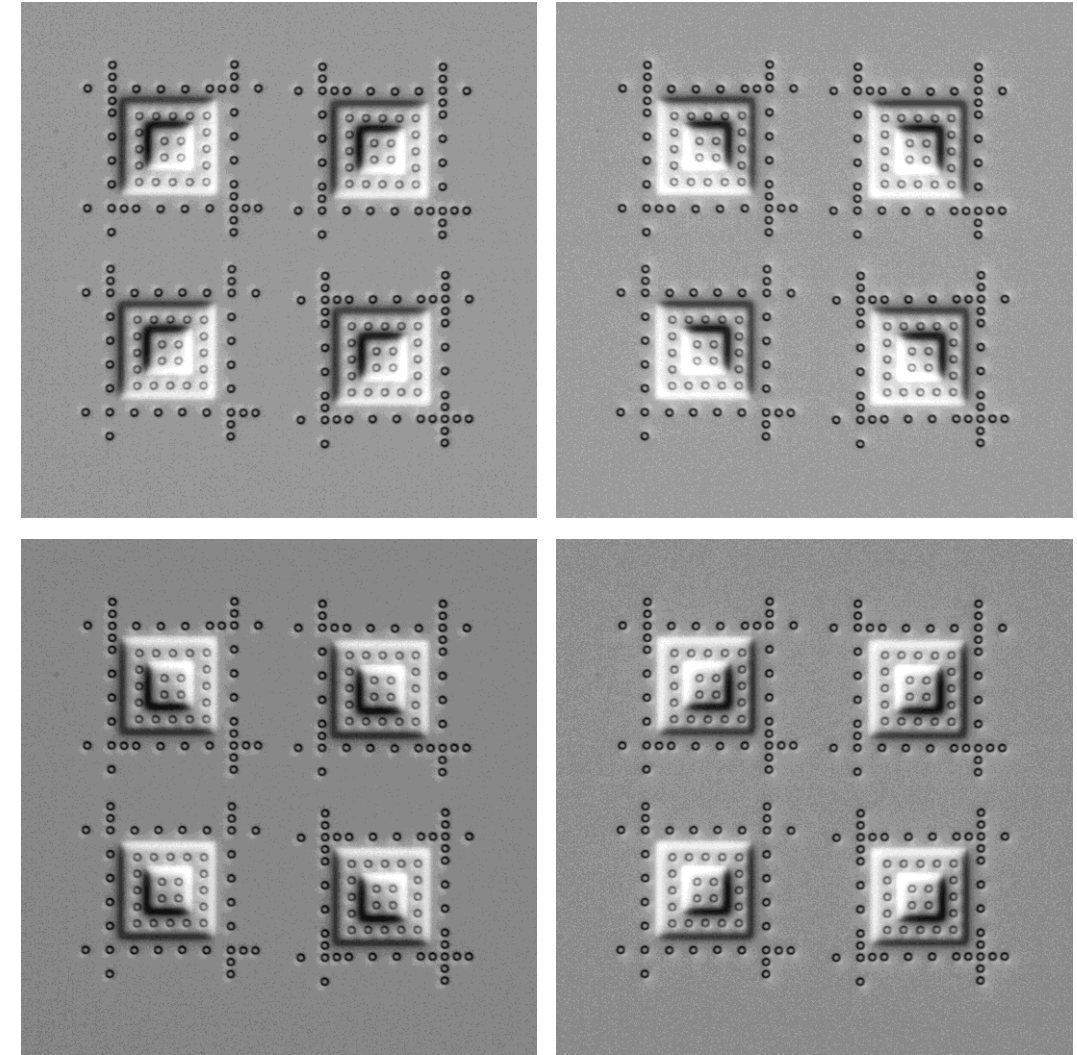


Intensità sul un quadrante detector

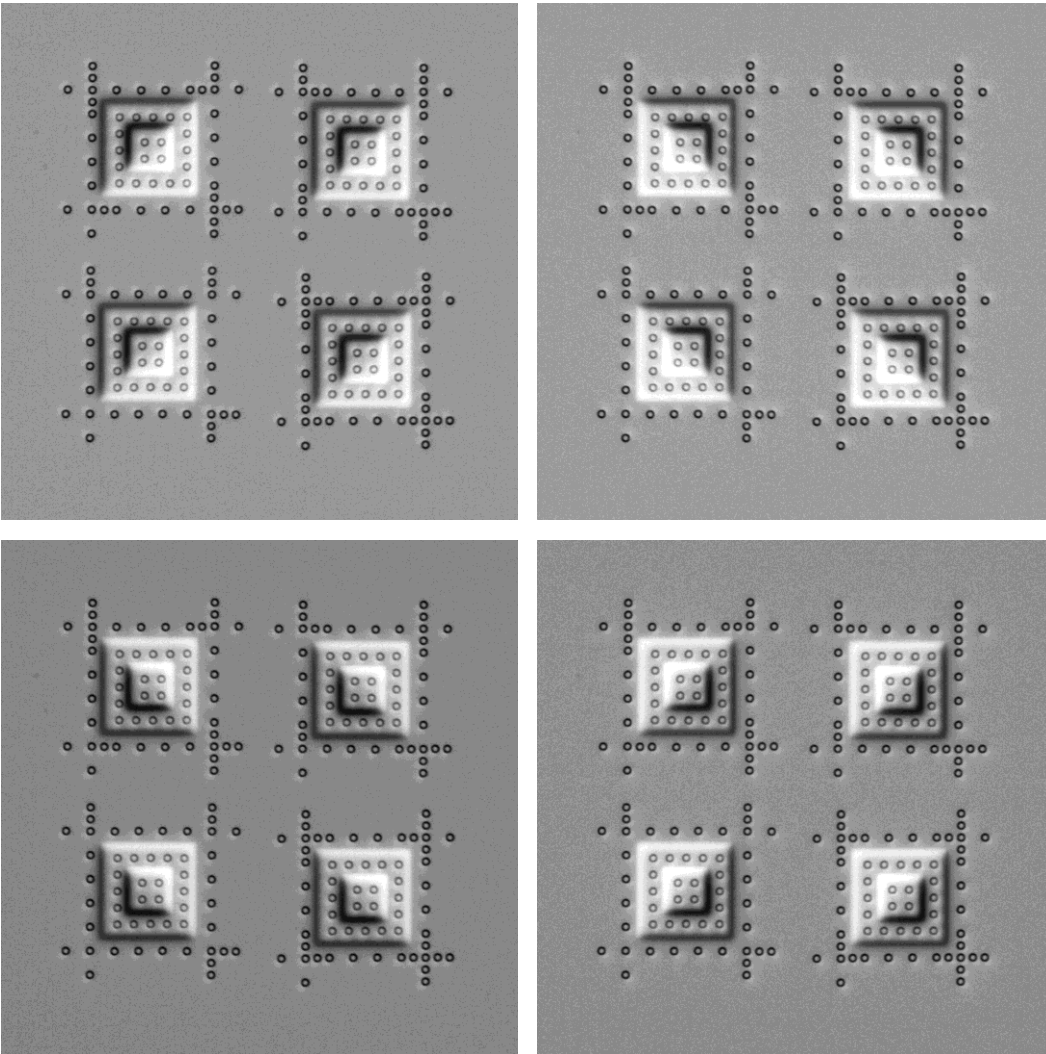
$$i_{BSD} = \frac{i_P \eta_{BSD}}{\pi} [d_A \tan(\phi_S) \cos(\theta_A - \theta_S) + c_A]$$

Variazione dell'altezza lungo asse X

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \tan(\phi_S) \cos(\theta_S) = \frac{c}{d} \frac{I_A - I_B}{I_A + I_B}$$

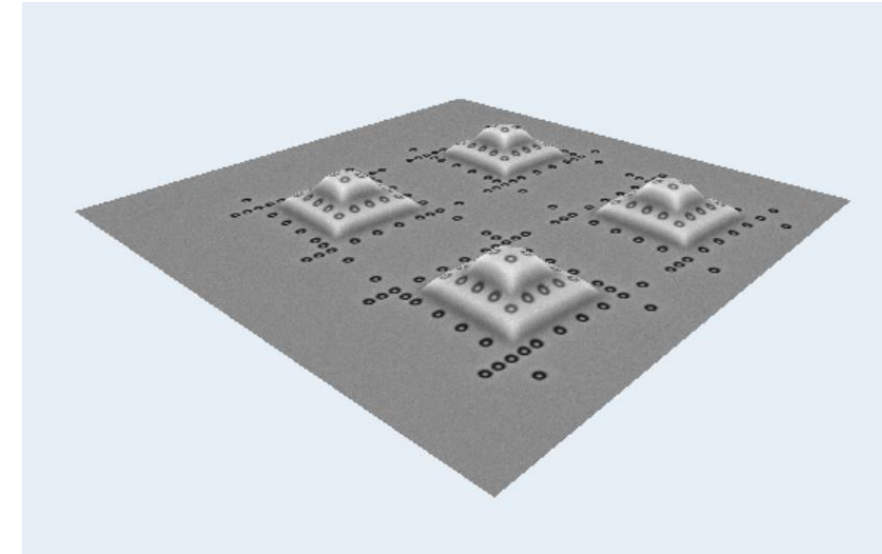


Immagini 4Q-BSE



Dai segnali dei detector si può calcolare il gradiente delle superficie

$$\vec{\nabla}_z(x, y) = \left( \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) = \left( \frac{I_A - I_B}{I_A + I_B}, \frac{I_C - I_D}{I_C + I_D} \right)$$



- Area di lavoro più grande di AFM
- Flessibilità del SEM
- Maggiore risoluzione di un interferometro
- Meno preciso di un AFM

Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal  
Part 700:

## Calibration, adjustment and verification of areal topography measuring instrument

### 1. Calibration

Trovare la relazione tra quantità misurate nel sistema e le stesse quantità misurate nel sistema standard certificato



Utilizzo di test object calibrati e certificati

### 2. Adjustment

Insieme di operazioni per correggere gli errori sistematici del sistema



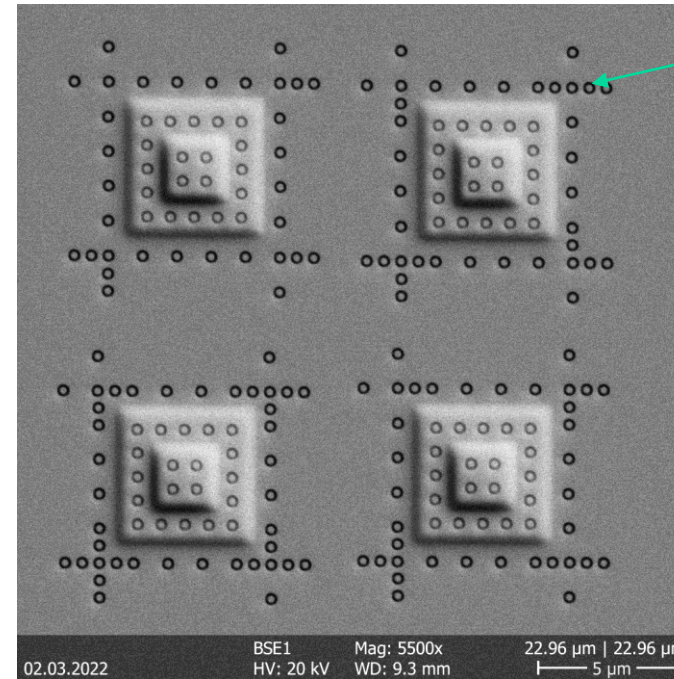
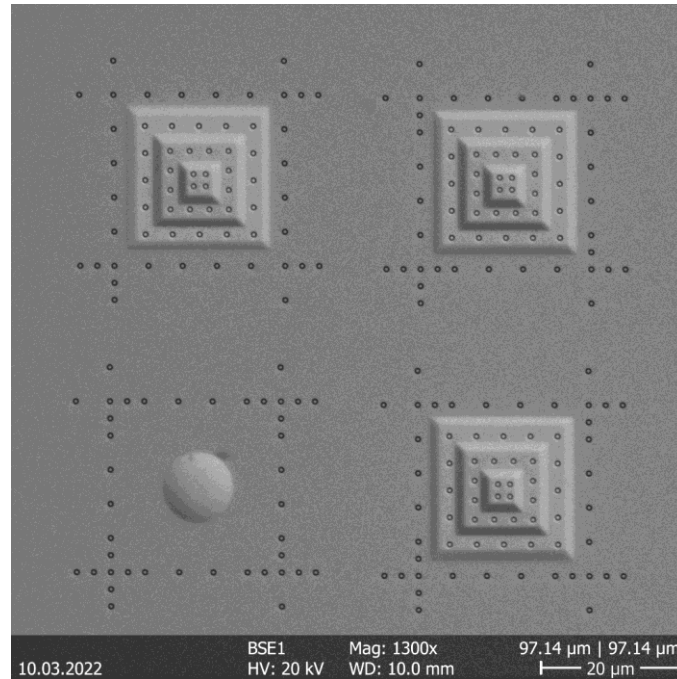
Matrice di trasformazione per correggere i fattori di scala

### 3. Verification

Verifica della validità degli step precedenti

Test object forniti da Point Electronic, fabbricati e certificati dal centro Physikalisch-Technische-Bundesanstalt (PTB) a Braunschweig

Fabbricati con  
combinazione di  
deposizione e  
milling FIB di un  
composto C/Pt



- Nanomarker  
asimmetrici per il  
riconoscimento del  
pattern
- Ad ogni nanomarker  
sono associate le  
coordinate X, Y e Z  
del sistema di  
riferimento  
certificato

| Standard ID   | Structure                 |                       | Pyramidal Elements |           |       |                        | Reference Marks      |                  |                       |               |
|---------------|---------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------|------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|---------------|
|               | Scanning<br>Area<br>[µm²] | Max<br>Height<br>[µm] | Number             | Size [µm] | Steps | Step<br>Height<br>[µm] | Nanomarker<br>Number | Diameter<br>[nm] | Line<br>Width<br>[nm] | Depth<br>[nm] |
| MMC - 20      | 20 x 20                   | 0,6                   | 4                  | 5         | 2     | 0,3                    | 240                  | 400              | 80                    | 75            |
| MMC – 80- BSE | 80 x 80                   | 3,0                   | 3                  | 20        | 3     | 1,0                    | 224                  | 800              | 150                   | 150           |

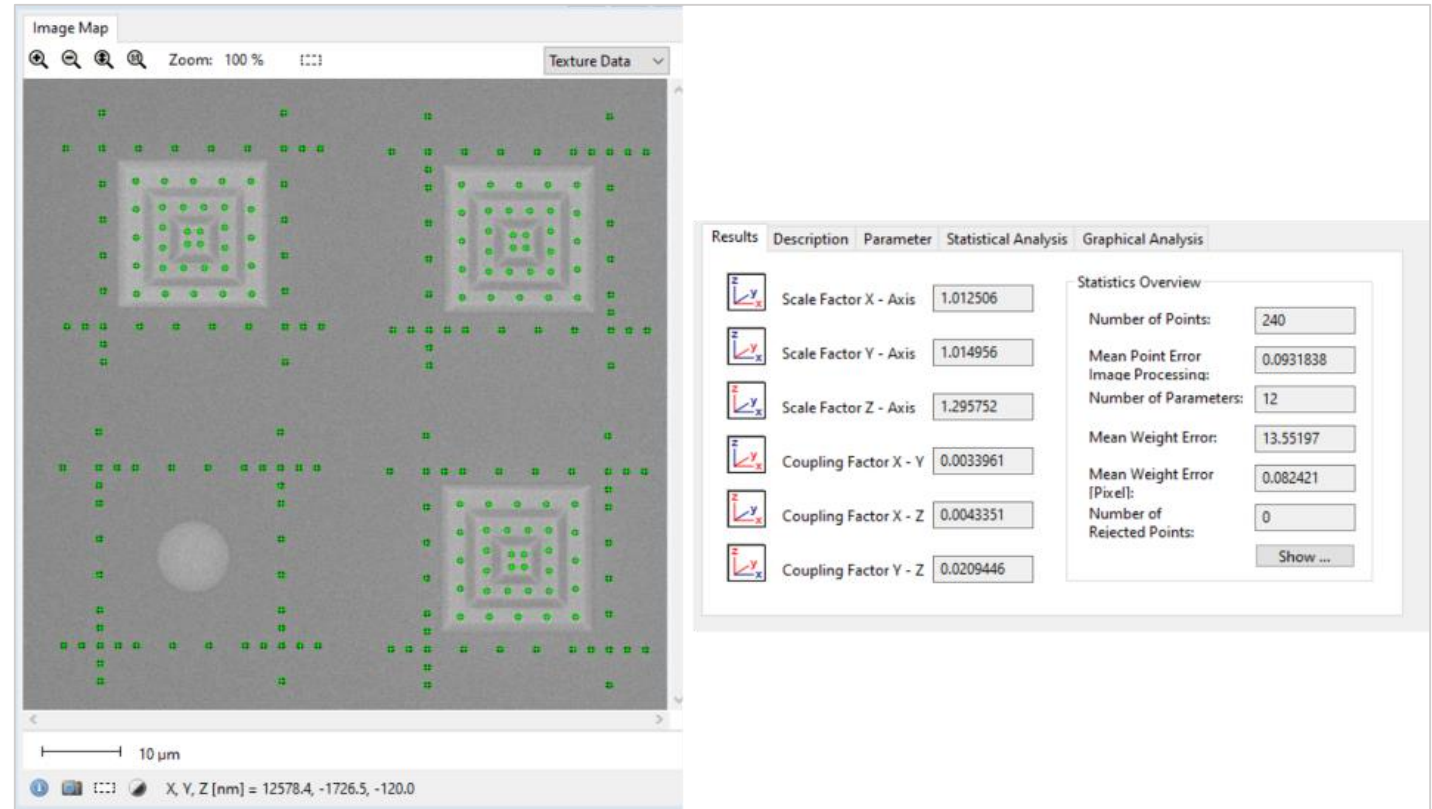
## MicroCal Software

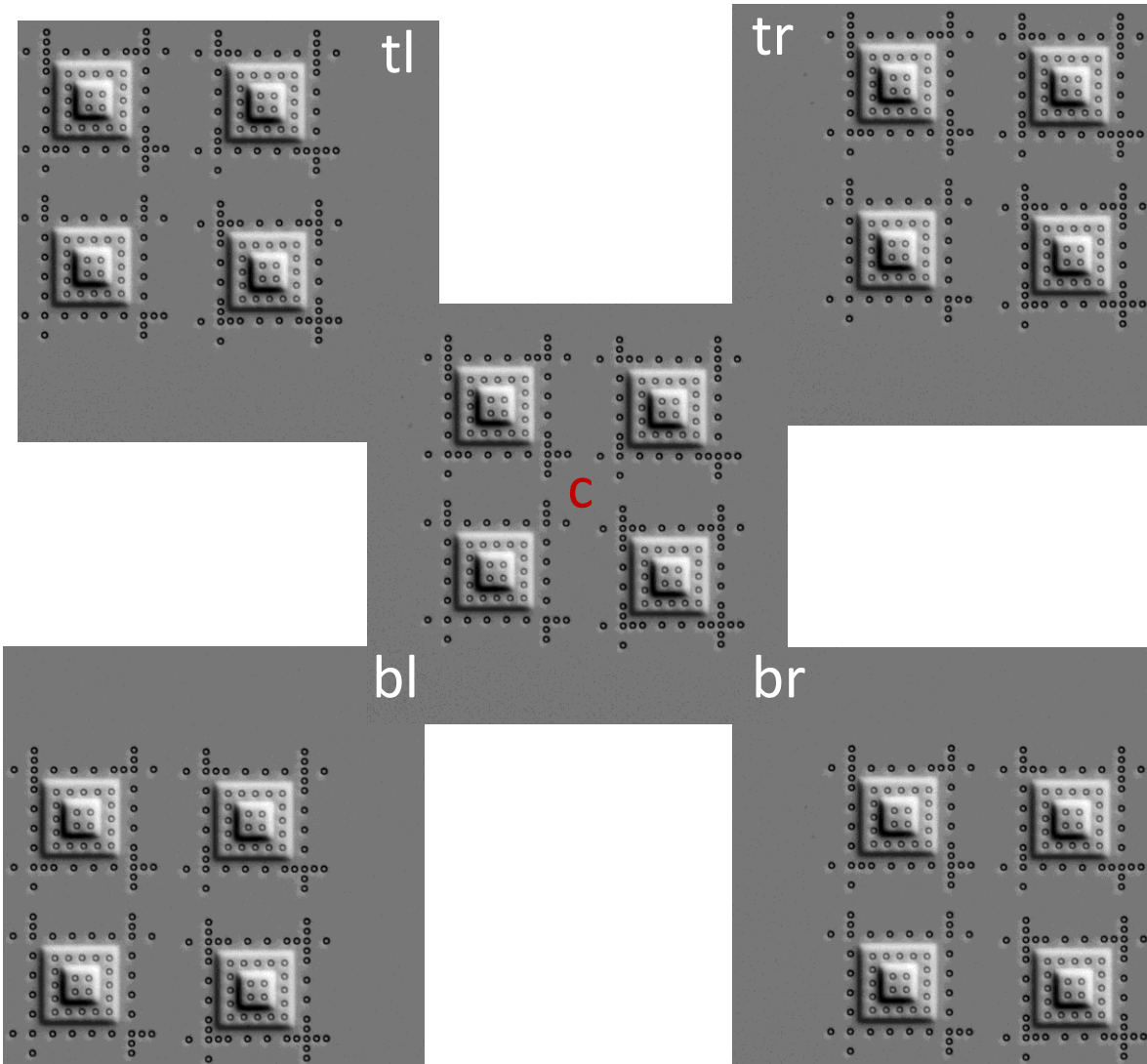
Step per la calibrazione:

1. Acquisizione del test object 4Q-BSE
2. Ricostruzione 3D
3. Estrazione dei parametri di scala attraverso il riconoscimento automatico dei Nanomarker sulla superfce

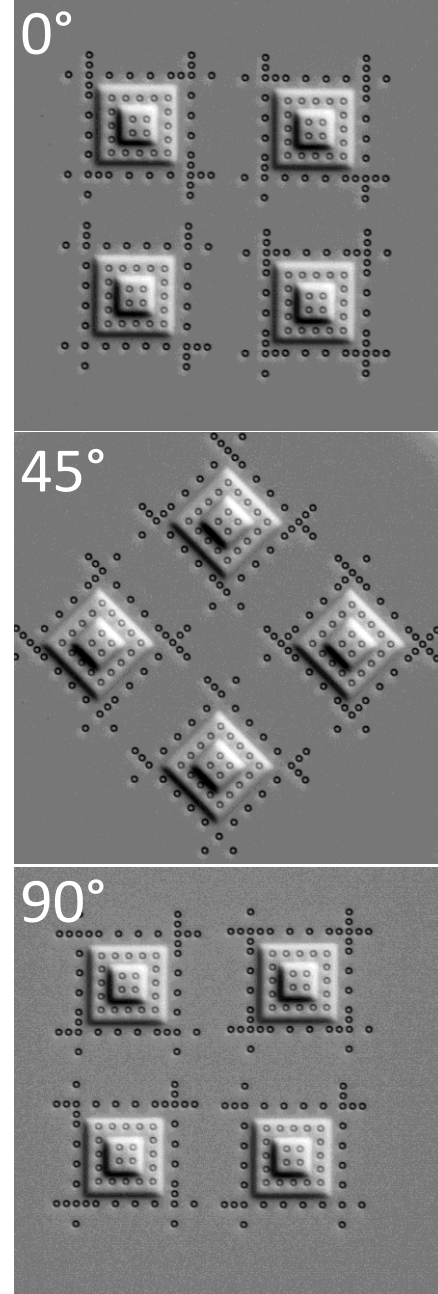


Adjustment delle ricostruzioni 3D di  
campioni non noti

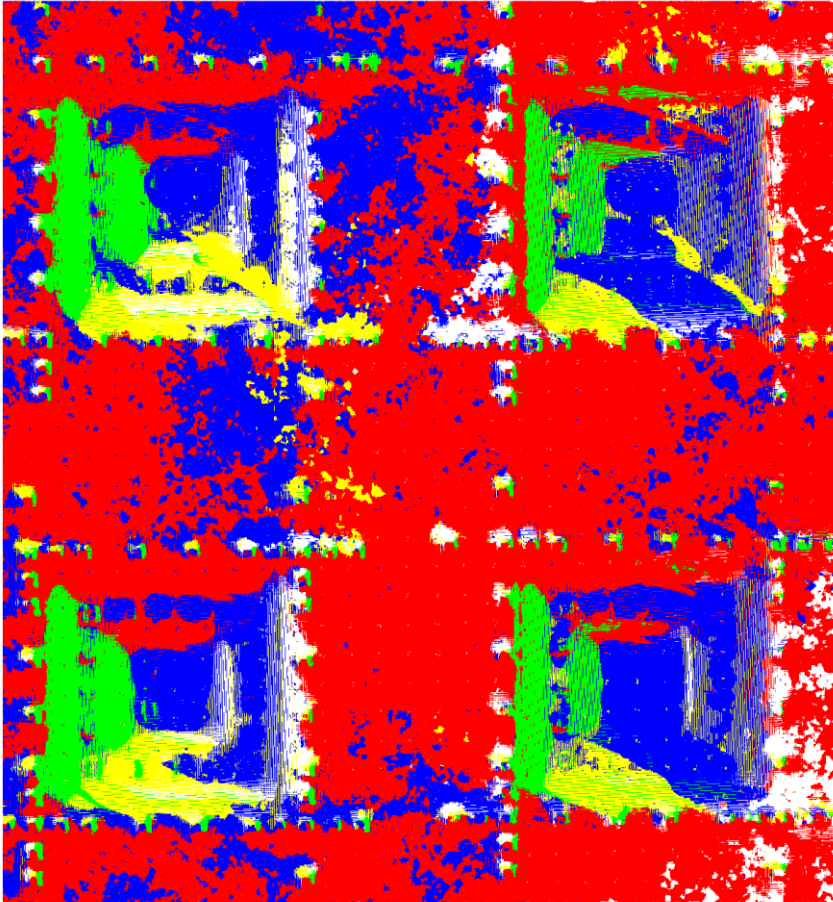




- Abbiamo validato il metodo applicando traslazioni e rotazioni al test object
- Immagine **c** usata come riferimento per la calibrazione
- Le restanti immagini sono state usate per la ricostruzione 3D e l'adjustment eseguito con i parametri trovati dal riferimento centrale



I modelli 3D «aggiustati» possono essere comparati registrando le nuvole di punti

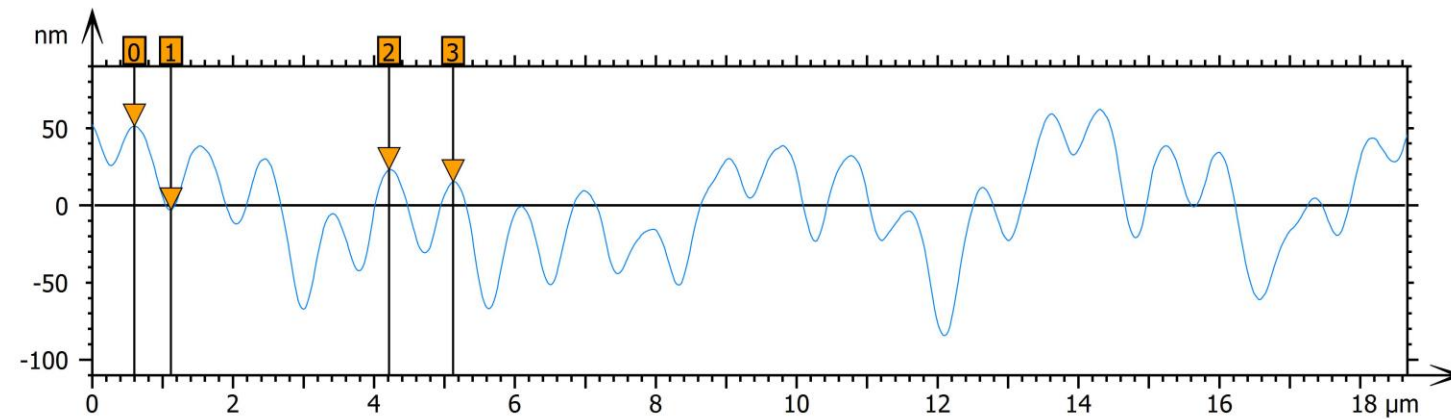
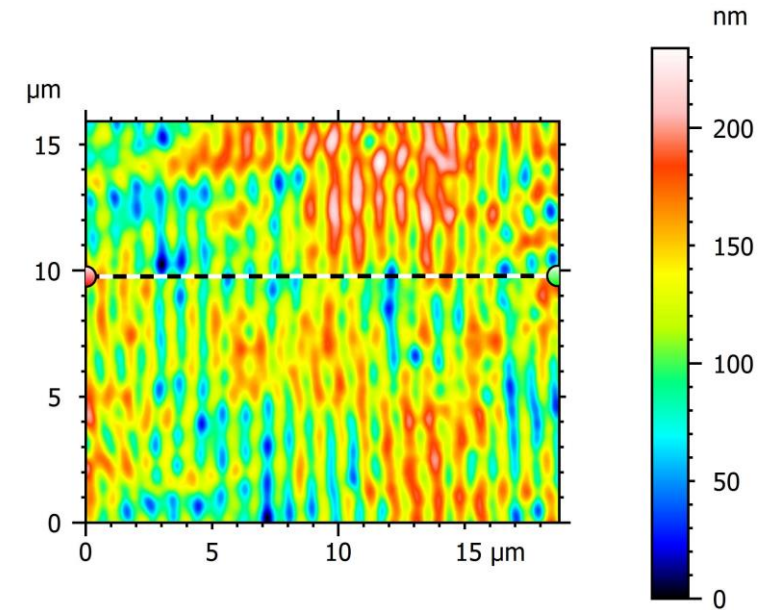
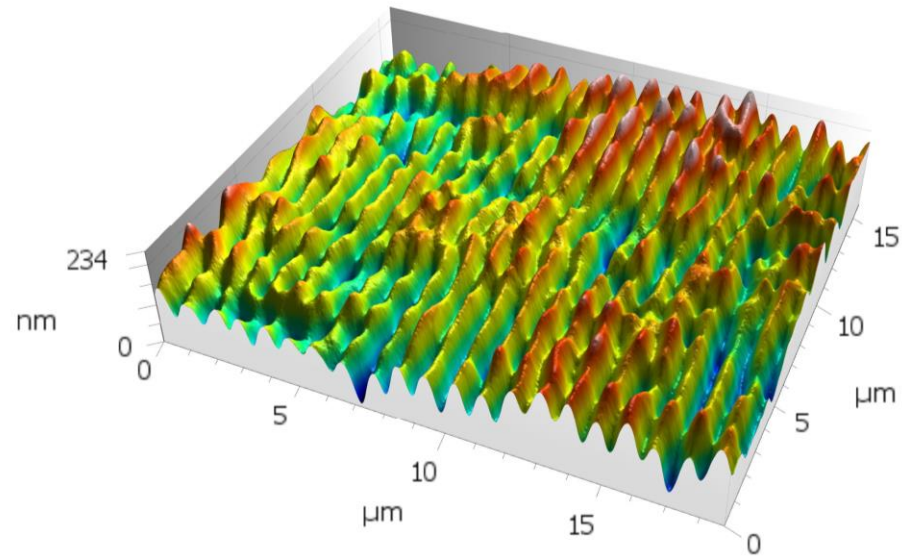


5000

Il processo di registrazione allinea i modelli 3D minimizzando la distanza globale



Distanza media tra le nuvole di punti  $\approx 5\text{nm}$



| Parameters          | Unit | 0-1   | 2-3   |
|---------------------|------|-------|-------|
| Horizontal distance | μm   | 0.52  | 0.91  |
| Height difference   | nm   | -54.3 | -7.87 |

# SEM automatizzato per supportare la messa a punto dei processi laser

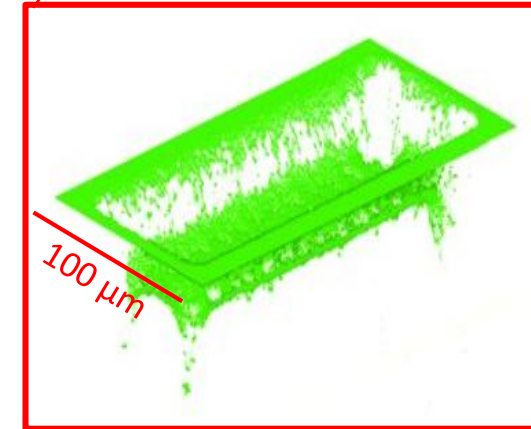
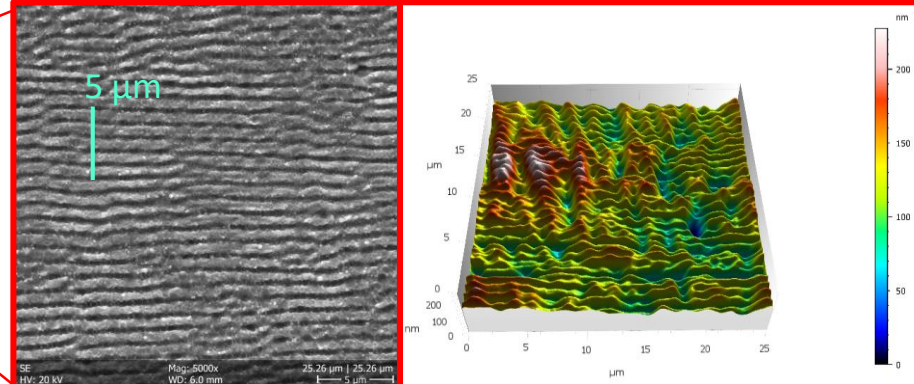
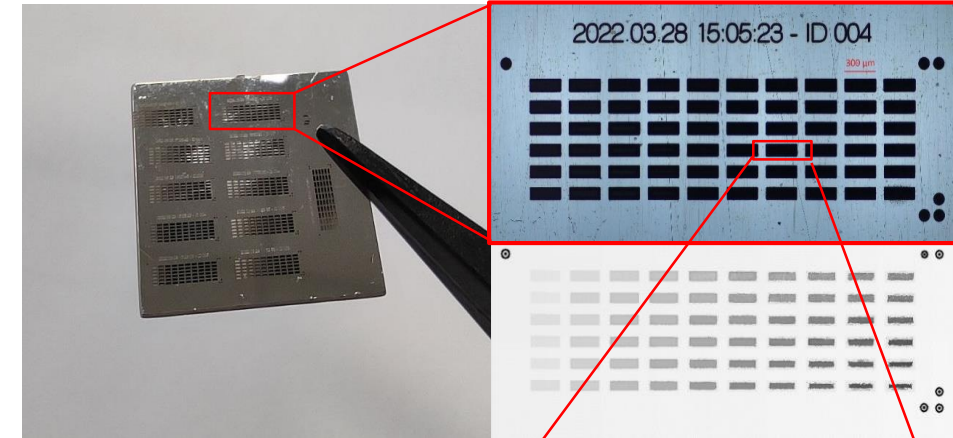
- Lo sviluppo di nuovi processi con tecnologia laser a femtosecondi risulta estremamente complesso, data la necessità di gestire e comprendere le relazioni di causa-effetto tra una notevole quantità di parametri, correlati tra loro in modo tipicamente non lineare.



Realizzazione di matrici standardizzate di campioni al variare dei parametri laser di interesse



Automazione dei processi di misura



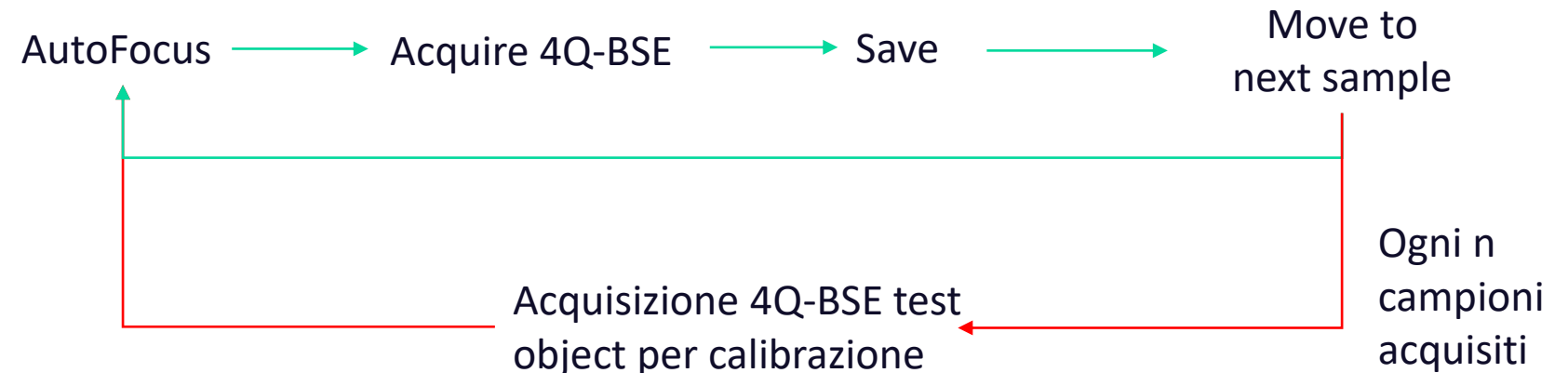
# SEM automatizzato per supportare la messa a punto dei processi laser

## Soluzione iniziale:

Acquisizione 4Q-BSE test object per calibrazione



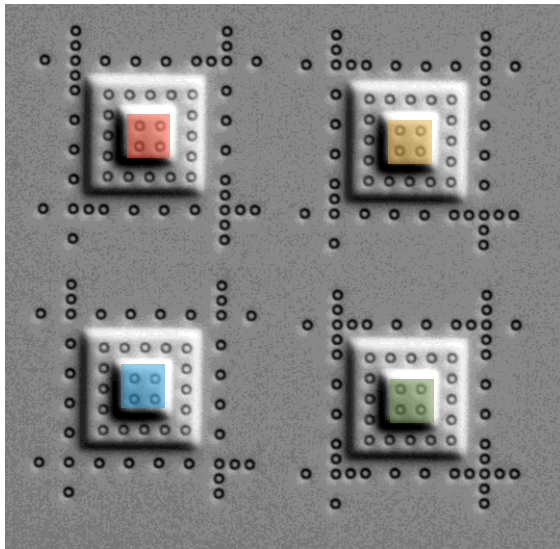
## Soluzione adottata:



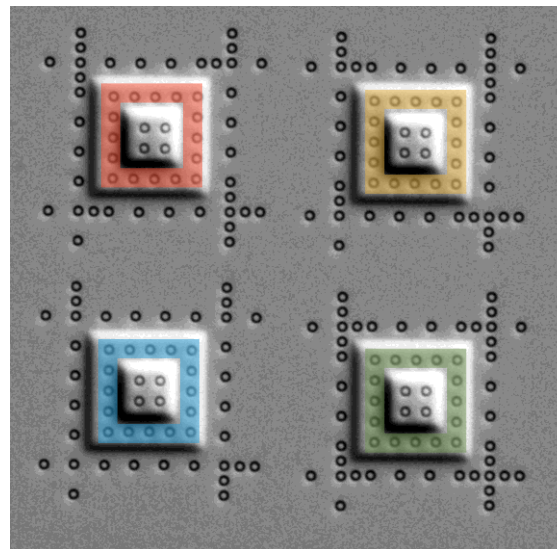
Contenimento dei drift del sistema limitandone gli errori sulla ricostruzione 3D per misure prolungate nel tempo

- Acquisizione multiple del test object ad intervalli costanti, tempo totale = 92min
- La prima acquisizione è stata utilizzata per la calibrazione e l'adjustment di tutte le seguenti
- Estrazione delle posizioni dei nanomarker
- Monitoraggio dell'altezza dei piani delle piramidi per la valutazione delle deformazioni

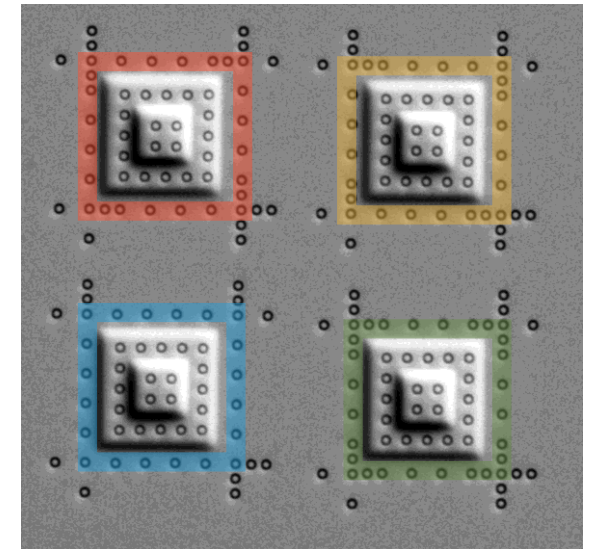
Piano superiore

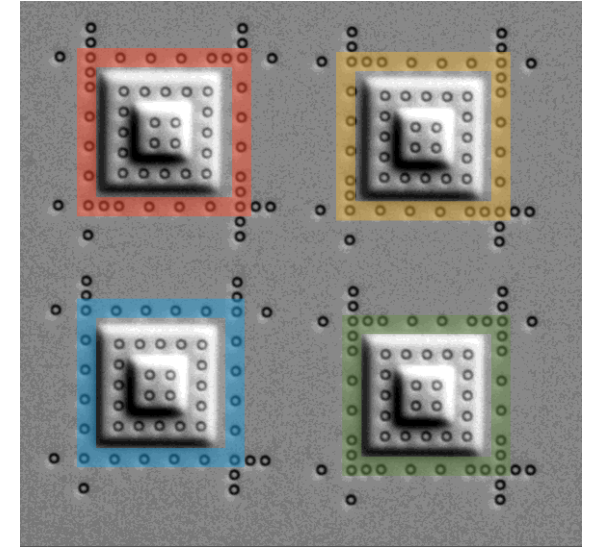
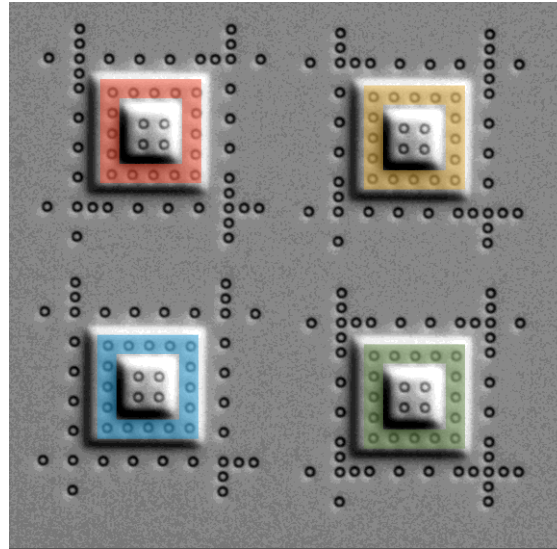
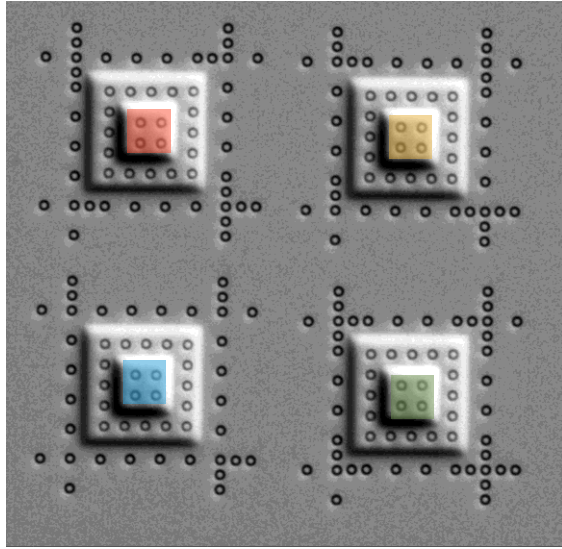


Piano intermedio

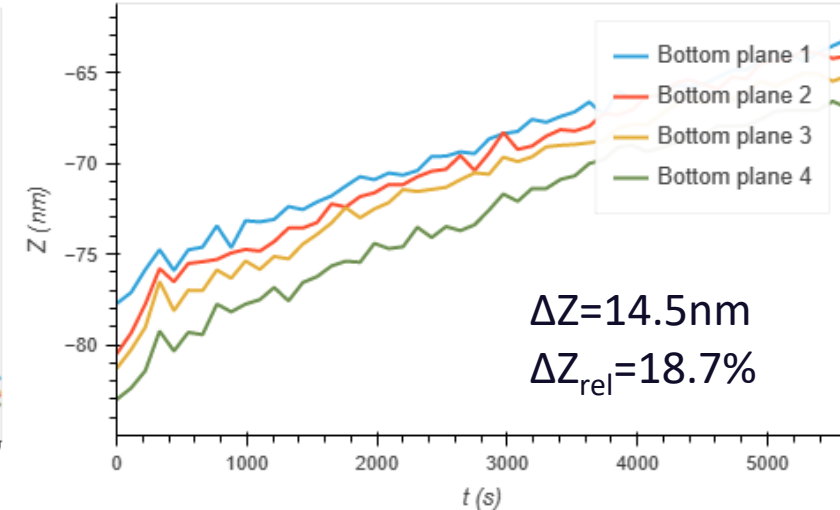
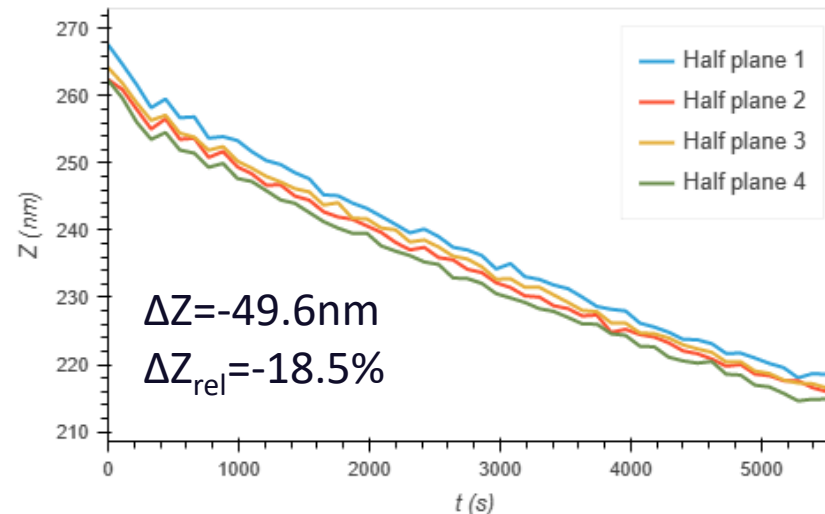
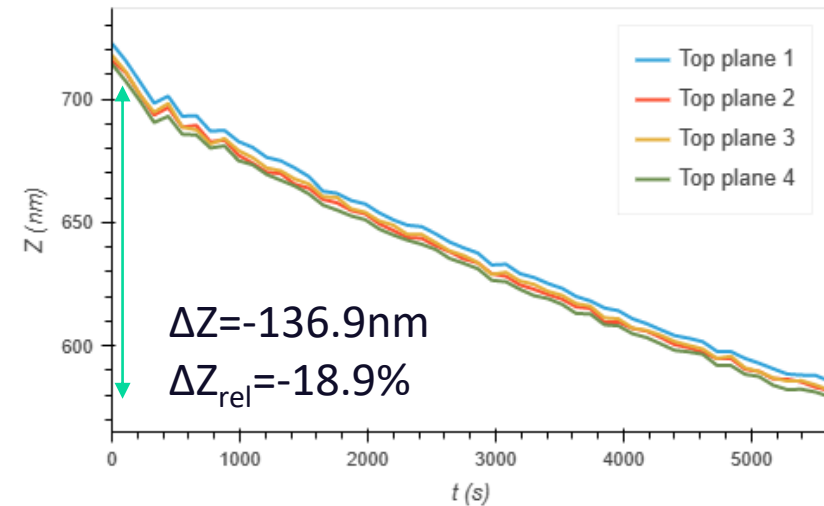


Piano inferiore





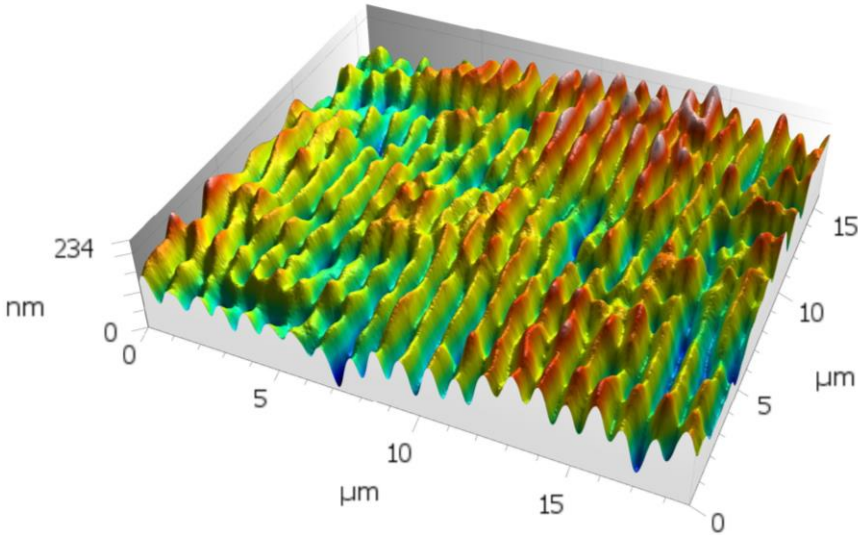
Z position of pyramids planes



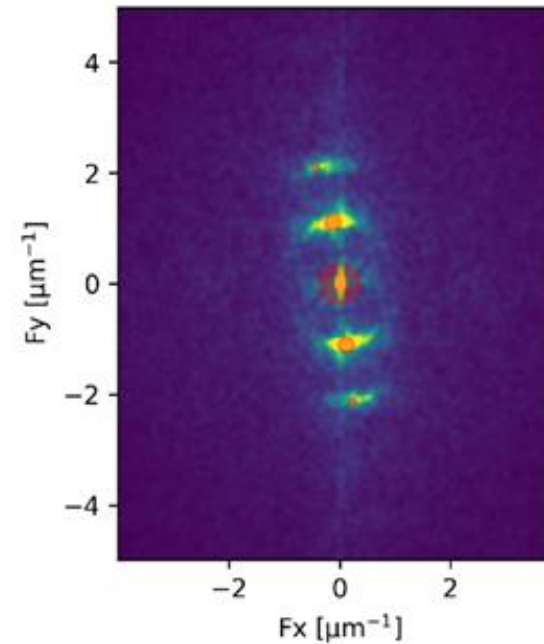
Acquisizione periodica del test object per contenere l'effetto di deformazione

# Training di Algoritmi CNN per la predizione di parametri laser

Ricostruzione 3D



FFT



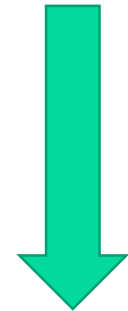
Caratteristiche geometriche

- Altezza creste
- Periodicità
- Uniformità (DLOA)

GUI per supportare  
l'operatore nella messa a  
punto

Training di algoritmi CNN

Associazione con  
parametri laser  
utilizzati



# Conclusioni

---

- Il progetto MIAMI ha permesso la costituzione del laboratorio di metrologia presente in Kirana che dà supporto nella messa a punto dei processi laser e controllo qualità
- Le ricostruzioni 3D da immagini 4Q-BSE permettono di superare il limite di risoluzione ottico ma rimangono comunque meno accurate di strumenti a scansione di sonda.
- Tuttavia rispetto ad un AFM il volume disponibile è maggiore
- È stata sviluppata una procedura di misura per campioni LIPSS rispettando la ISO 25178
- Si è riscontrata una deformazione delle ricostruzioni 3D su misure prolungate, data da uno shift dei segnali del detector (ancora da studiare la causa)
- Con opportuni accorgimenti è possibile automatizzare i processi di misura con SEM per acquisizione di tanti campioni per la messa a punto dei processi o per algoritmi AI

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Dr. Matteo Verdi  
Kirana srl  
[m.verdi@kirana-laser.it](mailto:m.verdi@kirana-laser.it)  
[kirana@kirana-laser.it](mailto:kirana@kirana-laser.it)