

DETEKSI KONDISI AMBANG BATAS DALAM TEKNIK FABRIKASI LASER MENGGUNAKAN FOTOLUMINESENSI

Edy Yulianto

Balai Teknologi Mesin Perkakas Produksi dan Otomasi (BTMEPPO)
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
Email: edy.yulianto@bppt.go.id

ABSTRAK

Kondisi ambang batas dalam fabrikasi laser sangat penting untuk diketahui guna memastikan keberhasilan fabrikasi. Pada saat ini, kondisi ambang batas dalam fabrikasi laser ditentukan dengan mengkarakterisasi struktur yang dikembangkan hasil dari proses fabrikasi laser pada fabrikasi awal. Penelitian ini bertujuan memperkenalkan teknik yang mudah dan cepat untuk menentukan kondisi ambang batas yang dapat dilakukan pada saat proses fabrikasi dengan laser. Sehingga teknik ini dapat digunakan untuk memastikan pembentukan struktur dengan cepat pada saat proses fabrikasi sedang berlangsung. Metode yang di gunakan adalah metode eksperimen dengan menggunakan 5 tahapan. Tahap 1. persiapan material fotoresist yang akan digunakan untuk percobaan; Tahap 2, sinar laser difokuskan pada material fotoresist untuk proses fabrikasi. Tahap 3, struktur telah dihasilkan dari proses fabrikasi, dan struktur yang terbentuk masih berada di dalam fotoresist; Tahap 4, hasil fabrikasi direndam di dalam cairan developer. Tahap 5, struktur hasil fabrikasi diperoleh setelah bagian dari material fotoresist yang tidak mengalami fotopolimerisasi. Hasil penelitian ini adalah metoda untuk menentukan kondisi ambang batas dengan memanfaatkan fotoluminesensi yang terjadi pada saat proses fabrikasi dengan sinar laser pada fotoresist terbukti dapat digunakan

Kata kunci: ambang batas, fabrikasi, laser

ABSTRACT

Knowing the threshold conditions in laser fabrication is very important to ensure the success of laser fabrication. Now, the threshold condition in laser fabrication is determined by characterizing the developed structure resulting from the laser fabrication process in the initial experiment.. In this study, we introduce an easy and fast technique to determine threshold conditions that can be done during the laser fabrication process. So that this technique can be used to ensure the formation of structures immediately from the beginning of the fabrication process. The method used is an experimental method using 5 stages. Stage 1.preparation of the photoresist material to be used for the experiment; Stage 2, the laser beam is focused on the photoresist material for the fabrication process. Stage 3, the structure has been produced from the fabrication process, and the structure formed is still in the photoresist; Stage 4, the fabrication results are immersed in the developer liquid. Stage 5, the fabricated structure is obtained after the part of the photoresist material that has not undergone photo polymerization. The result of this study is a method to determine the threshold conditions by utilizing photoluminescence that occurs during the fabrication process with laser light on a photoresist that is proven to be used.

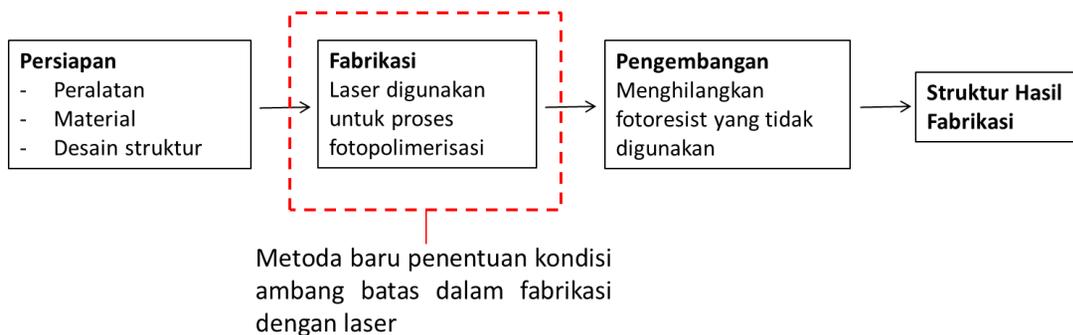
Keywords: *threshold, fabrication, laser*

1. PENDAHULUAN

Teknologi laser merupakan teknologi terkini yang dapat digunakan untuk fabrikasi struktur pada beberapa material, seperti fotoresist [1-3] yang digunakan untuk kristal fotonik [4,5], komponen elektromagnetik [6, 7] dan *metamaterial* [8], *mikro-opticals* [9], *micro-fluidics*[10], dan lain-lain. Salah satu faktor penting dalam proses fabrikasi laser adalah menentukan kondisi ambang batas, dengan menentukan kondisi ambang batas yang sesuai, kami dapat memastikan keberhasilan proses fabrikasi.

Ambang batas adalah keadaan minimal dimana parameter yang digunakan dalam proses fabrikasi dengan laser menghasilkan perubahan pada material yang berupa fotopolimerisasi sehingga terbentuk struktur. Pada artikel ini, pembahasan akan difokuskan pada penentuan ambang batas fabrikasi dengan sinar laser untuk pembuatan struktur pada material fotoresist.

Teknik fabrikasi laser dilakukan dengan tahapan proses seperti diilustrasikan pada Gambar 1, dimulai dengan persiapan material fotoresist pada *glass substrate*, kemudian proses fabrikasi dilakukan dengan cara memfokuskan sinar laser pada material fotoresist dengan pola gerakan tertentu menyesuaikan desain struktur yang akan difabrikasi. Setelah proses fabrikasi dengan sinar laser, dilanjutkan dengan pengembangan struktur, yang dilakukan dengan cara melarutkan struktur fabrikasi (yang masih berada di dalam *fotoreisist*) ke dalam cairan *developer*, untuk melarutkan *fotoreisist* yang tidak tereksitasi (pada *fotoreisist* negatif) atau melarutkan fotoresist yang tereksitasi (pada *fotoreisist* positif). Dan terakhir dilakukan karakterisasi untuk mengetahui hasil dari struktur yang diperoleh dari fabrikasi dengan sinar laser.



Gambar 1. Proses fabrikasi dengan menggunakan laser pada material *fotoreisist*

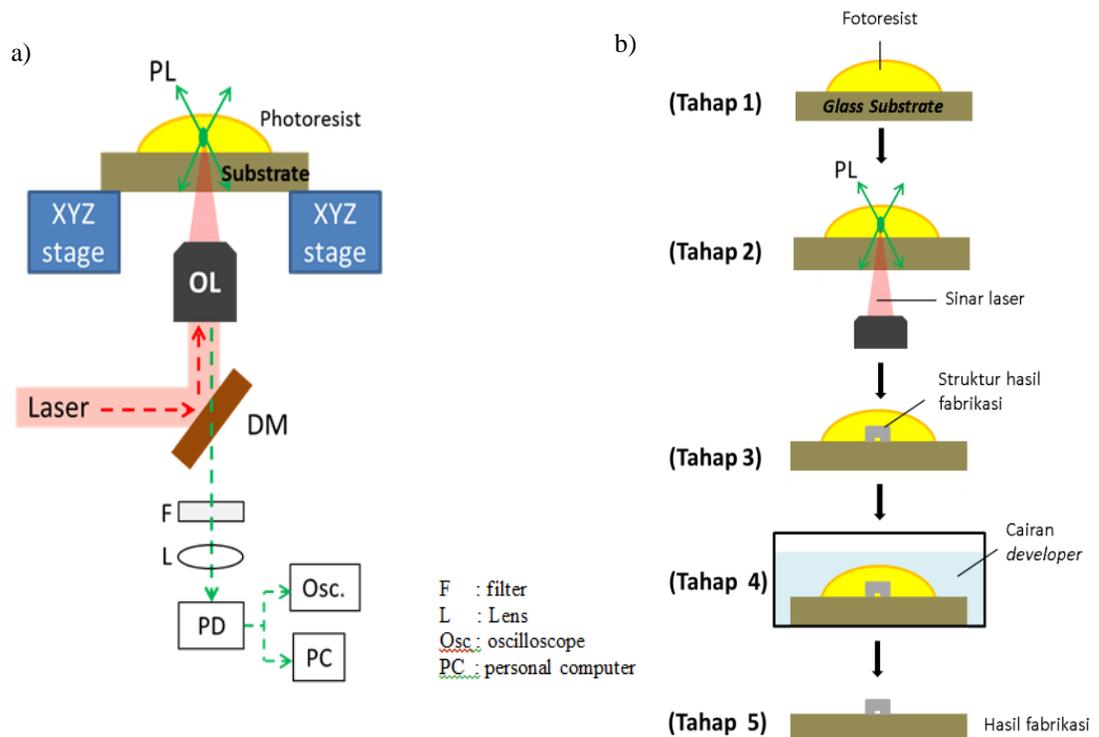
Pada saat ini, keberhasilan proses fabrikasi dengan teknik laser dilakukan dengan mengamati atau meng-karakterisasi dengan peralatan seperti mikroskop optik, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, atau peralatan lainnya dan dilakukan setelah proses pengembangan. Sehingga untuk menentukan keberhasilan proses fabrikasi dengan laser pada suatu material membutuhkan waktu yang lama dan material yang sudah dilakukan proses pengembangan tidak bisa digunakan lagi untuk pembuatan struktur baru. Oleh karena itu, pada penelitian ini, bertujuan memperkenalkan suatu metode atau teknik untuk menentukan kondisi ambang batas pada proses fabrikasi laser secara cepat, yang dilakukan pada saat proses fabrikasi laser. Teknik ini menggunakan perubahan yang terjadi pada intensitas emisi fotoluminesensi yang dihasilkan pada saat proses eksitasi laser pada *fotoreisist*, yang berbeda dari teknik penentuan ambang batas dengan memanfaatkan emisi fotoluminesensi dari penelitian-penelitian yang ada sebelumnya[11-13], dimana pada teknik tersebut deteksi ambang batas dilakukan setelah proses eksitasi laser pada *fotoreisist*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Konfigurasi peralatan yang digunakan untuk fabrikasi laser dan eksperimen digambarkan secara skematis pada Gambar. 2a. Pada penelitian ini digunakan *femtosecond Ti*: laser safir dengan frekuensi *temporal* 100 fs, panjang gelombang 800 nm pada tingkat pengulangan 80 MHz. Sinar difokuskan dalam sampel oleh lensa objektif (OL) dengan *numerical aperture* NA = 1,35. Intensitas

photoluminescence (PL) dari fotoresist direkam menggunakan fotodiode Si yang diperkuat. Fotoresist yang digunakan adalah organik-anorganik hibrida fotoresist yang dikenal dengan SZ2080 yang mengandung fotoiniator (PI) 1% massa 4,4-bis(diethylamino) benzophenone (*Sigma-Aldrich*). Sampel yang terpapar dikembangkan dalam cairan *developer pentanon:isopropanol* (50:50), dibilas dalam etanol, dan dikeringkan dalam pengering CO₂ super-kritis untuk mencegah penghancuran struktur fotoresist yang rapuh, berpola halus, oleh gaya kapiler selama pengeringan konvensional.

Sampel fotoresist terdiri dari fotoresist organik-anorganik hibrida SZ2080 [11] dengan fotoiniator massa 0,5% 4,4-bis (diethylamino) benzophenone (BIS), ditempatkan pada *glass substrate* penutup mikroskop. PI memiliki pengaruh besar pada PL yang dihasilkan selama eksitasi; untuk fotoiniator BIS memiliki emisi PL dengan panjang gelombang sekitar 530 nm dan bandwidth sekitar 20 nm [14]. Pengaruh intensitas emisi PL selama eksitasi akan dipengaruhi oleh panjang gelombang cahaya untuk eksitasi dan juga parameter intensitas cahaya untuk eksitasi, seperti kecepatan gerak translasi selama proses eksitasi yang mempengaruhi energi eksitasi yang diterima oleh fotoresist



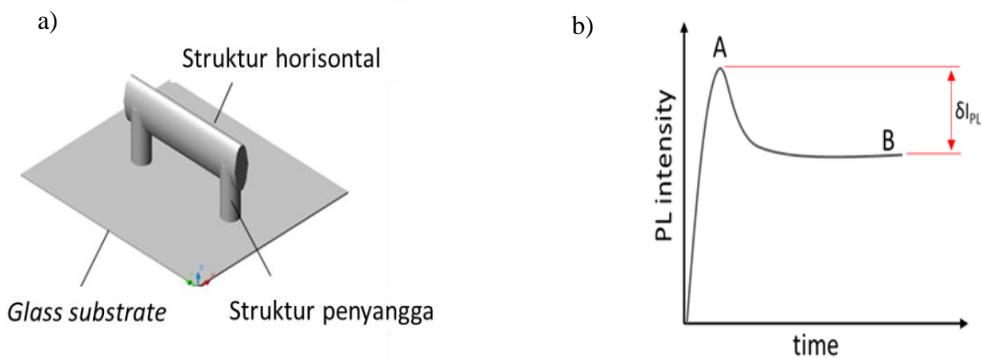
Gambar 2a. Konfigurasi peralatan yang digunakan dalam penelitian; 2b. Diagram alir proses percobaan pada penelitian ini

Gambar 2b. menjelaskan proses percobaan pada penelitian ini, Tahap 1 merupakan tahap persiapan material fotoresist yang akan digunakan untuk percobaan; Tahap 2, sinar laser difokuskan pada material fotoresist untuk proses fabrikasi. Pada tahap ini, dilakukan pen-deteksi-an kondisi ambang batas, bersamaan dengan proses fabrikasi dengan laser pada fotoresist; Tahap 3, struktur telah dihasilkan dari proses fabrikasi, dan struktur yang terbentuk masih berada di dalam fotoresist; Tahap 4, hasil fabrikasi direndam di dalam cairan *developer* selama 10 menit; Tahap 5, struktur hasil fabrikasi diperoleh setelah bagian dari material fotoresist yang tidak mengalami fotopolimerisasi terlarut dalam cairan *developer*.

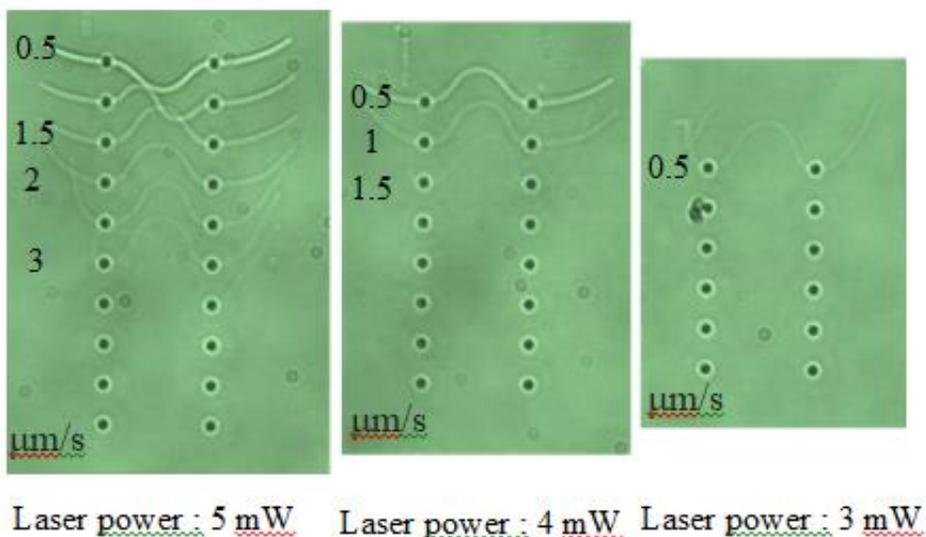
Model struktur yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3a. Dua penyangga besar yang dipisahkan oleh jarak $10\ \mu\text{m}$ memberikan dukungan mekanis untuk fitur uji yang merupakan struktur horizontal yang menempel di atas *glass substrate*. Dalam penelitian ini menggunakan parameter variabel berupa kecepatan gerak laser dan daya laser yang digunakan untuk eksitasi. Kecepatan translasi selama eksitasi yang digunakan adalah $2 - 4\ \mu\text{m/s}$ dengan *step* $0,5\ \mu\text{m/s}$, dan daya yang digunakan adalah $2 - 5\ \text{mW}$ dengan *step* $0,5\ \text{mW}$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Percobaan pada penelitian dilakukan dengan proses perekaman emisi PL pada saat proses fabrikasi struktur horizontal seperti pada Gambar 3a. Dan dari emisi PL yang terjadi, akan dilakukan pengamatan pada perubahan intensitas PL (δI_{PL}) yang terjadi untuk menentukan kondisi ambang batas dari fabrikasi dengan sinar laser pada material fotoresist, seperti pada Gambar 3b.



Gambar 3 (a) Desain struktur untuk eksperimen; (b) Parameter perubahan intensitas PL (δI_{PL})

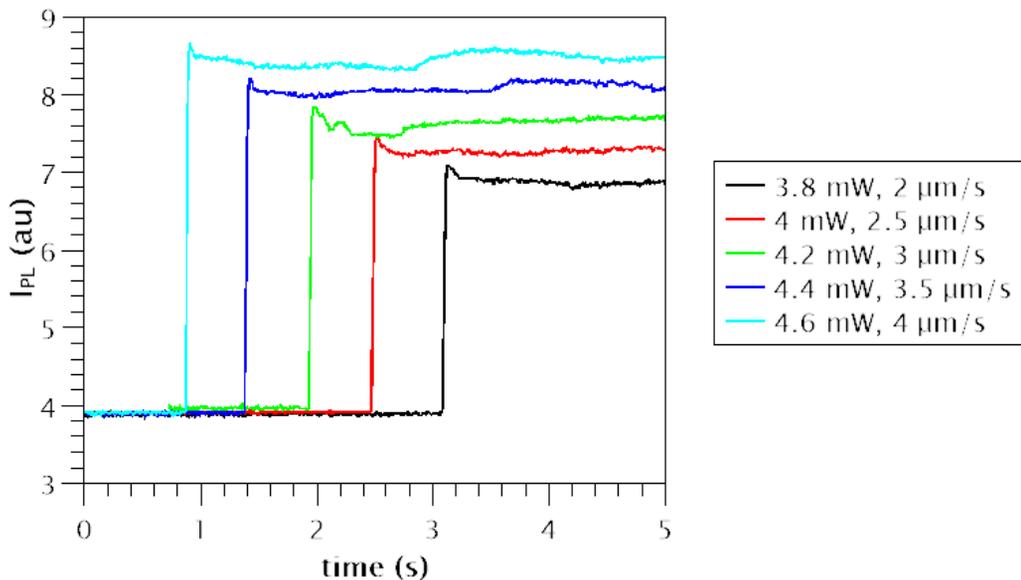


Gambar 4. Struktur yang dibuat dengan teknik laser

Gambar 4 adalah hasil pengamatan dengan mikroskop dari struktur hasil fabrikasi pada percobaan awal. Dari percobaan awal ini dapat dilihat perkiraan ambang batas pembentukan struktur horizontal pada struktur yang dibuat, dimana didapatkan kondisi ambang batas dengan parameter sebagai berikut :

- Daya laser 5 mW, kecepatan sinar laser 3 $\mu\text{m/s}$
- Daya laser 4 mW, kecepatan sinar laser 1,5 $\mu\text{m/s}$
- Daya laser 3 mW, kecepatan sinar laser 0,5 $\mu\text{m/s}$

Berdasarkan percobaan awal tersebut, kami melakukan percobaan dengan beberapa parameter daya laser yang digunakan untuk eksitasi, yaitu daya laser 3,8 mW sampai 4,6 mW dengan step 0,2 mW. Dari setiap daya laser yang digunakan, kecepatan gerak laser diidentifikasi dalam kondisi mendekati ambang batas pembentukan struktur horizontal pada fotoresist.



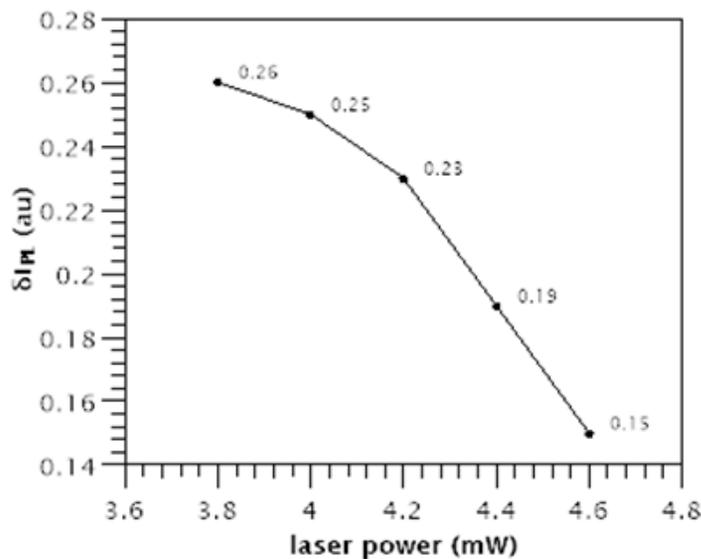
Gambar 5. Perubahan intensitas PL (δI_{PL}) selama proses fabrikasi struktur horizontal dengan teknik laser

Berikut ini adalah parameter daya laser dan kecepatan gerak laser pada keadaan ambang batas pembentukan struktur horizontal, daya laser masing-masing 3,8 mW, 4 mW, 4,2 mW, 4,4 mW, 4,6 mW, dan kecepatan gerak laser (menyesuaikan dengan urutan daya laser yang telah disebutkan) adalah 2 $\mu\text{m/s}$, 2,5 $\mu\text{m/s}$, 3 $\mu\text{m/s}$, 3,5 $\mu\text{m/s}$, dan 4 $\mu\text{m/s}$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 1. Kondisi ambang batas pada fabrikasi dengan sinar laser berdasar daya laser dan perubahan intensitas PL (δI_{PL})

Laser Power (mW)	δI_{PL} (au)
3,8	0,26
4	0,25
4,2	0,23
4,4	0,19
4,6	0,15

Tabel 1. merupakan hasil pengamatan pada kondisi ambang batas terhadap besarnya δI_{PL} yang terjadi pada saat dilakukan fabrikasi dengan menggunakan beberapa daya laser. Dapat dilihat bahwa terdapat adanya hubungan antara besarnya daya laser dan δI_{PL} untuk mencapai kondisi ambang batas dalam pembentukan struktur di dalam fotoresist, . Dimana pada fabrikasi dengan menggunakan daya laser 3,8 mW, 4 mW, 4.2 mW, 4.4 mW, dan 4,6 mW kondisi ambang batas diperoleh (secara berurutan sesuai dengan daya laser yang telah disebutkan) pada saat δI_{PL} sebesar 0,26, 0,25, 0,23, 0,19, dan 0,15.



Gambar 6. Hubungan daya laser dan perubahan intensitas PL (δI_{PL}) pada kondisi ambang batas.

Besarnya δI_{PL} berbanding terbalik dengan ukuran daya laser yang digunakan untuk proses fabrikasi pada fotoresist, dimana semakin besar daya laser akan semakin besar energy yang ditimbulkan, dengan semakin besarnya energy yang dihasilkan akan menjadikan semakin kecil δI_{PL} yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi ambang batas, seperti ditunjukkan pada gambar 6. Dari penelitian ini, formula hubungan antara ambang batas dan besarnya δI_{PL} belum dapat diperoleh dengan jelas, sehingga memerlukan penelitian lebih lanjut untuk memperoleh formula yang lebih jelas dari hubungan ambang batas dan δI_{PL} .

4. KESIMPULAN

Penelitian menunjukkan bahwa metoda untuk menentukan kondisi ambang batas dengan memanfaatkan fotoluminesensi yang terjadi pada saat proses fabrikasi dengan sinar laser pada fotoresist terbukti dapat digunakan. Teknik ini dilakukan dengan mengamati perubahan pada emisi PL (δI_{PL}) yang terjadi saat proses fabrikasi dengan sinar laser pada material fotoresist. Masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan formula yang tepat yang menggambarkan hubungan antara besaran perubahan intensitas fotoluminesensi (δI_{PL}) dengan kondisi ambang pada proses fabrikasi dengan teknik laser.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Kawata, H.B. Sun, T. Tanaka, K. Takada, *Finer features for functional microdevices*, *Nature* 412 (2001) 697–698.
- [2] H. Misawa, S. Juodkazis (Eds.), *3D Laser Microfabrication: Principles and Applications*, Willey, 2006.
- [3] M. Malinauskas, A. Zukauskas, S. Hasegawa, Y. Hayasaki, V. Mizeikis, R. Buividas, S. Juodkazis, *Ultrafast laser processing of materials: from science to industry*, *Light-Sci. & Appl.* 5 (2016) e16133, <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.133>.
- [4] M. Deubel, G. von Freymann, M. Wegener, S. Pereira, K. Busch, C. Soukoulis, *Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications*. *Nat. Mater.* 3 (2004) 444–447.
- [5] V. Mizeikis, K.K. Seet, S. Juodkazis, H. Misawa, *Three-dimensional woodpile photonic crystal templates for infrared spectral range*, *Opt. Lett.* 29 (2004) 2061–2063.
- [6] I. Sakellari, X. Yin, M.L. Nesterov, K. Terzaki, A. Xomalis, M. Farsari, *3D chiral plasmonic metamaterials fabricated by direct laser writing: the twisted omega particle*, *Adv. Opt. Mater* 5 (16) (2017) 1700200, <https://doi.org/10.1002/adom.201700200>.
- [7] I. Faniayeu, V. Mizeikis, *Vertical split-ring resonator perfect absorber metamaterial for IR frequencies realized via femtosecond direct laser writing*, *Appl. Phys. Express* 10 (6) (2017) 062001, <https://doi.org/10.7567/APEX.10.062001>.
- [8] T. Frenzel, M. Kadic, M. Wegener, *Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist*, *Science* 358 (6366) (2017) 1072–1074, <https://doi.org/10.1126/science.aao4640>.
- [9] T. Gissibl, S. Thiele, A. Herkommer, H. Giessen, *Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives*, *Nat. Photonics* 10 (2016) 554–560.
- [10] W.C. Lee, Y.J. Heo, S. Takeuchi, *Wall-less liquid pathways formed with three-dimensional microring arrays*, *Appl. Phys. Lett.* 101 (2012) 14108.
- [11] Yulianto, E, Chatterjee S., and Mizeikis V. "Characterization of Latent 3D Laser Photoexposure Patterns in Photoresist Created by Direct Laser Writing." *Materials Today: Proceedings* 13 (2019): 149-153, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.205>
- [12] Yulianto, E, et al. "Imaging of latent three-dimensional exposure patterns created by direct laser writing in photoresists." *Applied Surface Science* 479 (2019): 822-827, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.033>

- [13] Yulianto, E, Purlys, V and Mizeikis, V. "Characterization of latent three-dimensional exposure patterns in photoresists." *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics XII*. Vol. 10930. International Society for Optics and Photonics, 2019, <https://doi.org/10.1117/12.2510806>
- [14] M. Malinauskas, A. Žukauskas, G. Bičkauskaitė, R. Gadonas, S. Juodkasis, Mechanisms of three-dimensional structuring of photo-polymers by tightly focussed femtosecond laser pulses, *Opt. Express* 18 (10) (2010) 10209–10221, <https://doi.org/10.1364/OE.18.010209>.