

Dottorando: GIANNUZZI Giuseppe
Tutor: ANCONA Antonio

Progetto di ricerca:

Microlavorazioni con burst di impulsi laser ultrabrevi

1. Introduzione

L'impiego di sorgenti laser ad impulsi ultrabrevi (100 fs-10 ps) nelle microlavorazioni garantiscono numerosi vantaggi rispetto all'utilizzo di impulsi di durata maggiore (ad esempio riduzione di danni termici e meccanici). Molte sono le problematiche connesse ai processi di ablazione laser con impulsi ultrabrevi dei diversi materiali di interesse applicativo e numerosi studi sono condotti sull'argomento. Negli ultimi anni, lo studio e la comprensione dell'interazione multi-impulso con la materia ha destato l'interesse dei ricercatori, in particolare l'impiego di sequenze di n impulsi distanziati temporalmente meno di 1 μ s, detti bursts [1-3].

L'uso dei burst (Bursts Mode – BM) potrebbe aiutare a superare i problemi termici che caratterizzano l'ablazione laser con i singoli impulsi (Normal Pulse Mode – NPM) specialmente alle alte frequenze di ripetizione [4,5].

Recenti studi [6] hanno evidenziato la possibilità di aumentare la profondità di ablazione mediante l'uso di burst con impulsi del picosecondo, separati temporalmente di 20 ns. Analogamente, altri autori [1,2] hanno riportato un incremento del tasso di ablazione nel caso di BM con impulsi al ps e fs, rispetto ai medesimi impulsi in NPM.

La maggior parte dei lavori presenti in letteratura sui burst sono tuttavia relativi a separazioni temporali tra i sottoimpulsi del burst dell'ordine del nanosecondo.

Resta quindi poco esplorata l'interazione con la materia dei burst di impulsi al femtosecondo, con separazioni temporali nel range dei picosecondi, dove diversi meccanismi di assorbimento della radiazione entrano in gioco (il tempo di accoppiamento elettrone-fonone è inferiore a 100 ps [7]).

Burst con tali separazioni temporali possono essere prodotti o mediante l'impiego di laser con frequenze superiori a 100 GHz, poco diffusi, oppure mediante alcune tecniche che fanno uso, ad esempio, di cristalli birifrangenti [8,9].

Di seguito descriverò l'attività di ricerca che ho svolto nel corso del primo anno di dottorato sull'interazione tra burst di impulsi al femtosecondo con target di acciaio inossidabile.

2. Attività di ricerca del primo anno

L'attività di ricerca del primo anno di dottorato si è incentrata principalmente sullo studio e misura della fluensa di soglia di ablazione F_{th} al variare delle caratteristiche del burst, quali numero di sottoimpulsi n e loro separazione temporale Δt .

Il generatore di burst impiegato è costituito da un array di cinque cristalli birifrangenti, ciascuno con asse ottico parallelo alla faccia del cristallo sulla quale incide il fascio laser. In base all'orientazione dell'asse ottico di ciascun cristallo rispetto alla polarizzazione lineare degli impulsi incidenti, è possibile abilitare o disabilitare gli stessi, quindi dar origine a burst con 2^m sottoimpulsi¹, dove m indica il numero dei cristalli abilitati (fino a 5) [8,9]. La separazione temporale

¹ Se la polarizzazione dell'impulso è parallela all'asse ottico del cristallo od ortogonale ad essa, allora non si ha alcuna modifica dell'impulso incidente. Quando l'asse ottico è orientato a 45° rispetto alla polarizzazione dell'impulso incidente, quest'ultimo viene

PhD Student GIANNUZZI Giuseppe – University of Bari - Department of Physics

tra i sottoimpulsi del burst è dell'ordine del picosecondo e può assumere valori da 1.5 a 24 ps a seconda della configurazione del generatore scelta.

Il set-up sperimentale adoperato per la determinazione della fluensa di soglia con burst di impulsi può essere rappresentato con lo schema di Fig. 1.

Il laser utilizzato è un Sci-Series Ultrafast Fiber Laser dell'Active Fiber System GmbH [10].

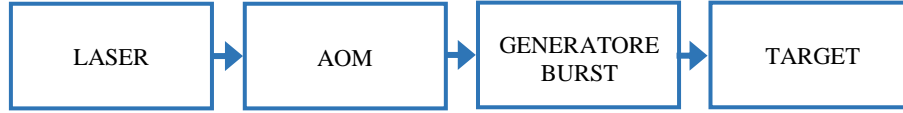


Fig. 1. Schematizzazione del set-up sperimentale

Questo è un laser impulsato a fibra ottica ad impulsi ultrabrevi, disponibile presso il laboratorio di microlavorazioni laser dell'Unità di Bari del CNR-IFN presso il Dipartimento di Fisica "M.Merlin".

Tale sorgente laser produce un fascio laser linearmente polarizzato con profilo gaussiano ($M^2 \sim 1.25$) alla lunghezza d'onda di 1030 nm, molto versatile e flessibile in quanto è possibile variare la durata dell'impulso nel range da 650 fs a 20 ps, la frequenza di ripetizione da 50 kHz a 10 MHz, l'energia per impulso fino a 100 μ J e la potenza media fino a 50 Watt. Ho fissato l'attenzione sulla durata dell'impulso e sulla frequenza di 650 fs e 100 kHz rispettivamente.

Esso genera un treno infinito di impulsi (alla frequenza selezionata) che giunge in ingresso al modulator acusto-ottico (AOM). Quest'ultimo permette di selezionare dal singolo a qualunque numero N di impulsi senza alterarne la forma. Gli impulsi così selezionati vengono inviati al generatore di burst da cui emergono i bursts caratterizzati dai valori n e Δt . Essi vengono infine focalizzati sul target, un campione di acciaio inossidabile (AISI304), fissato su uno stage traslazionale XY

L'apparato sperimentale sopra descritto, è impiegato per produrre crateri per ablazione laser sul target.

Dei vari esperimenti condotti, riportiamo quello che ha portato al principale risultato dell'attività di ricerca del primo anno, riguardante l'effetto di incubazione con burst.

L'esperimento è stato condotto con le sole separazioni temporali tra sottoimpulsi di 1.5 e 3 ps, variando l'energia del burst E_b nel range 5 – 25 μ J. La Tabella 1 riassume i parametri impiegati.

Per confronto, analoghi esperimenti a quelli condotti con bursts sono stati riprodotti in NPM ovvero con impulsi laser non-divisi, con energia E_p equivalente a quella del burst. Il numero N di impulsi in NPM, o analogamente di burst in BM è stato variato nel range da 50 a 1600.

Tabella 1. Parametri dei bursts impiegati nell'esperimento.

Numero di sottoimpulsi nel burst, n	2	4	8	16	32
Separazione temporale, Δt	1.5 ps 3 ps	1.5 ps 3 ps	1.5 ps 3 ps	1.5 ps 3 ps	1.5 ps
Energia del burst, E_b	5 – 7.5 – 10 – 12.5 – 15 – 20 – 25 μ J				
Numero di bursts, N	50 – 100 – 200 – 400 – 800 – 1600				

La fluensa di soglia F_{th} , sia per NPM che per BM è determinata attraverso il metodo di Liu [11], che assume gaussiana la distribuzione spaziale dell'energia del fascio, basato sulla seguente equazione:

$$D^2 = 2w^2 \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right) \quad (1)$$

dove w è il raggio dello spot laser sulla superficie del target, F_0 è la fluensa laser di picco data da:

$$F_0 = \frac{2E}{\pi w^2} \quad (2)$$

suddiviso in due sottoimpulsi, di stessa energia. Tutte le altre orientazioni, pur fornendo due sottoimpulsi, con energia differente non vengono impiegate negli esperimenti del mio progetto di ricerca.

E è l'energia dell'impulso non-diviso in NPM, mentre in BM indica l'energia del sottoimpulso.

Ho misurato il diametro dei crateri con il microscopio ottico Nikon Eclipse ME600.

Fig. 2 riporta gli andamenti caratteristici dei dati sperimentali nel caso di burst con 16 sottoimpulsi e separazioni temporali di 1.5 e 3 ps. Analoghi andamenti sono stati ottenuti con tutti gli altri parametri di Tabella 1 in BM e per gli esperimenti condotti in NPM con energie per impulso e numero di impulsi analoghi ad E_b ed N .

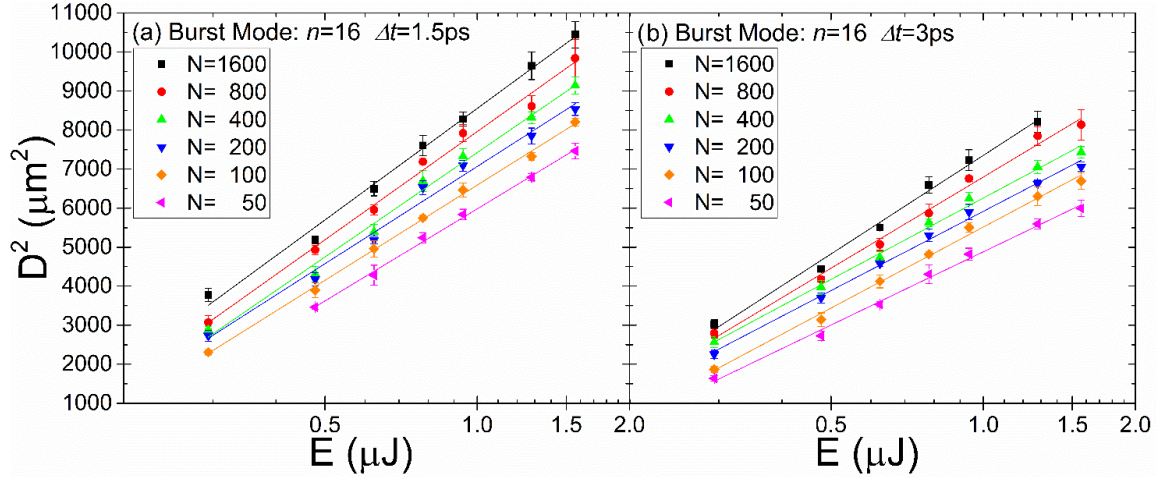


Fig. 2. Diametri al quadrato in funzione dell'energia del sottoimpulso del burst per $n=16$ sottoimpulsi con separazioni temporali di 1.5 ps in (a) e di 3 ps in (b), per acciaio inossidabile irraggiato con $N=50, 100, 200, 400, 800, 1600$ bursts.

Fittando i dati sperimentali su scala semilogaritmica, si ricavano i valori di w e di F_{th} dal coefficiente angolare e dell'intercetta come si può verificare combinando (1) e (2) e linearizzando l'equazione risultante.

Se si riportano in un grafico i valori di F_{th} (sopra determinati) in funzione del numero totale di sottoimpulsi incidenti² il target, si ottengono gli andamenti di Fig.3.

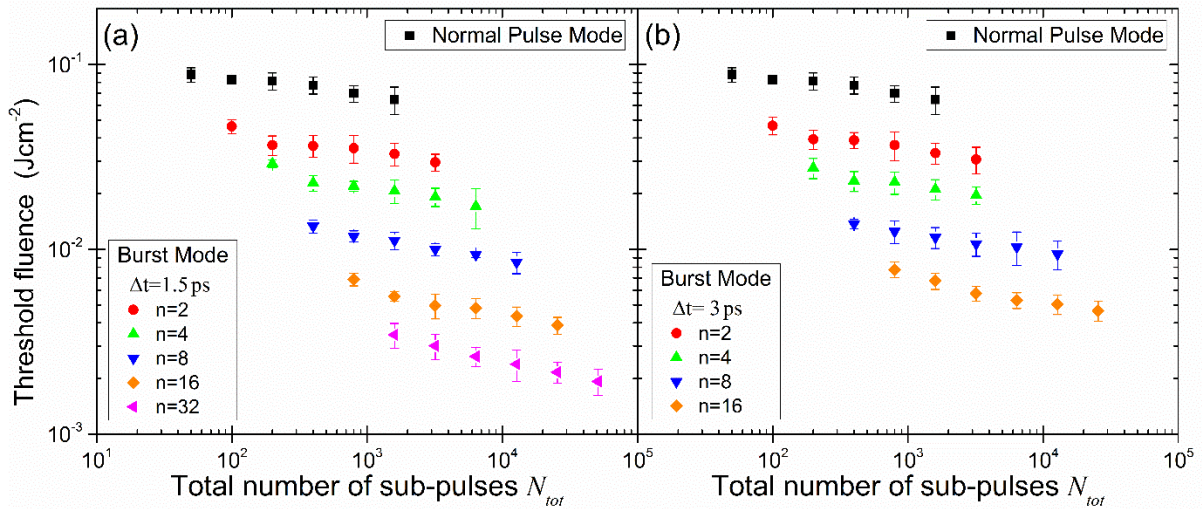


Fig. 3. Trend della fluenza di soglia in funzione del numero totale di sottoimpulsi $N_{tot} = N * n$. La separazione temporale tra i sottoimpulsi è 1.5 ps in (a) e 3 ps in (b). I punti neri rappresentano la fluenza di soglia in funzione del numero di impulsi in NPM.

Da Fig.3 si osserva che si hanno diversi valori di fluenza di soglia per lo stesso valore di N_{tot} come combinazione di N ed n .

In letteratura, tutti i modelli introdotti per descrivere il trend della fluenza di soglia in funzione del numero di impulsi incidenti (in NPM) restituiscono un singolo valore di F_{th} una volta fissato il

² Il numero totale di sottoimpulsi incidenti è determinato da $N_{tot} = N * n$, prodotto del numero di burst N per il numero di sottoimpulsi n di ciascuno.

numero di impulsi N . Tali modelli prendono il nome di modelli di incubazione³. Tra essi, citiamo quello di Jee [5,12], la cui equazione è la seguente:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1) * N^{(S-1)} \quad (3)$$

dove $F_{th}(N)$ denota la fluena di soglia a seguito di irraggiamento con N impulsi, mentre $F_{th}(1)$ nel caso di singolo impulso, S è il coefficiente di incubazione il cui valore indica quanto forte è l'effetto di incubazione.

Di conseguenza, poiché nessuno dei modelli conosciuti è in grado di descrivere il comportamento osservato in Fig. 3 per BM, abbiamo applicato un differente approccio. Ovvero, abbiamo studiato l'andamento della fluena di soglia in funzione del numero di burst N per fissati n e Δt , introducendo nel modello di Jee (Eq.3), il coefficiente di incubazione S_n , dipendente dal numero di sottoimpulsi del burst e dalla loro separazione temporale:

$$F_{th,b}(N) = F_{th,b}(1) * N^{(S_n-1)} \quad (4)$$

$F_{th,b}$ è la fluena di soglia del burst che differisce dalla definizione di F_{th} dal fatto che nell'Eq.2, l'energia E è quella dell'intero burst rispetto a quella del singolo impulso.

Dai fit dei dati sperimentali (Fig. 4) è possibile determinare il valore del coefficiente di incubazione S nel NPM (Fig.4(a)) e dei S_n nel BM (Fig.4(b)).

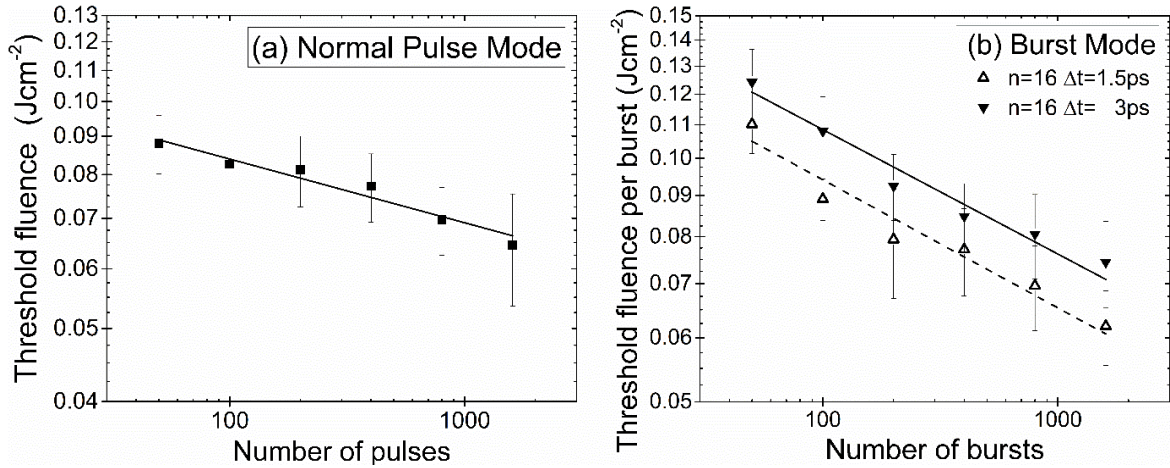


Fig. 4. (a) Andamento della fluena di soglia in funzione del numero di impulsi incidenti il target in condizioni di NPM. I dati sperimentali sono fittati con l'equazione di Jee (Eq.3). (b) Andamento della fluena di soglia per burst in funzione del numero di burst in BM per $n=16$ e separazioni temporali di 1.5 e 3 ps. I dati sperimentali sono fittati col modello di Jee modificato (Eq.4).

Infine riportiamo in Fig. 5 l'andamento del coefficiente di incubazione S_n in funzione del numero di sottoimpulsi n nel burst.

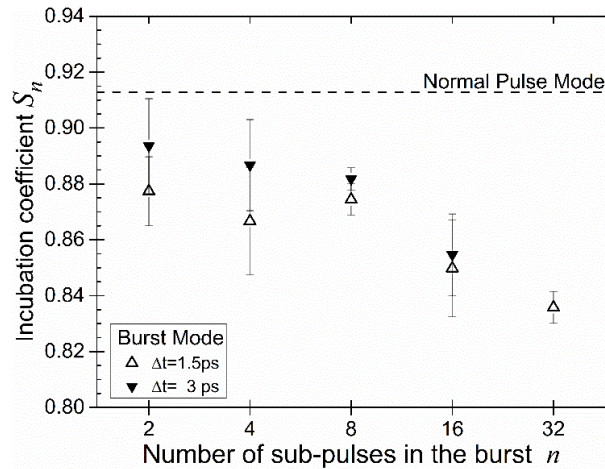


Fig. 5. Trend del coefficiente di incubazione in funzione del numero di sottoimpulsi nel burst per le due separazioni temporali studiate, 1.5 e 3 ps. Per confronto, il coefficiente di incubazione nel caso NPM è riportato mediante la linea tratteggiata.

³ La riduzione della fluena di soglia con l'aumentare del numero di impulsi incidenti il target va sotto il nome di effetto di incubazione. Tale effetto è stato attribuito a meccanismi di accumulazione del danno (deformazioni plastiche, cambiamenti chimici e/o strutturali).

In BM, il valore del coefficiente di incubazione non è più univoco come nel caso NPM, ma dipende dalle caratteristiche del burst (n e Δt). In particolare S_n risulta sempre inferiore ad S e decrescente all'aumentare di n per entrambe le separazioni temporali investigate. Quindi, quanto più grande è il numero di sottoimpulsi nel burst, tanto maggiore sarà l'effetto di incubazione.

3. Obiettivi futuri

Gli obiettivi che mi prefiggo di raggiungere nel secondo anno di dottorato riguardano lo studio del tasso di ablazione laser in BM, al variare dei parametri del burst (numero di sottoimpulsi, separazione temporale tra questi, polarizzazione dei sottoimpulsi) ed il confronto con il NPM.

Inoltre, vista la recente acquisizione da parte dei nostri laboratori del laser Light Conversion Pharos, esso potrà essere utilizzato come sorgente di impulsi in ingresso al medesimo generatore di burst per le successive prove sperimentali, con il vantaggio di poter selezionare durate dell'impulso inferiori a 650 fs (la minore durata temporale fornita dal Active Fiber Systems GmbH) utilizzata negli esperimenti finora condotti. Infatti, il Pharos (1030 nm) permette di selezionare la durata dell'impulso nel range 200 fs – 10 ps e frequenze di ripetizione degli impulsi da 1 kHz ad 1 MHz, raggiungendo una potenza media massima di 6 Watt ed energie per impulso fino a 1.5 mJ (l'uso di tale laser resta pur sempre vincolato dai valori di danneggiamento del generatore di burst).

Mi propongo di investigare gli effetti di polarizzazione (lineare, circolare) non soltanto sul tasso di ablazione, ma anche sulle LIPSS (laser-induced period surface structures) prodotte in BM sulla superficie del target (acciaio inossidabile nel caso che mi riguarda) il cui interesse scientifico ed applicativo è attuale [13].

4. Corsi dottorato

	Dipartimento	Corso	Professore	Giudizio
#1	Physics	Management and knowledge of European research model and promotion of research results	D'Orazio Alessia	Idoneo
#2	Physics	How to prepare a technical speech in English	White Carmela	Idoneo
#3	Physics	LabView introductory Course	Gargano Fabio	Idoneo
#4	Physics	Programming FPGA with LabView	Giuseppe Tagliente	Idoneo
#5	Physics	Complex Systems	Ferraro Giovanni	Idoneo
#6	Physics	Optical Sensors	Spagnolo Vincenzo	Idoneo
#7	POLIBA DEI	Principles of Optoelectronic and Photonic Sensor	Troia Benedetto	Idoneo
#8	POLIBA DMMM	Metallography – Electron Microscopy and Related Techniques - XRD	Kaya Ali Arslan	Idoneo

5. Esperienze didattiche

- Attività di insegnamento A.A.2016/2017 della disciplina Fisica (20 ore) nel corso di “Preparazione e approfondimento per lo studio delle materie di base” presso il Politecnico di Bari.

- Sostegno alle attività didattico-integrative A.A.2015/2016 per l'insegnamento di Fisica Generale A (20 ore) del Prof. Brambilla Massimo per il Corso di Studio di Ingegneria Informatica e dell'Automazione del Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'informazione (DEI) – Politecnico di Bari.

6. Bibliografia

1. R. Knappe, H. Haloui, A. Seifert, A. Weis, A. Nebel, "Scaling ablation rates for picosecond lasers using burst micromachining," Proc. SPIE **7585**, 75850H (2010).
2. B. Neuenschwander, T. Kramer, B. Lauer, B. Jaeggi, "Burst mode with ps- and fs-pulses: Influence on the removal rate, surface quality and heat accumulation," Proc SPIE **9350**, 93500U (2015).
3. C. Gaudiuso, H. Kämmer, F. Dreisow, A. Ancona, A. Tünnermann, S. Nolte, "Ablation of silicon with bursts of femtosecond laser pulses," Proc. of SPIE **9041**, 974017 (2016).
4. A. Ancona, F. Röser, K. Rademaker, J. Limpert, S. Nolte, A. Tünnermann, "High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultrafast fiber CPA system," Opt. Express **16**(12), 8958-8968 (2008).
5. F. Di Niso, C. Gaudiuso, T. Sibillano, F. P. Mezzapesa, A. Ancona, P. M. Lugarà, "Role of heat accumulation on the incubation effect in multi-shot laser ablation of stainless steel at high repetition rates," Opt. Express **22**(10), 12200-12210 (2014).
6. Wenqian Hu · Yung C. Shin · Galen King, "Modeling of multi-burst mode pico-second laser ablation for improved material removal rate," Appl. Phys. A **98**, 407-415 (2010).
7. D. Breitling, A. Ruf, F. Dausinger, "Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses," Proc. SPIE **5339**, 49-63 (2004).
8. B. Dromey, M. Zepf, M. Landreman, K. O'Keeffe, T. Robinson, S. M. Hooker, "Generation of a train of ultrashort pulses from a compact birefringent crystal array," Appl. Optics **46**(22), 5142-5146 (2007).
9. S. Zhou, D. Ouzounov, H. Li, I. Bazarov, B. Dunham, C. Sinclair, F. W. Wise, "Efficient temporal shaping of ultrashort pulses with birefringent crystals," Appl. Optics **46**(35), 8488-8492 (2007).
10. S. Backus, C. G. Durfee III, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, "High power ultrafast lasers," Rev. Sci. Instrum. **69**(3), 1207-1223 (1998).
11. J. M. Liu, "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," Opt. Lett. **7**(5), 196-198 (1982).
12. Y. Jee, M. F. Becker, R. M. Walser, "Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces," J. Opt. Soc. Am. B **5**(3), 648-659 (1988).
13. M. Martínez-Calderon, M. Manso-Silván, A. Rodríguez, M. Gómez-Aranzadi, J. P. García-Ruiz, S. M. Olaizola, R. J. Martín-Palma, "Surface micro- and nano-texturing of stainless steel by femtosecond laser for the control of cell migration," Sci. Rep. **6**, 36296 (02.11.2016).