

Dottorando: GIANNUZZI Giuseppe
Tutor: ANCONA Antonio, SPAGNOLO Vincenzo

Progetto di ricerca:

Microlavolazioni con burst di impulsi laser ultrabrevi

1. Introduzione

La testurizzazione laser superficiale viene sempre più impiegata per funzionalizzare le superfici di una vasta gamma di materiali ed in differenti campi di applicazione.

Durante il terzo anno di dottorato, l'attività di ricerca si è incentrata nella caratterizzazione delle strutture superficiali periodiche indotte via laser, note come LIPSS (Laser-Induced Periodic Surface Structure) [4] prodotte con l'uso dei burst¹ (Bursts Mode – BM) [5].

Le LIPSS sono generate per valori di fluensa laser prossima o di poco superiore alla soglia di ablazione del materiale [1]. I meccanismi che portano alla formazione delle LIPSS rivestono ad oggi argomento d'indagine e di discussione e sono solo parzialmente modellati [2,3].

Tali strutture periodiche sono caratterizzate da una morfologia di dimensioni nano e micrometriche in grado di modificare le proprietà tribologiche, ottiche e di bagnabilità delle superfici [4] e per questo sono di grande interesse in ambito scientifico ed industriale.

In dettaglio nell'attività di ricerca svolta, i target di acciaio inossidabile sono stati irradiati con burst aventi un numero variabile di sotto-impulsi, con diversa separazione temporale tra loro ed anche differenti stati di polarizzazione. Di tali campioni sono state investigate non solo le caratteristiche morfologiche ma anche le nuove proprietà di bagnabilità acquisite in seguito al trattamento laser.

La maggior parte dei lavori presenti in letteratura riguarda la generazione di LIPSS con singoli impulsi laser o treni di impulsi (Normal Pulse Mode -NPM) [4,6]. D'altra parte, la generazione di strutture periodiche mediante burst di impulsi al femtosecondo, con separazioni temporali nel range dei picosecondi sono state poco esplorate. La scala temporale dei picosecondi inoltre, interessa i meccanismi di assorbimento della radiazione poiché il tempo di accoppiamento elettrone-fonone è inferiore a 100 ps [7].

2. LIPSS e loro classificazione

Le LIPSS vengono classificate rispetto alla periodicità spaziale (Λ) in LIPSS a bassa frequenza spaziale (LSFL) e LIPSS ad alta frequenza spaziale (HSFL) [4]. Le prime hanno un periodo molto vicino alla lunghezza d'onda della radiazione che le ha generate ($\lambda/2 \leq \Lambda < \lambda$) mentre le seconde molto inferiore ($\Lambda < \lambda/2$). Generalmente queste increspature periodiche superficiali sono generate da impulsi laser brevi ed ultrabrevi polarizzati linearmente. In aggiunta è stato dimostrato che il profilo delle LIPSS (periodo e profondità delle oscillazioni) è strettamente legato alla lunghezza d'onda della radiazione [8,9], all'angolo di incidenza del fascio laser sulla superficie target [10], alla fluensa [1] ed al numero di impulsi incidenti [11].

Le più semplici LIPSS osservate e generate erano costituite da ondulazioni periodiche della superficie parallele tra loro caratterizzate dal fatto che la loro orientazione risultava dipendere dalla polarizzazione degli impulsi. Specificatamente, le LSFL risultano orientate perpendicolarmente al campo elettrico degli impulsi nel caso di campioni metallici o

¹ Sequenza di n impulsi distanziati temporalmente meno di 1 μ s.

semiconduttori. Questo tipo di strutture superficiali sono spesso indicate come LIPSS unidimensionali (1D-LIPSS) dato che il loro periodo cambia lungo una sola direzione, ortogonalmente alla orientazione delle ondulazioni. Tuttavia, negli ultimi anni, micro e nano strutture indotte via laser aventi più direzioni periodiche sono riportate in letteratura. A queste strutture ci si riferisce come 2D-LIPSS. Nano-quadrati e nano-rettangoli sono stati generati in due step irradiando consecutivamente fasci con polarizzazioni ortogonali [12]. Nel 2018 sono state pubblicate per la prima volta da Romano ed altri [13] strutture sub-micrometriche dalla geometria triangolare indotte su acciaio inossidabile generate in singolo step con impulsi ultrabrevi polarizzati circolarmente. Di seguito sarà descritto come nel corso dell'attività di ricerca svolta, siano state generate simili strutture triangolari impiegando burst di impulsi ultrabrevi, variandone numero di impulsi e ritardo temporale tra essi nel burst, nonché anche il loro stato di polarizzazione.

3. Attività di ricerca

L'attività di ricerca del terzo anno di dottorato si è incentrata principalmente sullo studio e caratterizzazione delle LIPSS prodotte in Burst Mode (BM) al variare delle caratteristiche del burst, quali numero di sotto-impulsi n e loro separazione temporale Δt .

Il set-up sperimentale impiegato per la generazione di LIPSS su superfici metalliche con burst di impulsi è rappresentato in Fig. 1.

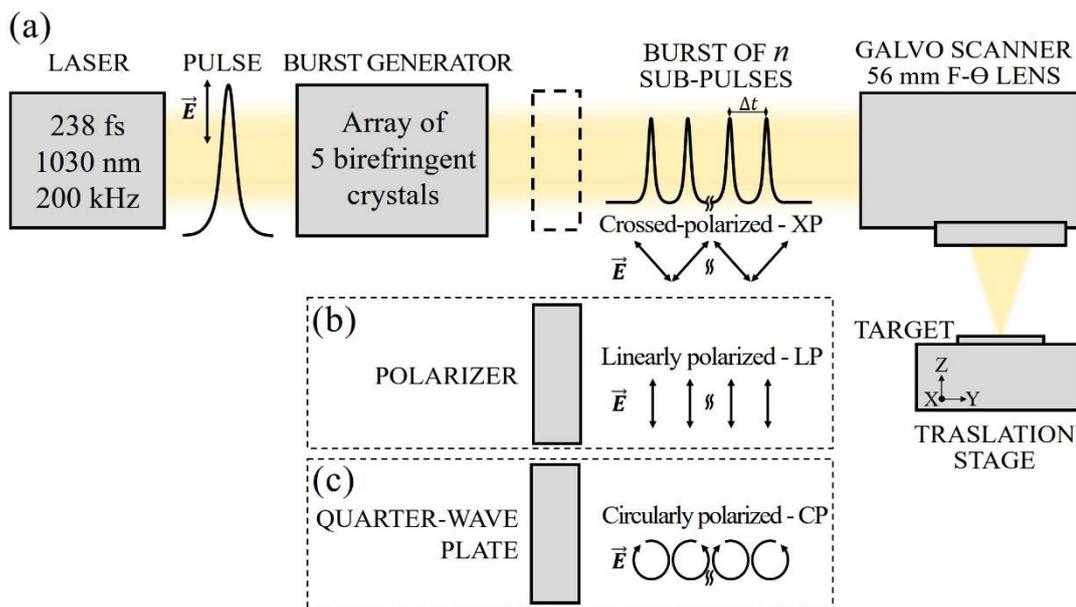


Figure 1 Setup sperimentale per la testurizzazione di campioni mediante burst di impulsi laser. Gli impulsi del burst emergono dal generatore di burst con polarizzazione incrociata (a). L'impiego di un polarizzatore a valle del generatore di burst permette di ottenere burst di impulsi linearmente polarizzati, paralleli tra loro (b). Mediante invece una lamina a quarto d'onda gli impulsi del burst risultano polarizzato circolarmente (c).

Il laser utilizzato è un laser ad impulsi ultrabrevi - Light Conversion Pharos -. Esso genera un fascio gaussiano centrato alla lunghezza d'onda di 1030 nm. I parametri laser relativi alla durata dell'impulso ed alla frequenza sono stati fissati rispettivamente a 200 fs e 200 kHz durante gli esperimenti condotti. Successivamente i singoli impulsi laser attraversano il generatore di burst. Quest'ultimo è costituito da una sequenza di 5 cristalli birifrangenti di lunghezza differente. Per ogni impulso incidente polarizzato linearmente, ciascun cristallo è in grado di generare due sotto-impulsi ritardati tra loro di un intervallo temporale proporzionale alla lunghezza del cristallo e con polarizzazione lineare perpendicolare tra loro. Tale generatore di burst permette di dividere il singolo impulso laser (e la sua energia) fino a 32 sotto-impulsi. Infatti, il numero di sotto-impulsi ed il ritardo temporale tra essi, dipende dall'ordine dei cristalli e dall'orientazione di ciascun cristallo (del suo asse ottico) rispetto alla polarizzazione degli impulsi incidenti. Le principali

configurazioni dei burst adoperate durante l'attività di ricerca sono due. La prima, burst con numero di sottoimpulsi $n = 2, 4, 8, 16, 32$ e fissata separazione temporale di 1.5 ps. La seconda, burst di soli due sotto-impulsi, indicati semplicemente come doppi impulsi, la cui separazione temporale assume valori 1.5, 3, 6, 12 e 24 ps, corrispondenti alle separazioni temporali prodotte dai singoli cristalli.

Inoltre, l'energia di ciascun impulso laser è sempre suddivisa equamente tra i sotto-impulsi del burst. Gli impulsi del burst emergono dal generatore polarizzati linearmente lungo le direzioni parallela e perpendicolare rispetto all'asse ottico dell'ultimo cristallo del generatore. Tali burst presentano una polarizzazione cosiddetta incrociata (XP). Lo stato di polarizzazione dei singoli impulsi può essere modificato mediante l'impiego di un polarizzatore o di una lamina a quarto d'onda (QWP) a valle del generatore per ottenere burst polarizzati linearmente (LP) e circolarmente (CP), come riportati in Fig.1b e Fig.1c, rispettivamente. La fluensa incidente è controllata usando in cascata una lamina a mezz'onda ed un polarizzatore (non riportati in Fig.1).

Infine, il fascio laser attraversa il galvo-scanner (SCANLAB's intelliSCAN 14) che permette di muovere il fascio lungo un qualunque cammino sulla superficie del campione costituito da lamierini di acciaio inossidabile 304L e 301, di spessori 500 e 150 μm , rispettivamente. Il fascio viene focalizzato mediante una lente F-Theta con lunghezza focale di 56 mm, che permette di ottenere uno spot di diametro 24 μm ($1/e^2$). Inoltre, la posizione del campione può essere modificata grazie all'ausilio di uno stage traslazione XYZ. Tutti gli esperimenti sono condotti in condizioni di pressione e temperatura ambientali.

La strategia di strutturazione del campione, ossia il percorso del fascio laser sul campione, è rappresentato in Fig.2. Una superficie di testurizzazione quadrata o rettangolare è realizzata dalla scansione di linee parallele separate tra loro di una quantità prefissata, indicata con *hatch* (h) in Fig.2. Ciascuna linea rappresenta il percorso del fascio laser, il cui spot di irradiazione si muove con una data velocità di scansione. Ne deriva che la sovrapposizione tra i vari spot laser sul campione determina un *overlap* O nella direzione di scansione (linee parallele in Fig.2), definito come $O = 100\% * (D - p)/D$, dove D rappresenta il diametro dello spot laser sul campione e p è la distanza tra 2 spot successivi valutata a partire dalla velocità di scansione v e dalla frequenza di ripetizione del laser f ($p = v/f$). Oltre alla sovrapposizione degli spot lungo la singola linea, è necessario considerare anche la sovrapposizione tra le scansioni adiacenti.

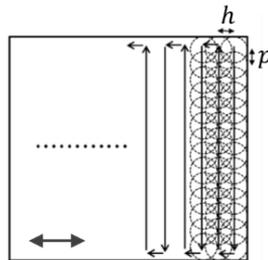


Figure 2 Percorso del fascio laser sulla superficie del campione, per mezzo del galvo-scanner.

La morfologia delle strutture prodotte è stata caratterizzata mediante analisi al microscopio a scansione elettronica (SEM, Carl Zeiss mod. Sigma) e microscopio a forza atomica (AFM, NT-MDT mod. Ntegra).

L'attività di ricerca del secondo anno di dottorato era incentrata sull'investigazione delle superfici prodotte in seguito all'irraggiamento di burst con polarizzazione lineare. Similmente, l'attività di ricerca del terzo anno di dottorato si è focalizzata sulle superfici prodotte da burst con polarizzazione circolare ed incrociata. Quella di maggior interesse è la strutturazione periodica triangolare che rientra nella categoria delle LIPSS a bassa frequenza spaziale, come sarà evidenziato in seguito. L'immagine SEM di Fig.3 mostra la struttura superficiale ottenuta dall'irradiazione di singole linee, separate 20 μm , con burst XP costituiti da 8 sotto-impulsi separati temporalmente di 1.5 ps. Una struttura periodica bidimensionale con geometrie triangolari

può essere identificata nella regione centrale delle linee di scansione, dove la fluenza laser è maggiore a causa del profilo gaussiano del fascio laser.

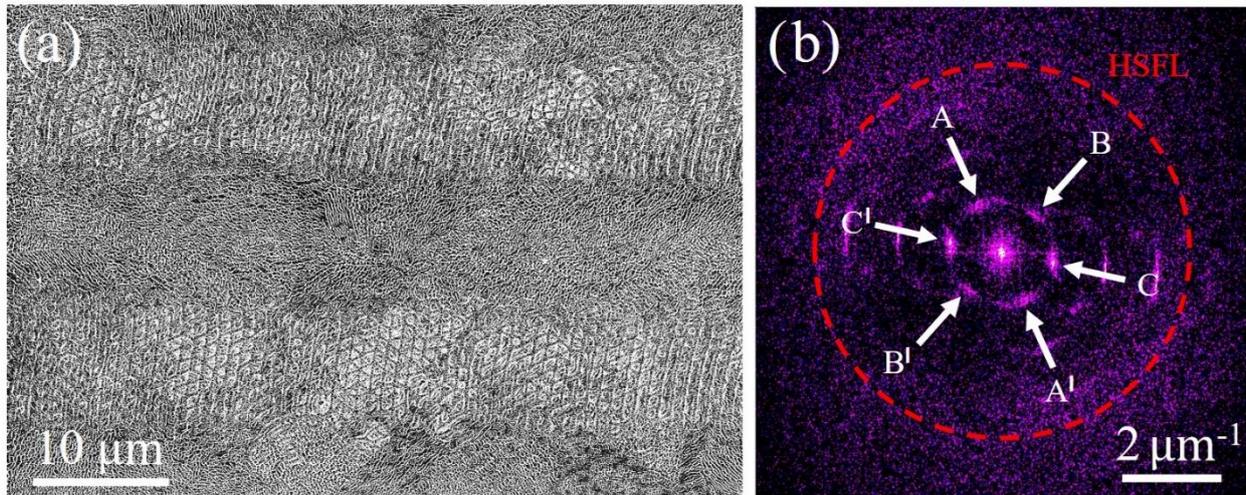


Figure 3 Immagine SEM relativa alla testurizzate della superficie di acciaio con linee di scansione separate $20 \mu\text{m}$, realizzate con burst XP da 8 sotto-impulsi separati temporalmente di 1.5 ps . (b) 2D-FFT dell'immagine SEM adiacente. Le frecce bianche indicano i 6 picchi in frequenza spaziale. Le direzioni AA', BB' and CC' identificano le tre direzioni di periodicità delle 2D-LIPSS. Il cerchio rosso tratteggiato indica la regione della FFT dove poter localizzare le HSFL.

L'analisi nel dominio delle frequenze spaziali (Fig.3b) mediante trasformata di Fourier (2D-FFT) dell'immagine Fig.3a eseguita col software Gwyddion, conferma la presenza delle strutture triangolari 2D. I sei spot luminosi di Fig.3b distribuiti attorno al centro dell'immagine, indicati dalle frecce bianche, possono essere raggruppati in tre coppie dove ciascuna identifica una direzione di periodicità delle LIPSS. Nell'immagine SEM le tre direzioni di periodicità sono relative ai tre lati delle strutture triangolari. Inoltre, dall'immagine Fig.3b emerge una regione anulare, di intensità ridotta rispetto ai sei picchi precedentemente descritti, il cui raggio medio è legato alla periodicità media di un altro tipo di strutture la cui distribuzione spaziale risulta non presentare orientazioni preferenziali. Esse corrispondono alle HSFL indotte lungo i bordi delle linee di scansione laser dove la fluenza laser (code della gaussiana) è ridotta. La formazione delle strutture 2D-LIPSS triangolari è osservata in una stretta finestra di parametri laser, non solo riguardanti la fluenza laser ma anche l'accumulazione di impulsi o burst per spot (pulse/burst per spot, pps/bps) che dipende direttamente dalla velocità di scansione per frequenza laser fissata. Ottimizzando la distanza tra le linee di scansione laser, è stata ottenuta una strutturazione triangolare su larga area.

La figura 4 confronta le superfici strutturate a parità di strategia di strutturazione ($\text{bps} = 20$, $h = 5 \mu\text{m}$) e fluenza laser ($F = 0.1 \text{ J/cm}^2$) al variare del numero di sotto-impulsi per burst CP e per fissata separazione temporale $\Delta t = 1.5 \text{ ps}$. Si osservano strutture triangolari solo per burst da 2 e 4 sotto-impulsi e queste osservazioni sono confermate dall'analisi delle trasformate di Fourier delle immagini SEM. Inoltre, confrontando la FFT delle strutture periodiche triangolari ottenute per grandi aree (Fig.4) rispetto a quella precedentemente descritta per la singola linea (Fig.3b), si osservano picchi in frequenza più evidenti. Ciò equivale ad una strutturazione periodica regolare sull'intera superficie e non solo al centro delle linee di scansione.

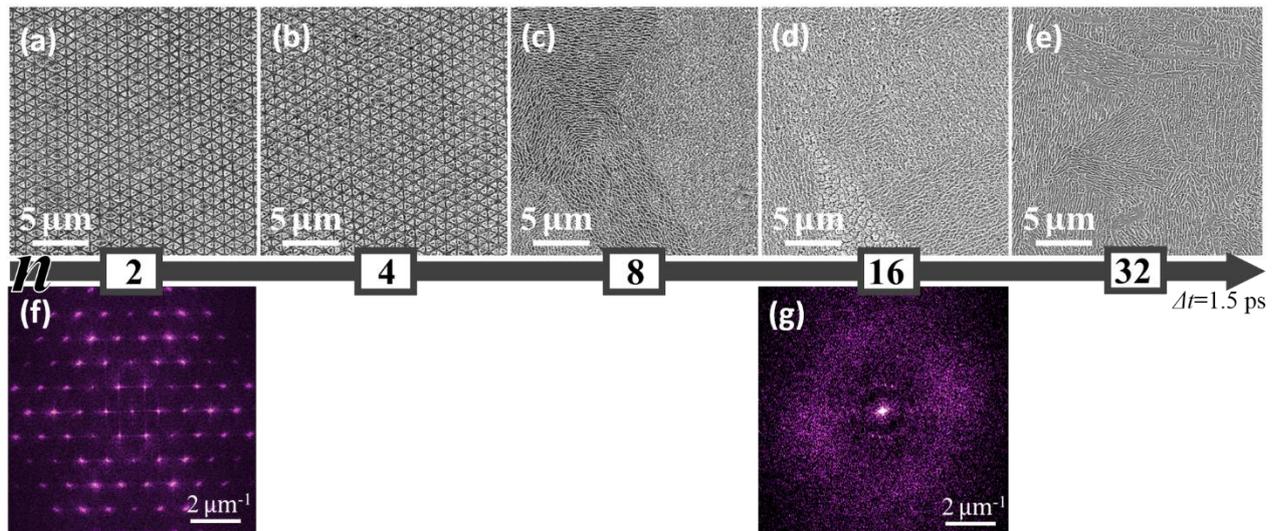


Figure 4 Immagini SEM (prima riga) di superfici di acciaio inossidabile irradiato con burst CP al variare del numero di sotto-impulsi da 2 a 32 per fissata separazione temporale. I parametri di processo sono. Velocità di scansione laser, $s = 0.24\text{m/s}$ (burst per spot, $\text{bps} = 20$); distanza tra linee di scansione, $h = 2\ \mu\text{m}$; fluenza laser, $F = 0.1\ \text{J/cm}^2$. Le strutture triangolare sono osservate per $n = 2, 4$ sotto-impulsi per burst. In basso (seconda riga), le trasformate di Fourier delle immagini SEM sopra riportate.

Un incremento della fluenza laser comporta due conseguenze (Fig.5). Si osserva la generazione di strutture triangolari anche con burst da 8 sotto-impulsi come evidenziato dai sei picchi centrali della FFT riportata in Fig.5g corrispondente alla relativa immagine SEM per $n = 8$ sotto-impulsi. D'altra parte, per burst da 2 sotto-impulsi si osserva una struttura denominata *pillars*. La trasformata di Fourier rivela che questa struttura è caratterizzata da una distribuzione periodica non direzionale. Infatti, dell'anello brillante centrato nell'immagine della FFT relativa ad $n = 2$ di Fig.5, si può definire un raggio medio legato alla periodicità dei pillars ma non una orientazione preferenziale degli stessi, che invece è definito da picchi nel dominio della frequenza. La strutturazione ottenuta con $n = 16$ non ha evidenziato né carattere periodico né direzionale nel range di parametri di processo investigati. Passando da burst con 2 a 8 sotto-impulsi, la finestra dei parametri in cui è possibile indurre strutture triangolari cambia ed in particolare si sposta (*shift*) verso valori di fluenza laser più alta.

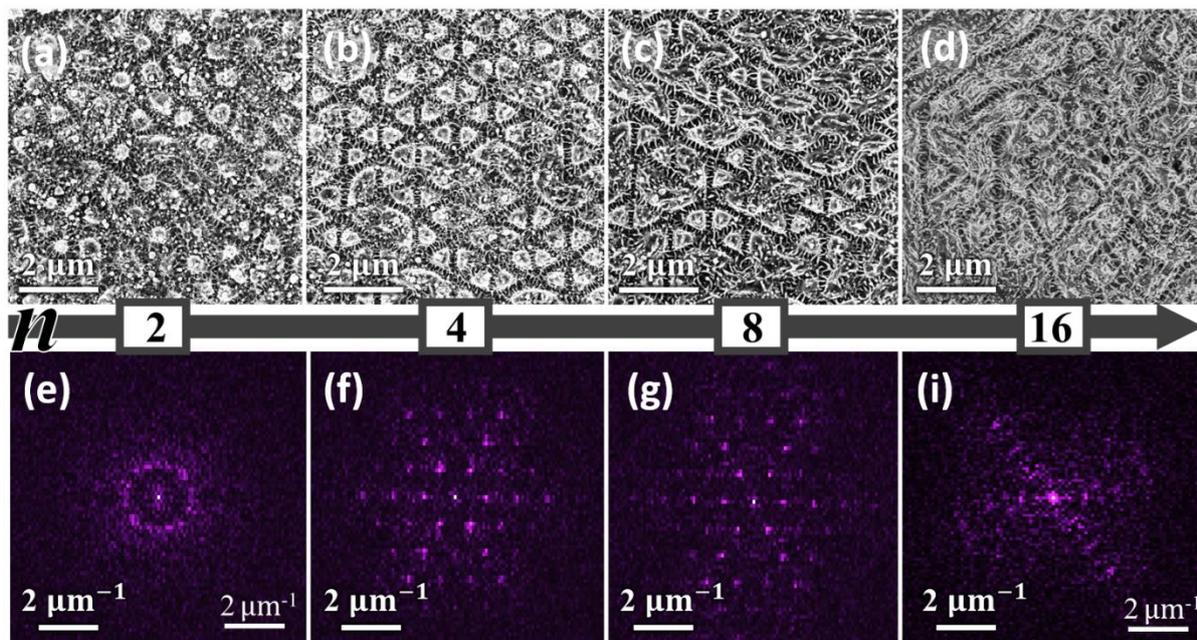


Figure 5 Immagini SEM (prima riga) di superfici di acciaio inossidabile irradiato con burst CP al variare del numero di sotto-impulsi da 2 a 16 per fissata separazione temporale. I parametri di processo sono. Velocità di scansione laser, $s = 0.24\text{m/s}$ (burst per spot,

$bpp = 20$); distanza tra linee di scansione, $h = 5 \mu\text{m}$; fluenza laser, $F = 0.4 \text{ J/cm}^2$. Le strutture triangolare sono osservate per $n = 4, 8$ sotto-impulsi per burst. In basso (seconda riga), le trasformate di Fourier delle immagini SEM sopra riportate.

Come precedentemente specificato, le strutture mostrate in Fig.5 sono ottenute per differente numero di sotto-impulsi per burst a parità di tutti gli altri parametri laser e di processo. Figura 6 mostra un esempio di come nel caso di burst CP, $n = 4$ e $\Delta t = 1.5 \text{ ps}$ è possibile ottimizzare tutti i parametri chiave per ottenere una strutturazione altamente regolare in periodo ed uniformità per una grande area (superiore a 1 cm^2). Una rappresentativa immagine SEM è mostrata in Fig.6a da cui è possibile evidenziare come i triangoli siano ben organizzati in disposizione esagonale. La relativa 2D-FFT è mostrata in Fig.6b. Da quest'ultima è possibile derivare la 1D-FFT lungo le tre direzioni di periodicità. Per ciascuna direzione di periodicità è stato valutato il periodo spaziale, il cui valore medio risulta $934 \pm 13 \text{ nm}$, prossimo alla lunghezza d'onda del laser (1030 nm). Per questo le strutture triangolari possono correttamente essere classificate come LSFL.

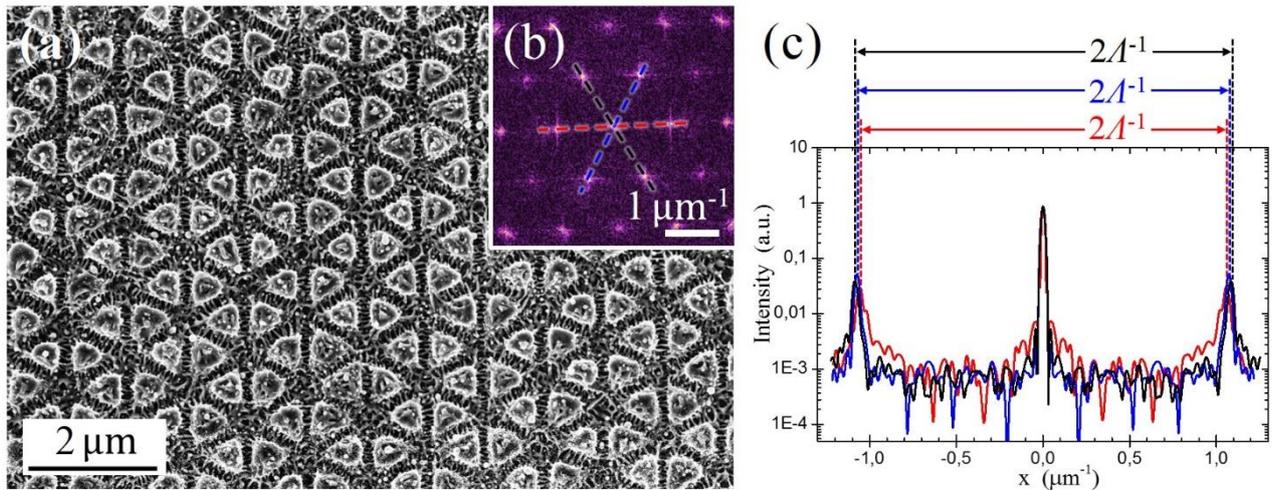


Figure 6 (a) Immagine SEM della strutturazione superficiale di acciaio inossidabile ottenuta con burst CP, $n = 4$ e $\Delta t = 1.5 \text{ ps}$. (b) la relativa 2D-FFT. (c) Valutazione del periodo spaziale a partire dai profili 1D-FFT lungo le tre direzioni indicate in (b) da linee tratteggiate.

Simili risultati, non riportati in questo report per brevità, sono stati ottenuti investigando i burst con polarizzazione incrociata (XP), al variare del numero di sotto-impulsi per burst, della fluenza laser e dei parametri di processo. Strutture triangolari sono osservate solo in piccoli range di variabilità dei parametri laser/processo.

Gli esperimenti fin qui descritti erano caratterizzati da burst con fissata separazione temporale tra i sotto-impulsi di $\Delta t = 1.5 \text{ ps}$. Ulteriori esperimenti sono stati condotti con burst costituiti da soli due sotto-impulsi, con l'obiettivo di investigare l'influenza del ritardo temporale nel doppio-impulso sulle strutture generate via laser. Sorprendentemente, i risultati al variare del ritardo Δt sono analoghi a quelli descritti per burst al variare del numero di sotto-impulsi e di seguito riassunti. Strutture triangolari organizzate in esagoni sono generate in strette finestre di parametri laser/processo. Per bassa fluenza laser (0.1 J/cm^2) tali strutture triangolari erano indotte solo per ritardi fino a 3 ps tra i sotto-impulsi (Fig.7b). Tuttavia, un aumento di fluenza ($F = 0.4 \text{ J/cm}^2$) comporta uno shift nella formazione delle 2D-LIPSS, che compaiono fino a 12 ps (Fig.7h). D'altra parte, per ritardi di 1.5 ps , l'aumento di fluenza comporta una degradazione delle strutture triangolari in favore di strutture più disordinate, tipo pillar (Fig.7e).

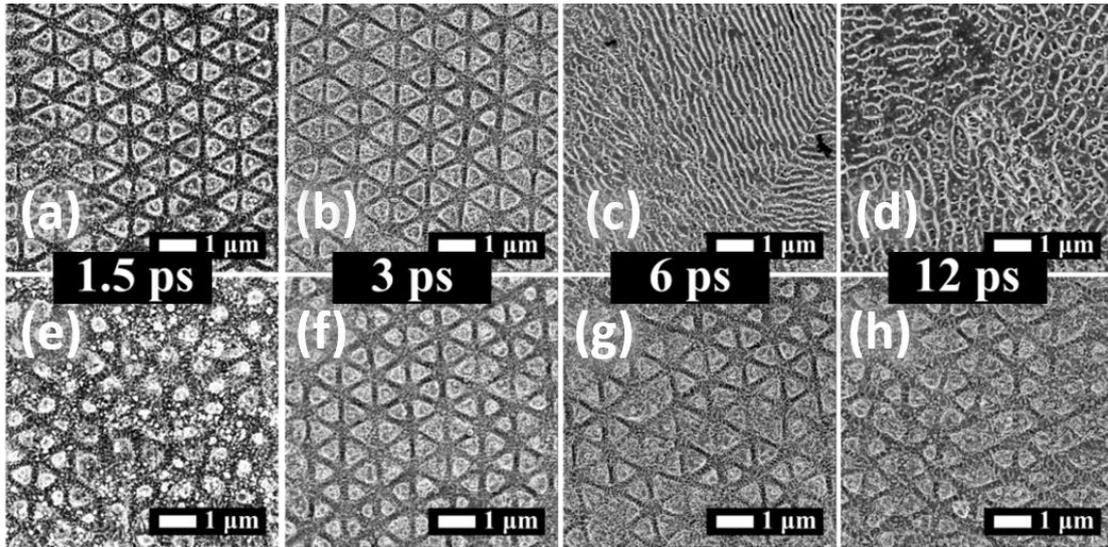


Figure 7 Immagini SEM di superfici di acciaio inossidabile irradiato con burst CP al variare del ritardo temporale tra i due sotto-impulsi che costituiscono il burst. La fluenza laser risulta di 0.1 J/cm^2 per (a-d) e di 0.4 J/cm^2 per (e-h).

Di queste strutture 2D-LIPSS triangolari sono state investigate le proprietà di bagnabilità e come queste evolvono, non solo confrontando tra prima e dopo il trattamento laser ma anche seguendo l'evoluzione della bagnabilità nei giorni successivi all'irraggiamento laser. Le prove di bagnabilità sono state condotte con acqua distillata sia in statico (fronte di liquido stazionario) che in dinamico (fronte di liquido in moto) [14]. Il grafico dell'invecchiamento del campione in Fig.8 relativo all'angolo di contatto statico, mostra che il campione immediatamente dopo essere prodotto via laser risulta più idrofilico rispetto al campione non trattato (55°). Successivamente, giorno dopo giorno l'angolo di contatto cresce gradualmente fino a raggiungere la stabilizzazione dell'angolo di contatto statico (saturazione), rendendo la superficie super-idrofoba con un angolo di 157° . Durante l'invecchiamento è la chimica superficiale a produrre il cambio delle proprietà di bagnabilità della superficie [15,16]. Il successivo aumento degli angoli di contatto è causato da una crescente concentrazione di carbonio (apolare) e riduzione di ossigeno (polare) sulla superficie verificato attraverso analisi XPS condotte su due campioni: quello testurizzato ed idrofilo e quello super-idrofobo.

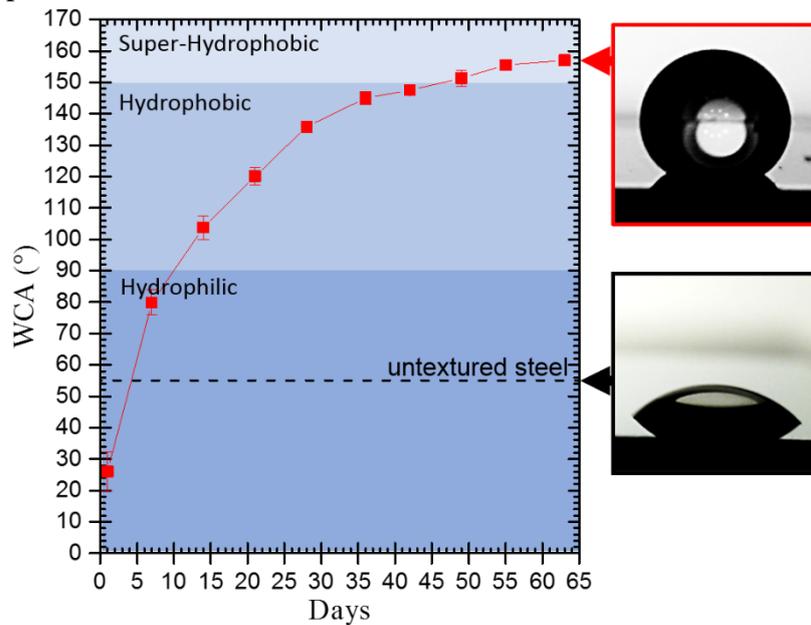


Figure 8 Curva di aging dell'angolo di contatto statico per 2D-LIPSS triangolare indotta da burst XP, $n=4$, $\Delta t = 1.5 \text{ ps}$.

Per quanto riguarda le prove in dinamico, il parametro determinato è quello dell'isteresi dell'angolo di contatto, H , valutato come differenza tra l'angolo di avanzamento e quello di recessione di una goccia d'acqua [14] disposta sul campione invecchiato, pertanto super-idrofobo. Il valore per la superficie con 2D-LIPSS triangolari è risultato $H = 128^\circ \pm 7^\circ$. Ciò determina il fatto che le gocce depositate sulla superficie microstrutturata risultano incapaci di scivolare lungo superfici inclinate anche per angoli uguali a 90° . Tali superfici sono dette super-idrofobe adesive (*sticky super-hydrophobic surface*) dove l'adesione è dovuta alle forze capillari esercitate da ogni micro-cavità dovuta alla strutturazione laser.

La testurizzazione dell'acciaio con strutture triangolari sub-micrometriche ha dimostrato di funzionalizzare la superficie del campione attribuendole un comportamento adesivo super-idrofobico. Tuttavia, le LIPSS triangolari non sono state le uniche strutture indotte ed investigate con i burst di impulsi ultrabrevi. Le proprietà di bagnabilità dei pillar, delle LIPSS ad alta frequenza spaziale e quelle a bassa frequenza spaziale (queste ultime descritte nel report del secondo anno di dottorato) sono state analogamente studiate. Tra esse, la superficie che ha raggiunto il massimo valore di angolo di contatto statico e dinamico corrisponde a quella con HSFL generate da burst XP da 16 sotto-impulsi separati temporalmente di 1.5 ps.

4. Bibliografia

- [1] K. Okamoto, M. Hashida, Y. Miyasaka, Y. Ikuta, S. Tokita, S. Sakabe, Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. 82 (2010) 1–5.
- [2] J.E. Sipe, J.F. Young, J.S. Preston, Phys. Rev. B 27 (1983).
- [3] J. Bonse, A. Rosenfeld, J. Krüger, J. Appl. Phys. 106 (2009).
- [4] J. Bonse, S. Höhm, S. V. Kirner, A. Rosenfeld, J. Krüger, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 23 (2017) 9000615.
- [5] B. Dromey, M. Zepf, M. Landreman, K. O'keeffe, T. Robinson, S.M. Hooker, Appl. Opt. 46 (2007) 5142–5146.
- [6] M. Martínez-Calderon, A. Rodríguez, A. Dias-Ponte, M.C. Morant-Miñana, M. Gómez-Aranzadi, S.M. Olaizola, Appl. Surf. Sci. 374 (2016) 81–89.
- [7] D. Breitling, A. Ruf, F. Dausinger, 5339 (2004) 49.
- [8] A.M. Bonch-Bruевич, M.N. Libenson, V.S. Makin, Opt. Eng. 31 (1992) 718–725.
- [9] G. Li, J. Li, X. Li, Z. Zhu, Y. Hu, J. Chu, W. Huang, in: Proc. SPIE, 2013, p. 87691V–1–5.
- [10] P. Nürnberger, H. Reinhardt, H.C. Kim, F. Yang, K. Pepler, J. Janek, N. Hampp, J. Appl. Phys. 118 (2015).
- [11] E.M. Hsu, T.H.R. Crawford, H.F. Tiedje, H.K. Haugen, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 2005–2008.
- [12] B. Liu, W. Wang, G. Jiang, X. Mei, K. Wang, J. Wang, Z. Wang, J. Laser Appl. 26 (2014) 012001.
- [13] J.M. Romano, A. Garcia-Giron, P. Penchev, S. Dimov, Appl. Surf. Sci. 440 (2018) 162–169.
- [14] F. Palumbo and R. Di Mundo, Wettability: Significance and Measurement, 2014.
- [15] P. Bizi-bandoki, S. Valette, E. Audouard, S. Benayoun, Appl. Surf. Sci. 273 (2013) 399–407.
- [16] A. Kietzig, M.N. Mirvakili, (2012) 2789–2809.

5. Pubblicazioni

G. Giannuzzi, C. Gaudiuso, C. Di Franco, G. Scamarcio, P. M. Lugarà, A. Ancona, “Large area laser-induced periodic surface structures on steel by bursts of femtosecond pulses with picosecond delays”, Opt Lasers Eng. (sottomesso)

6. Conferenze e scuole

International School - “Laser Micro/Nanostructuring and Surface Tribology”, Bari, 1-5 October 2018

LPM 2018 – “Laser precision microfabrication”, 19th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Edinburgh, 25-28 June 2018

7. Conference Proceedings

G. Giannuzzi, F. Fraggelakis, C. Gaudiuso, C. Di Franco, G. Scamarcio, G. Mincuzzi, R. Kling, A. Ancona “Surface texturing of steel with bursts of femtosecond laser pulses”, LPM2018 (2018)

C. Gaudiuso, G. Giannuzzi, I. Choquet, P. M. Lugarà, A. Ancona, “Incubation effect in burst mode fs-laser ablation of stainless steel samples”, Proc. SPIE 10520 (2018)

8. Premi e riconoscimenti

Premio outstanding student’s oral presentation award – 19th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, LPM2018 (25-28 June 2018, Edinburgh, UK), “Surface texturing of steel with bursts of femtosecond laser pulses” (2018)