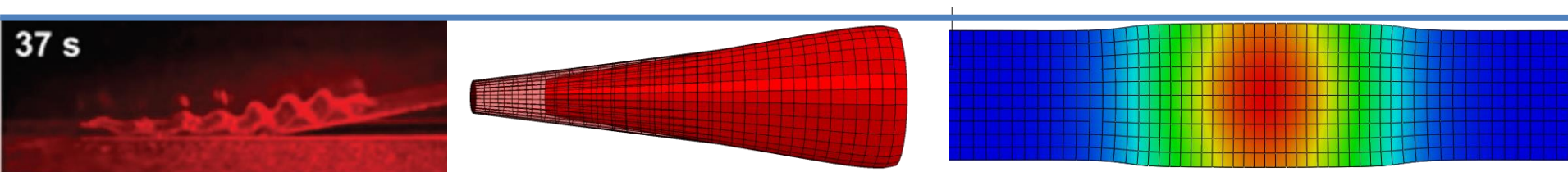




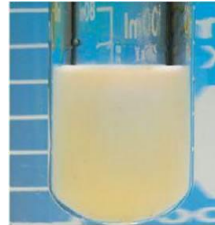
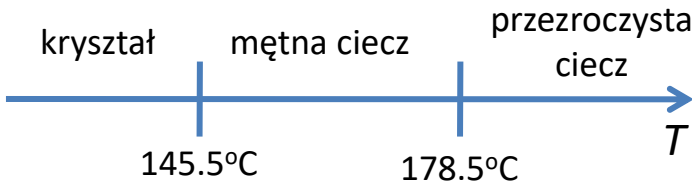
Elastomery ciekłokrystaliczne, czyli jak zbudować miękkiego robota

Jakub Haberko

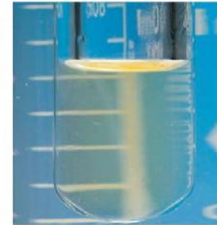


- Od ciekłych kryształów, poprzez polimery ciekłokrystaliczne do ciekłokrystalicznych elastomerów (*Liquid Crystal Elastomers*, LCE)
- Przykłady zastosowań LCE
- Tworzenie warstw LCE – różne metody, kontrola kierunku anizotropii własności
- Optyczne szczypce, siłowniki liniowe i akordeon – eksperyment i symulacje

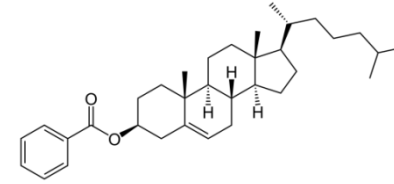
- 1888 – Friedrich Reinitzer obserwuje topienie kryształów roślinnego benzoesu cholesterolu pod mikroskopem (Praga)



145 °C < T < 179 °C
Liquid crystalline phase

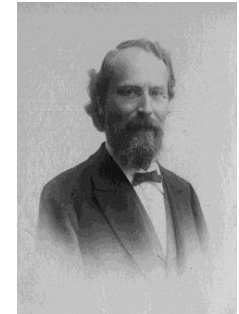


T > 179 °C
Liquid phase



F. Reinitzer

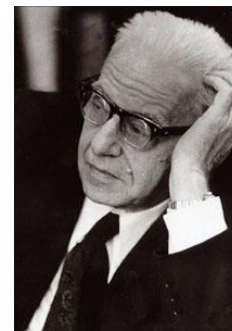
- 1889 – Otto Lehmann potwierdził nowy stan materii – „ciekły kryształ”
- I. 20-te XX w. – Georges Friedel, własności plastyczne i klasyfikacja
- I. 20-30. XX w. – Mieczysław Jeżewski, Marian Mięśowicz, (AGH, Kraków), własności elektryczne, dielektryczne, magnetyczne, **anizotropia lepkości**
- Od I. 70-tych XX w. – zastosowania w technice



O. Lehmann



M. Jeżewski



M. Mięśowicz

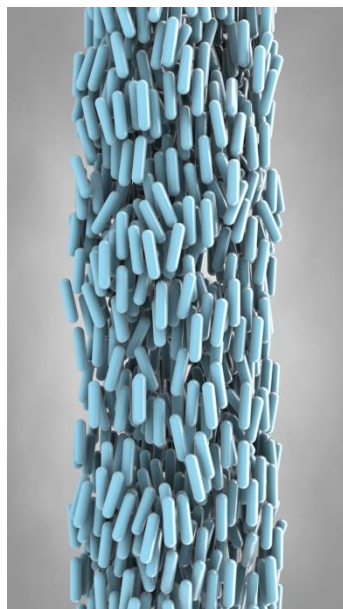


G. Friedel

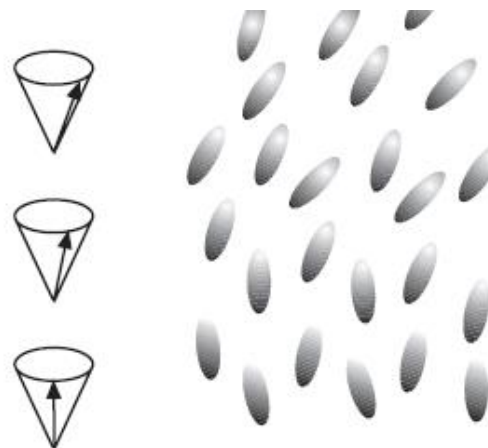
Nematyk (gr. νήμα - nić)



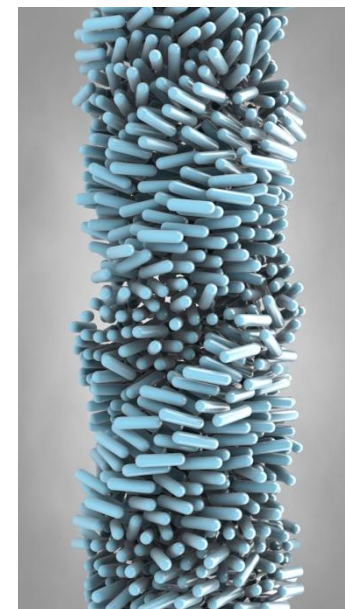
Nematic
(N)



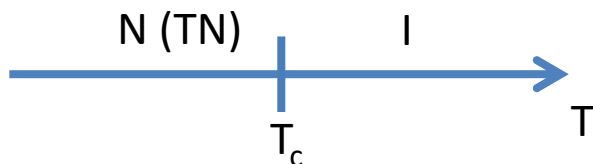
Nematyk chiralny



Chiral nematic
(N*)



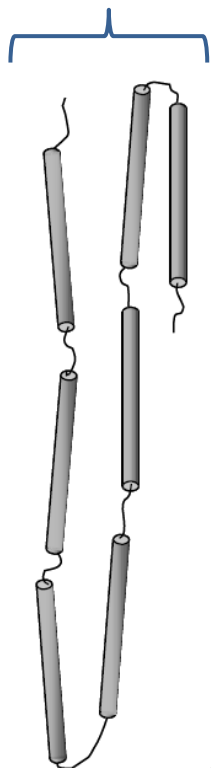
- Brak pozycyjnego porządku dalekiego zasięgu
- Porządek orientacyjny dalekiego zasięgu



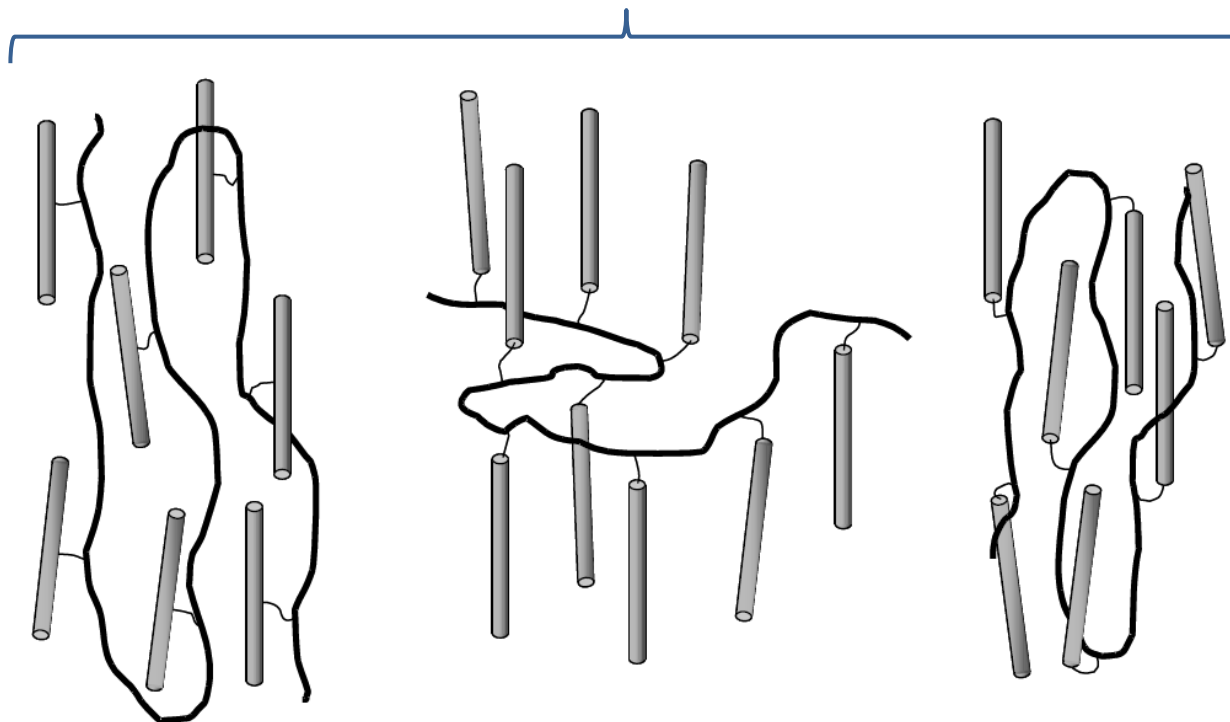
- Zbudowany z cząsteczek chiralnych
- Dawniej: c.k. cholesterolowy
- Skok helisy >100 nm
- Skok $\sim \lambda$ – odbicie lub rozpraszanie światła
- Skok zależy od temperatury
→ zastosowania



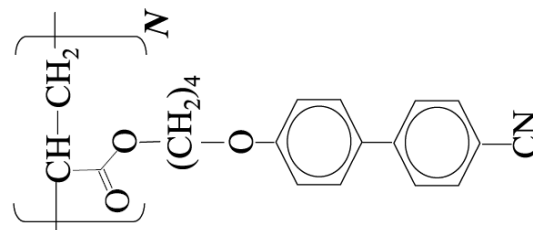
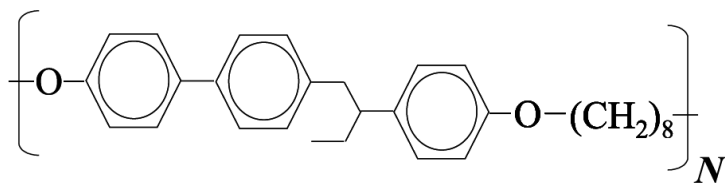
Sztywne pręty
w łańcuchu głównym

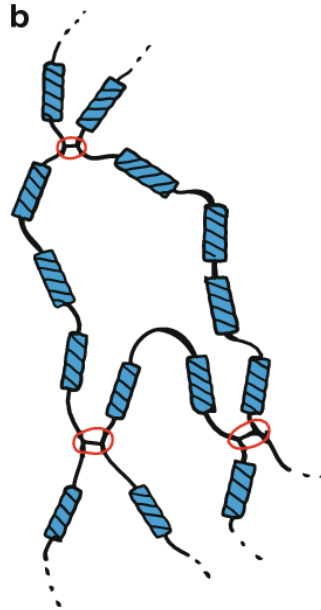
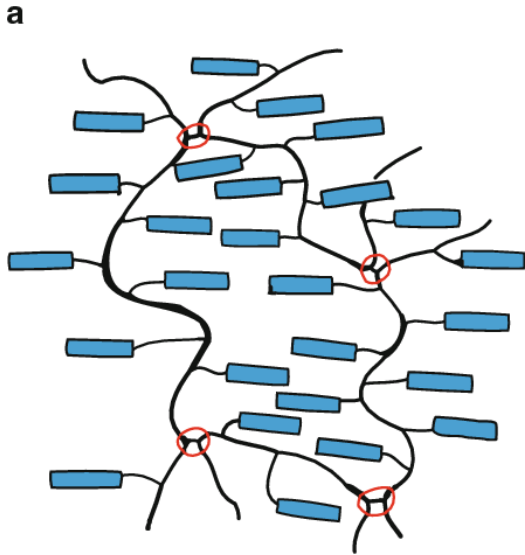


Sztywne pręty w łańcuchu bocznym



Źródło: M. Warner, E. M. Terentjev *Liquid Crystal Elastomers*, Oxford Science Publications



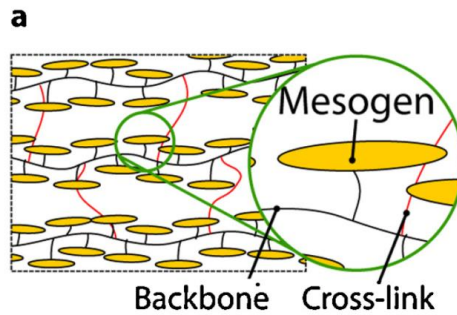
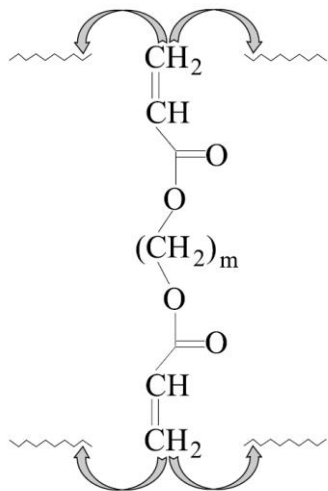


Właściwości:

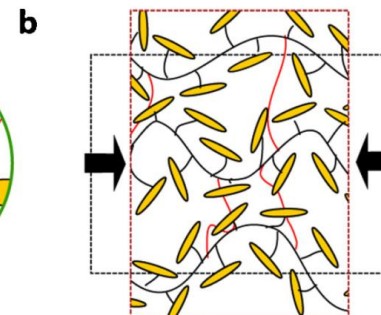
- LCE = LCP + sieciowanie
- Spontaniczne duże odkształcenie przy zmianie temperatury
- Odwracalne odkształcenie powodowane światłem
- Odkształcenie skorelowane z kierunkiem direktora
- Zależne od historii powstania
- Możliwa modulacja direktora w obrębie materiału

Źródło: DOI:10.1007/12_2011_164

Gdy grzejemy → przejście nematic – ciało izotropowe



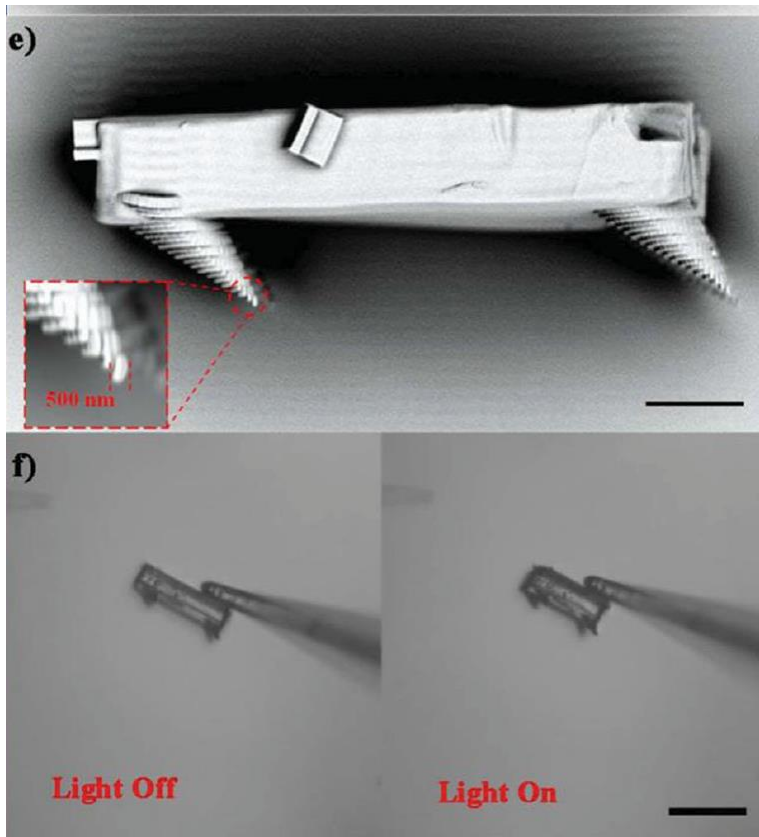
T < 90 °C - Nematic



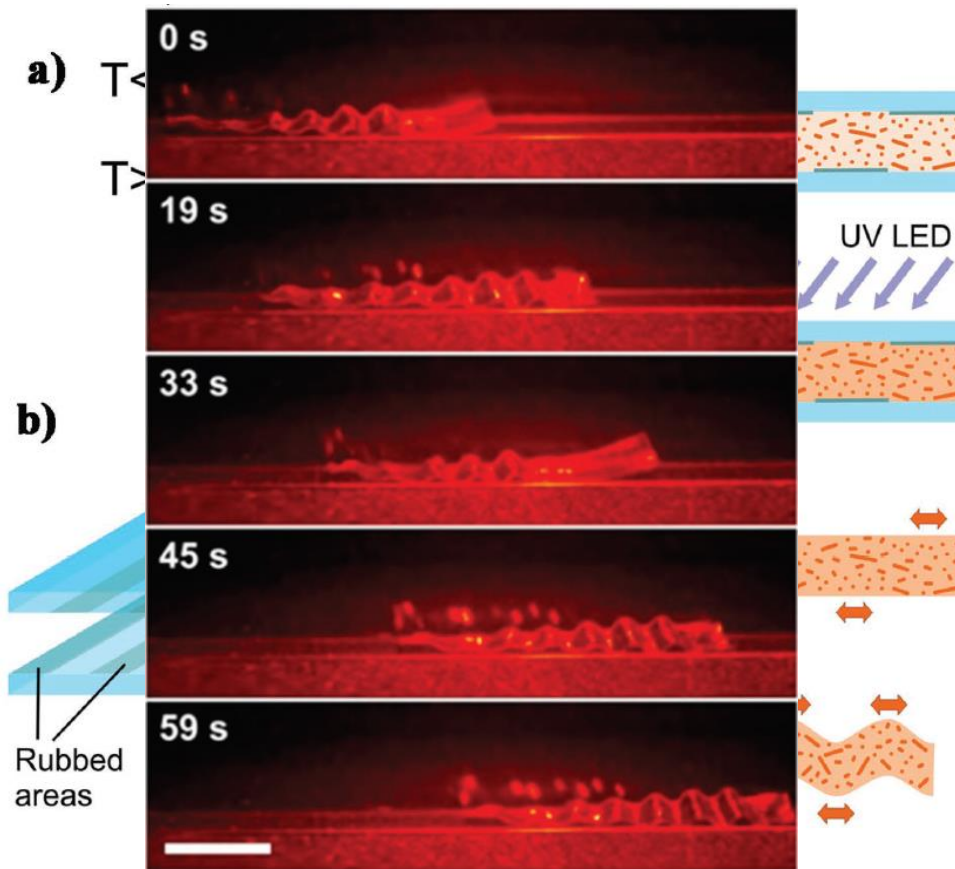
T > 120 °C - Isotropic

$$\Delta V = 0$$

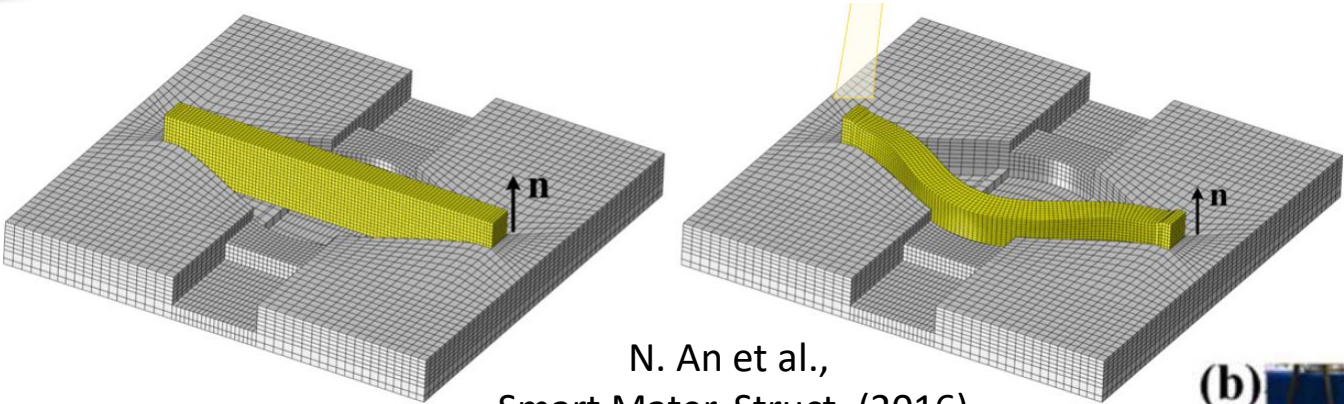
Źródło: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.10.014>



H. Zeng et al. *Light-Fueled Microscopic Walkers*, Adv. Mat 2015

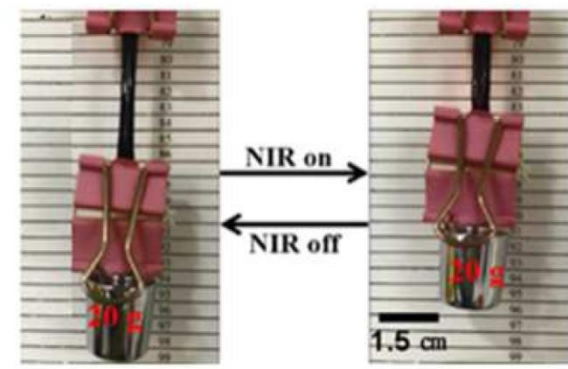
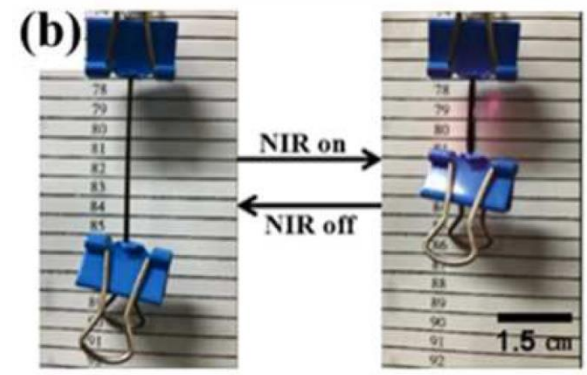
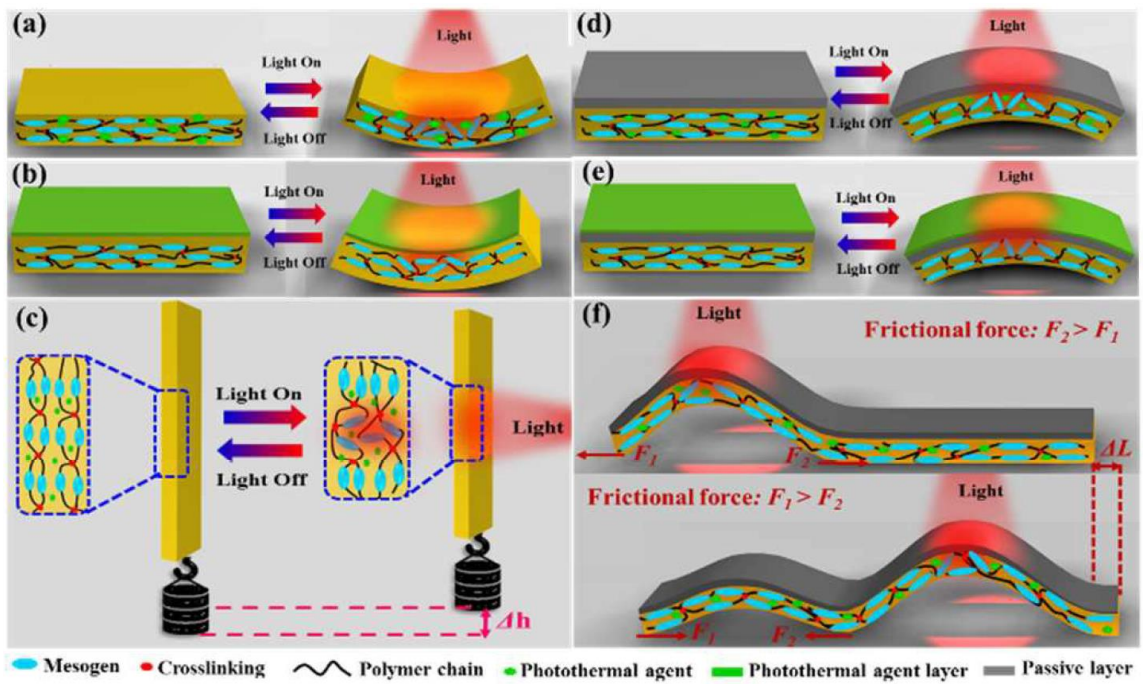


H. Rogóż et al. *Light-Driven Soft Robot Mimics Caterpillar Locomotion in Natural Scale*, Adv. Opt. Mat. 2014



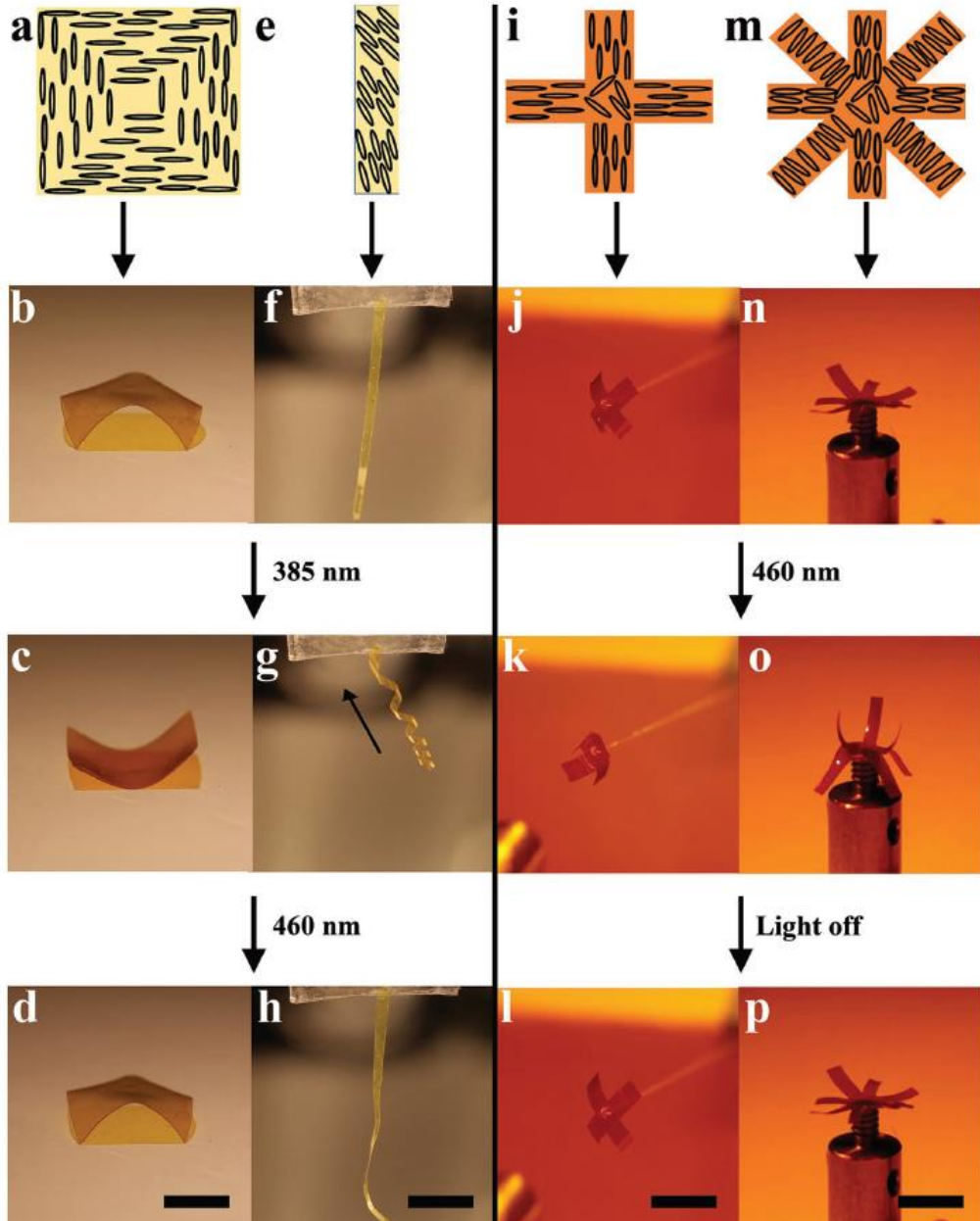
N. An et al.,
Smart Mater. Struct. (2016)

L. Liuet al., *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, **139**,
11333-11336

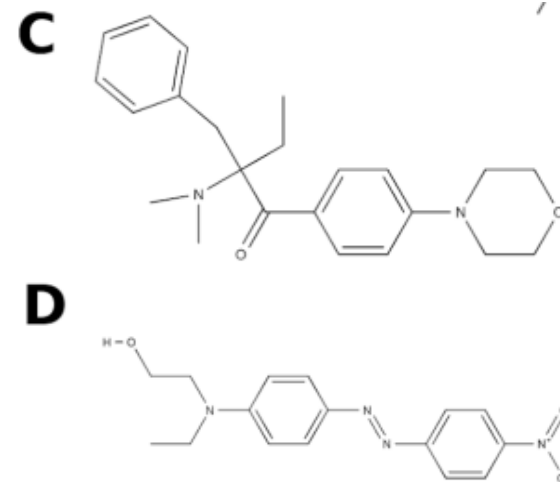
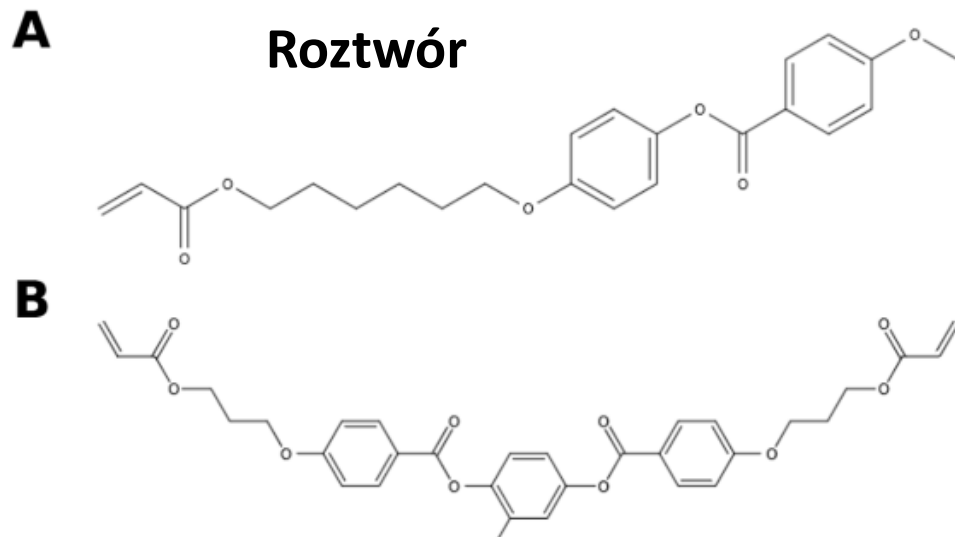


L. Dong, Y. Zhao, *Mater. Chem. Front.* (2018)

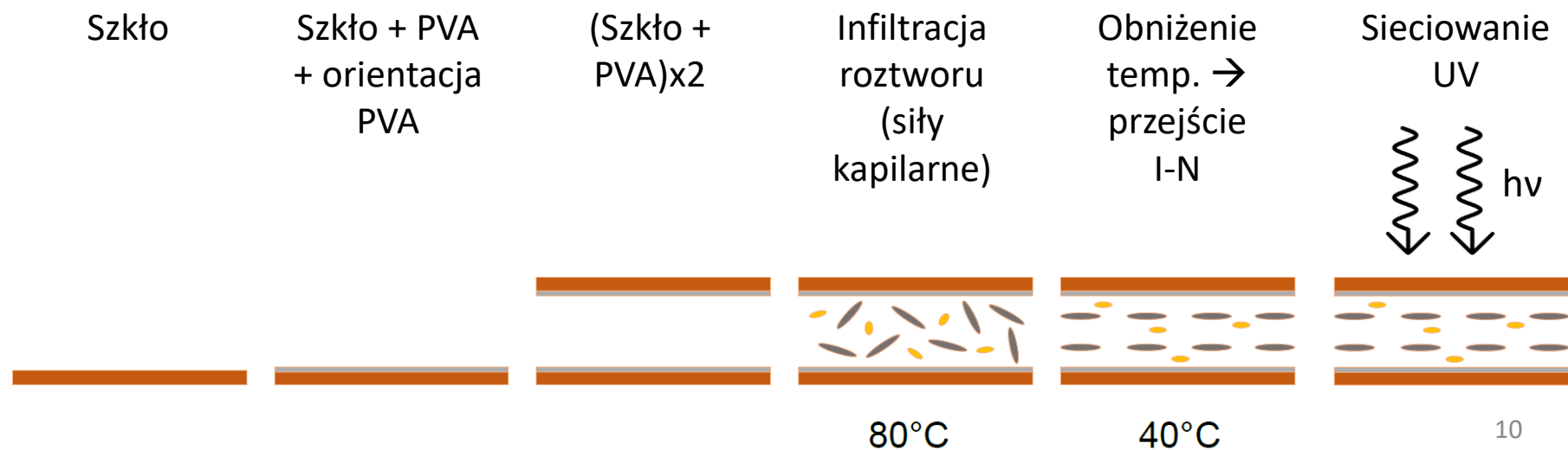
Zastosowania LCE – kilka przykładów

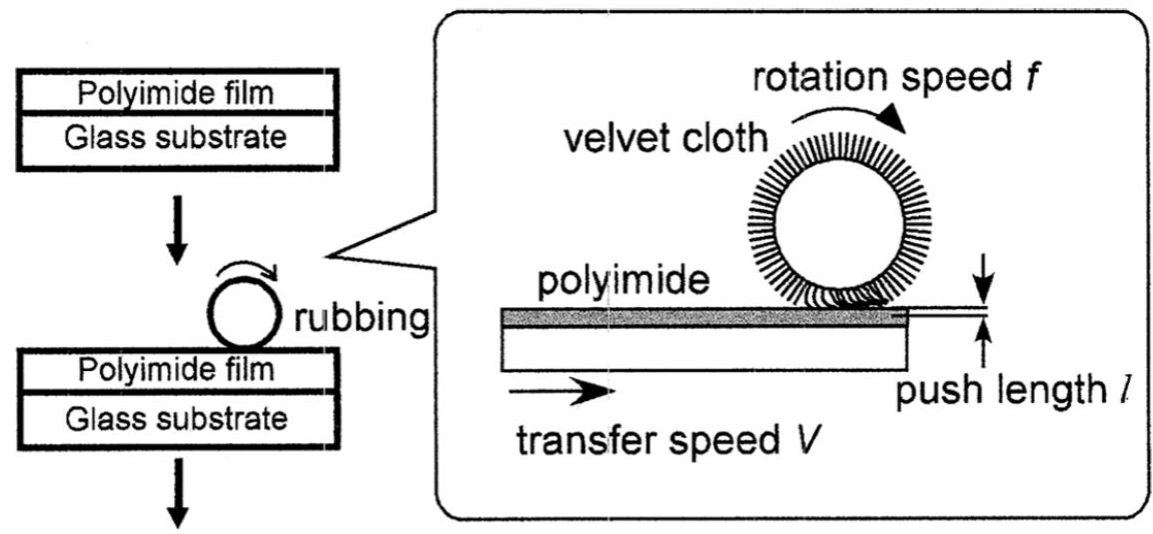
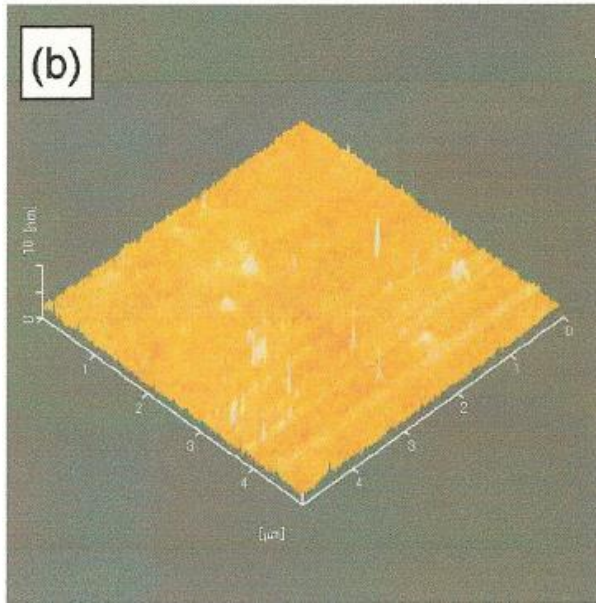
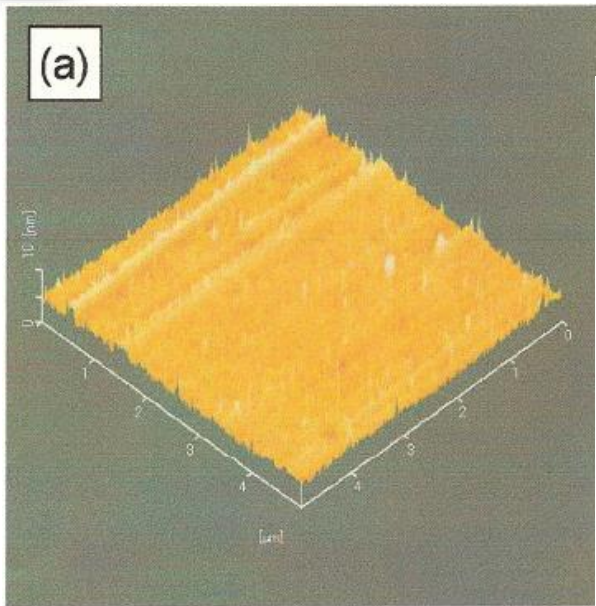


O. Wani et al., *Adv. Optical Mater.* 2017, 1700949

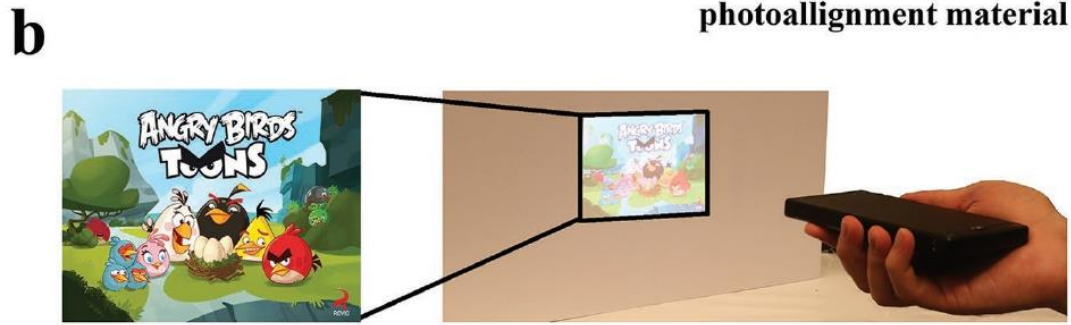
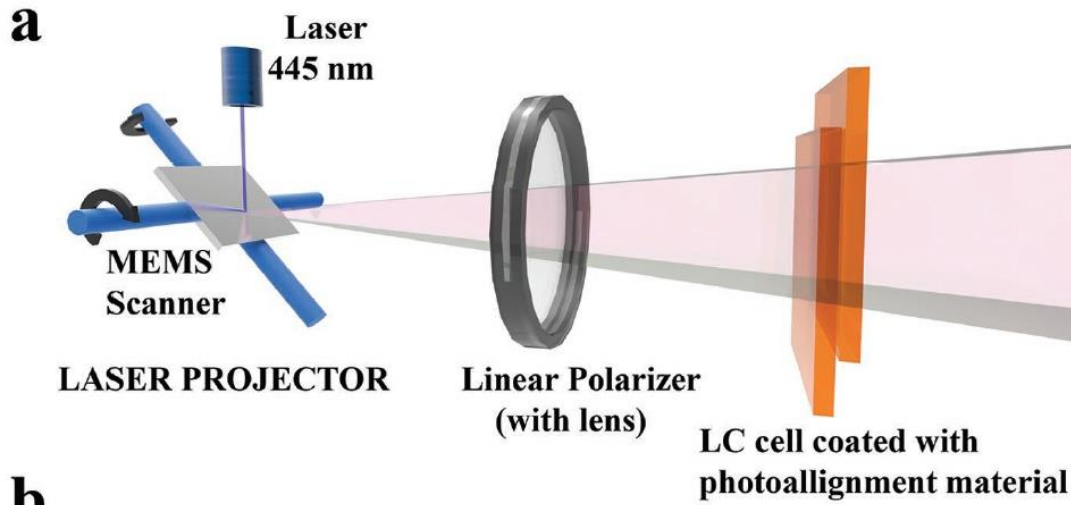


A – monomer, B – czynnik sieciujący (crosslinker), C – fotoinicjator, D – barwnik (disperse red)

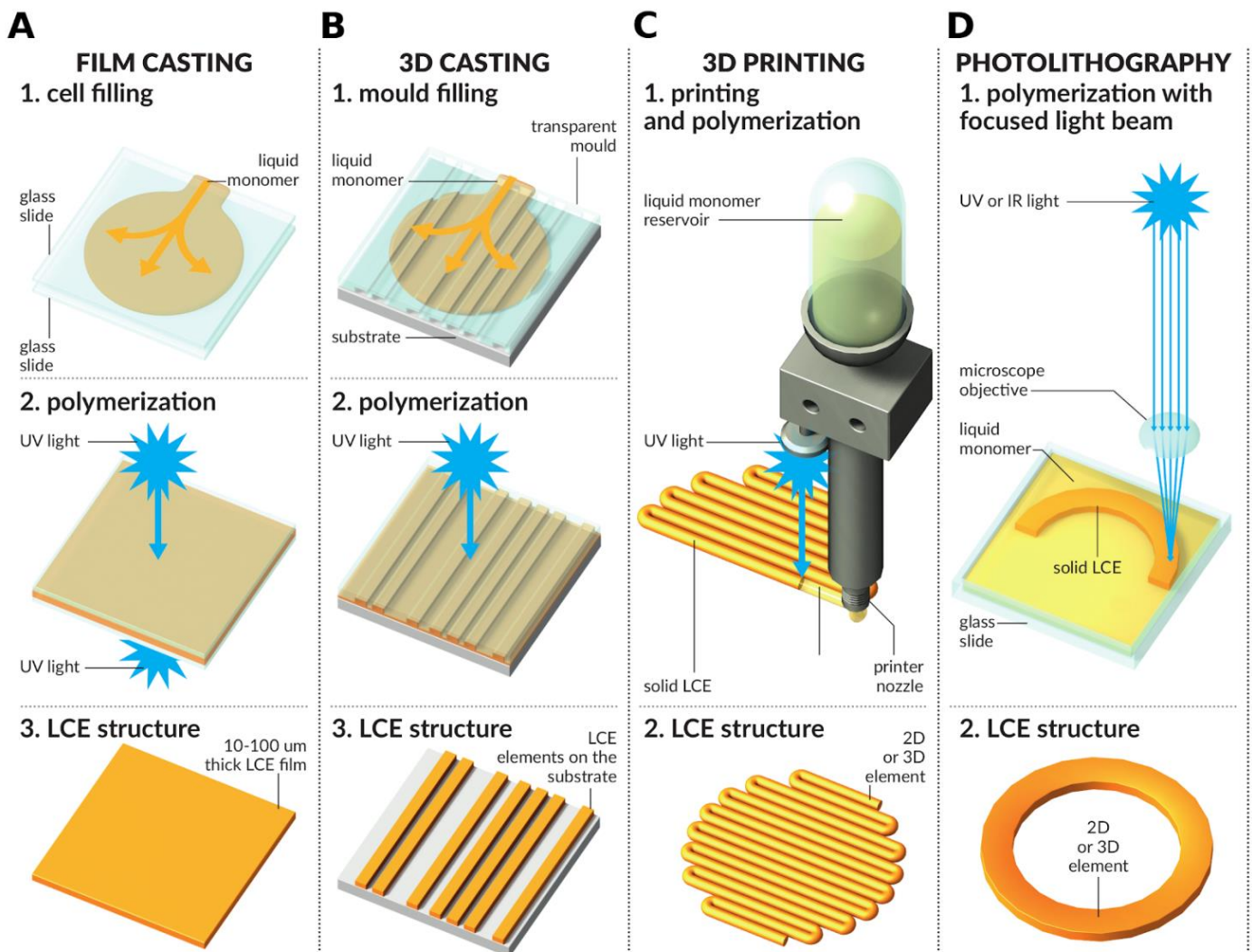




M. Yamahara et al. *Relationship between Molecular Orientation of Rubbed Polyimide Alignment Layer and That of Liquid-Crystalline Polymer Film Coated on the Alignment Layer*
 Mol. Cryst. Liq. Cryst. 466(1):39-52 · May 2007



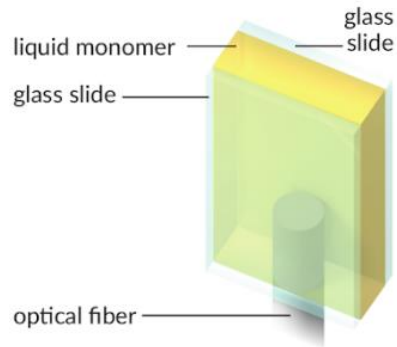
O. Wani et al., *Adv. Optical Mater.* 2017, 1700949



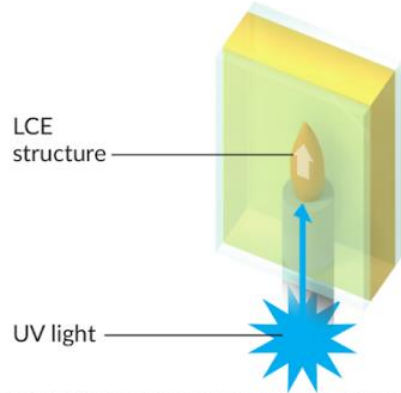
| | | | | |
|--|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| structure size | $\mu\text{m}-\text{cm}$ | $\mu\text{m}-\text{mm}$ | $\text{mm}-\text{cm}$ | $\mu\text{m}-\text{mm}$ |
| resolution | 10 μm | μm | 100 μm | μm |
| complex/patterned director orientation | ++ | + | +++ | ++ |
| method complexity | simple | average | average | complex |

GROWING ON FIBER

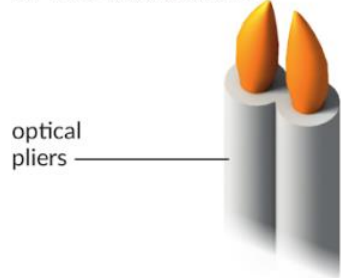
1. cell with fiber



2. polymerization (growth)

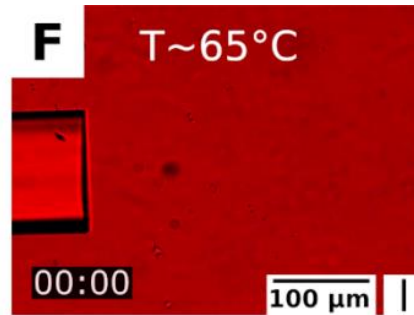


3. LCE structure

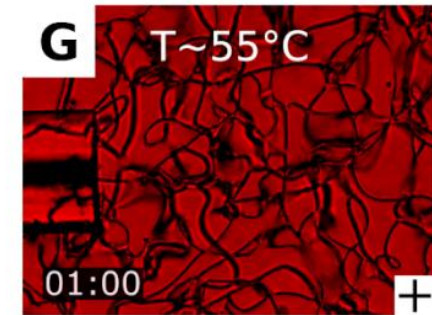


Wzrost LCE na włóknie optycznym

LC w stanie izotropowym



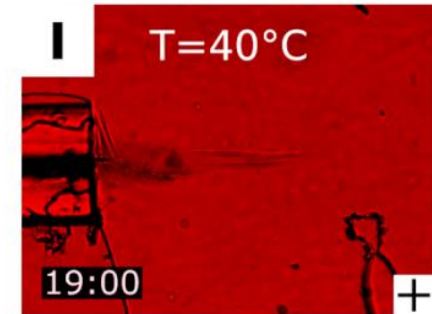
LC w fazie skręconego nematyka



LC w fazie skręconego nematyka



Sieciowanie światłem UV

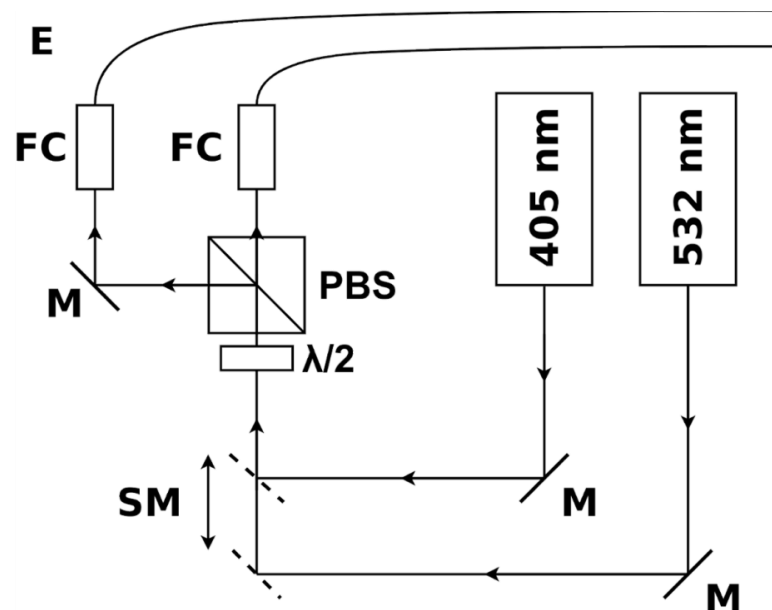


Gotowa struktura

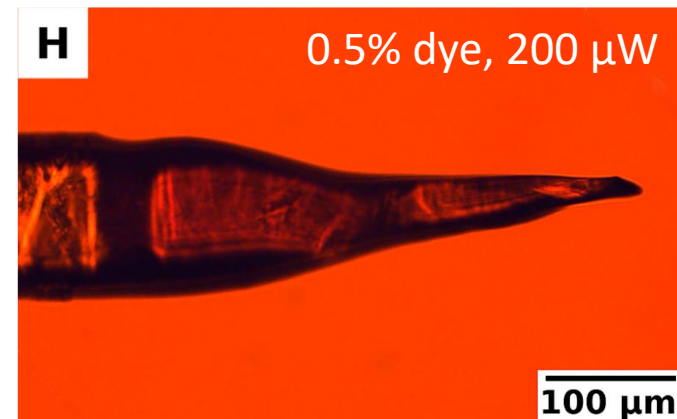
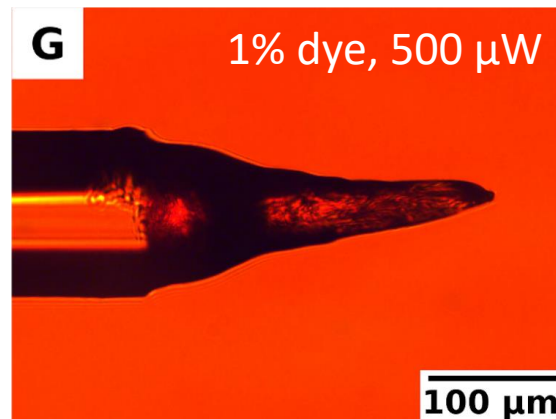
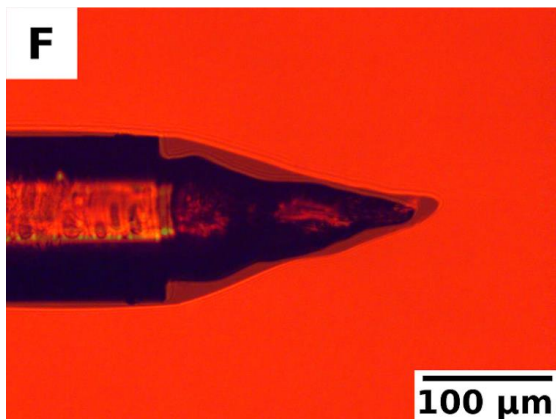


Układ optyczny do polimeryzacji i wzbudzenia elementów LCE

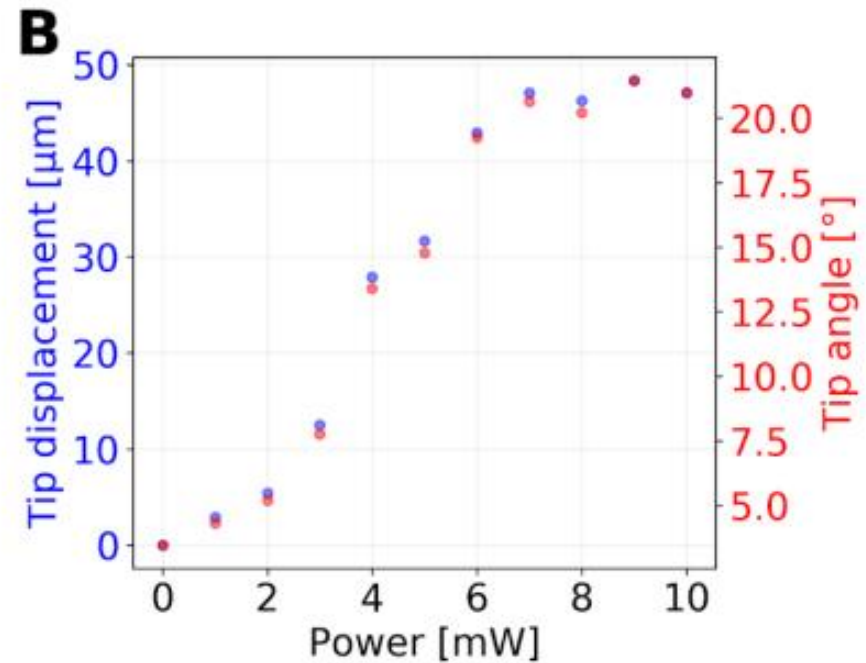
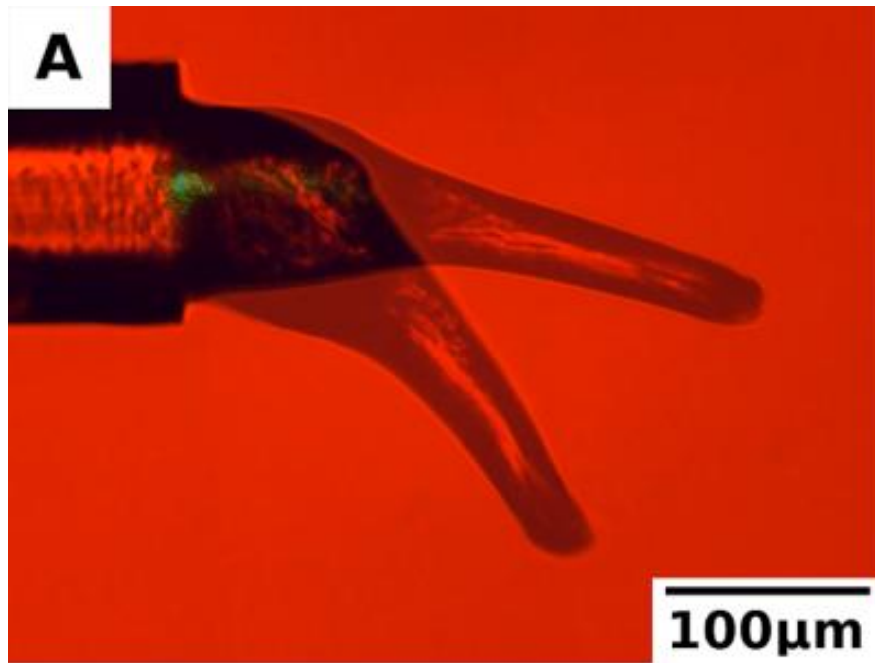
- FC – kolimator (obiektyw 3x)
- M – lustro
- PBS – rozdzielacz wiązki
- SM – lustro mobilne`

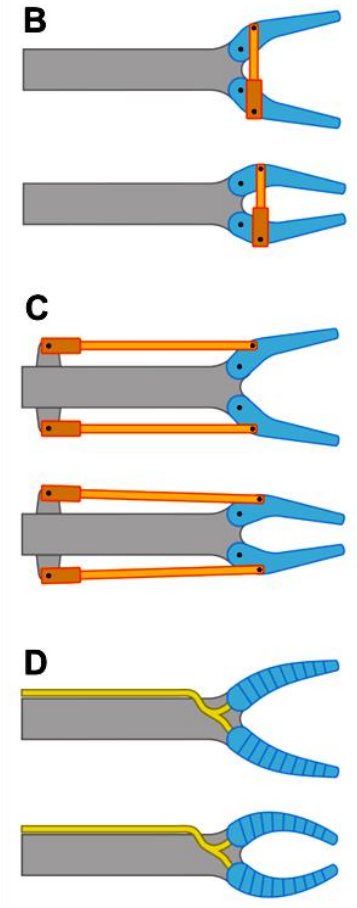
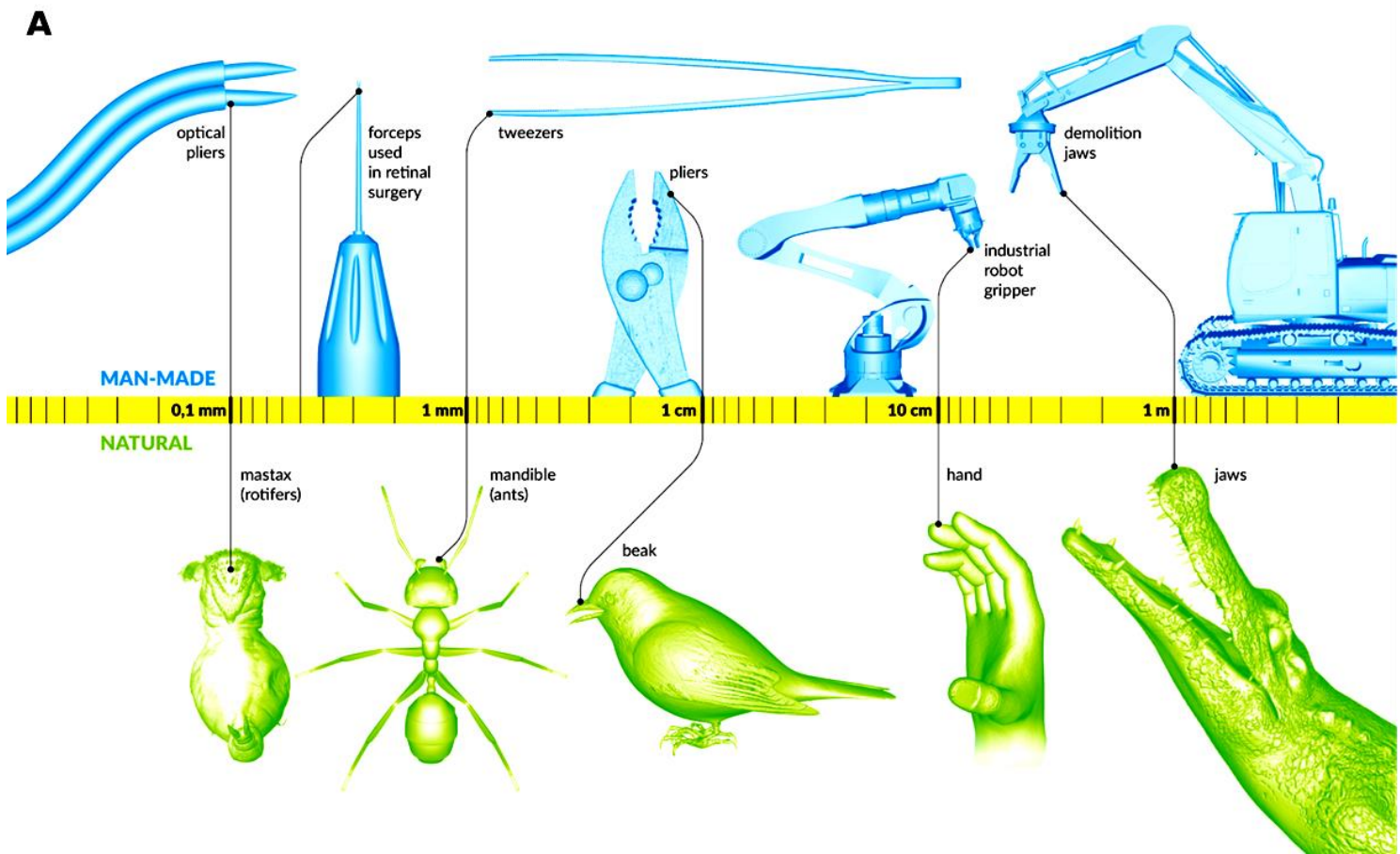


Wpływ warunków fotopolimeryzacji na kształt elementów LCE



- Oświetlenie zielonym laserem przez światłowód → absorpcja światła w barwniku → ogrzanie materiału → ruch elementu
- Przemieszczeniem końcówki można sterować dobierając moc lasera



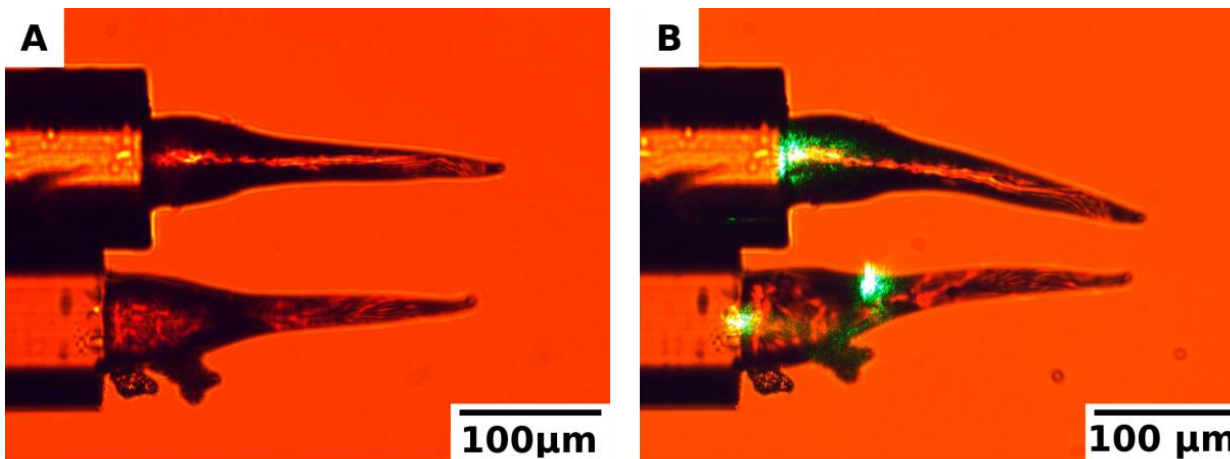


B – silniki zainstalowane tuż przy szczękach

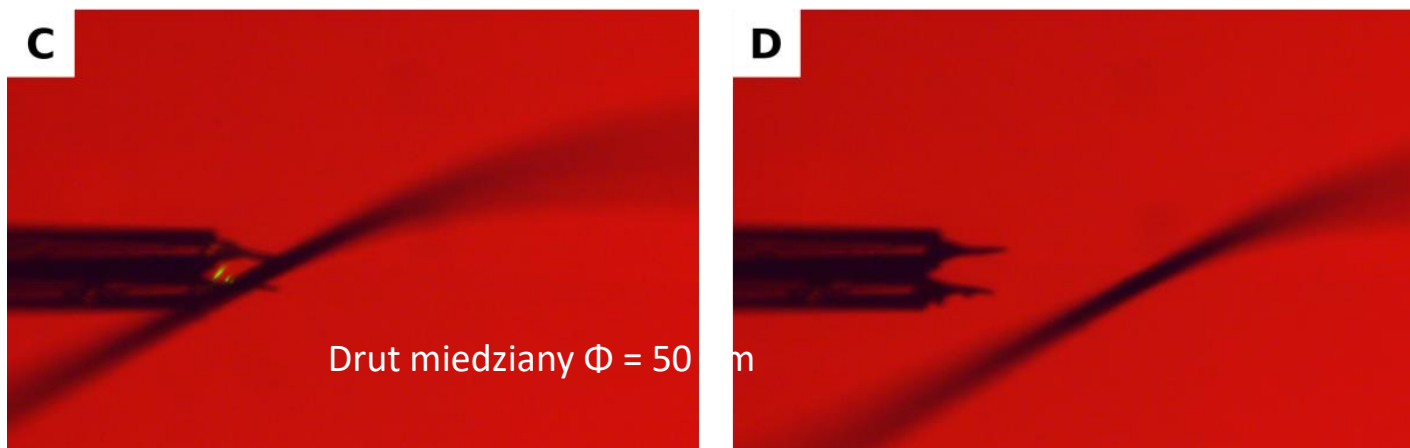
C – silniki zainstalowane zdalnie i połączone ze szczękami cięgnami

D – deformowalne szczęki

2x światłowód z LCE na końcu, spojone klejem UV → **szczypce optyczne**



Czy tym da się coś chwycić?



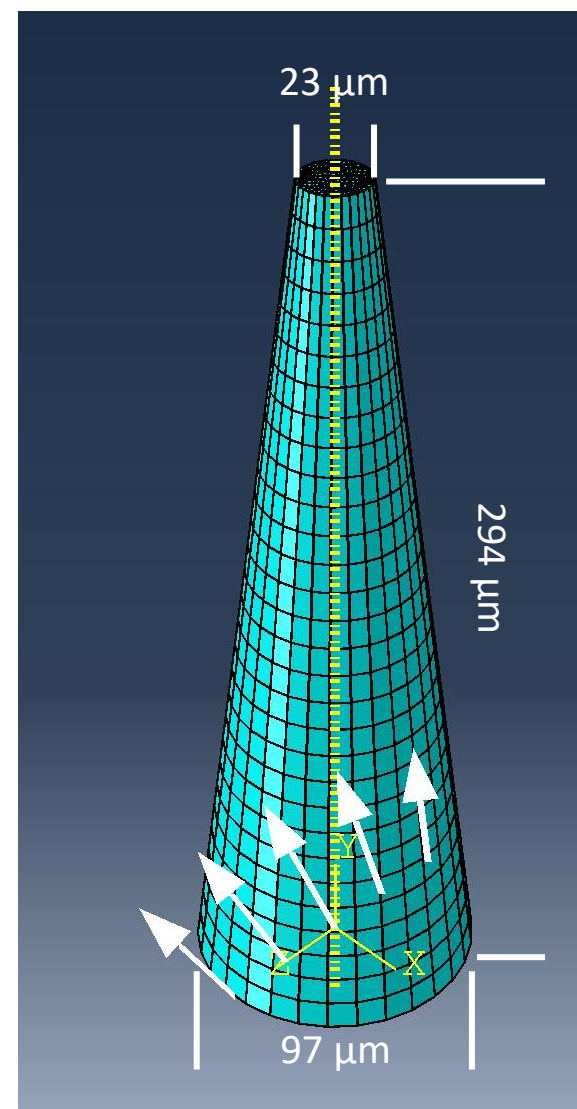
- Przemieszczenie drutu: **500 μm**
- Szacowana siła: **10^{-7} N**

Niektóre parametry LCE pożyczony z HDPE...

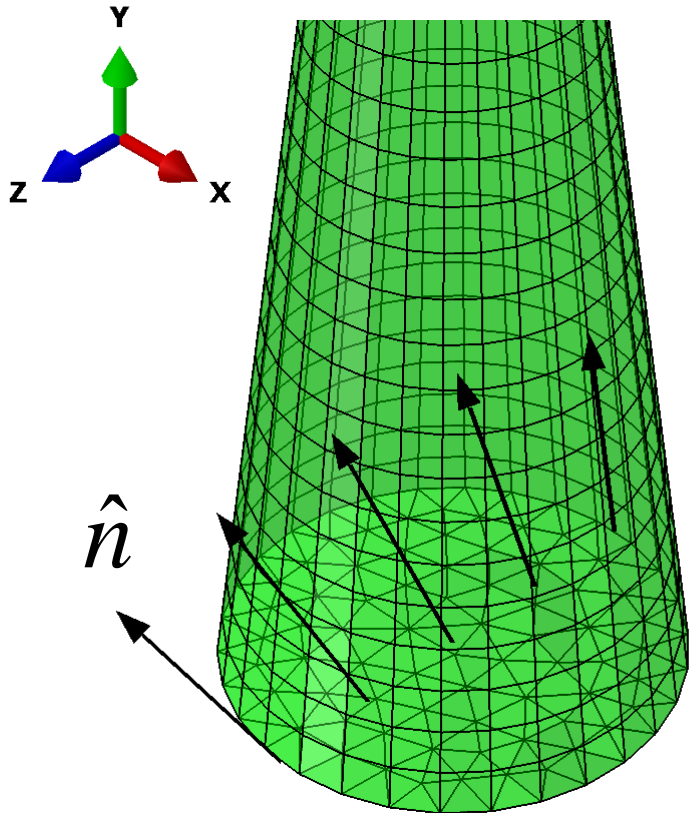
| | |
|--|--------|
| Przewodnictwo cieplne [W/m·K] | 0,49 |
| Gęstość [kg/m ³] | 960 |
| Moduł Younga [GPa] | 1,032 |
| Współczynnik Poissona | 0,4 |
| Liniowy współczynnik rozszerzalności α_1 | 0,0025 |
| Liniowy współczynnik rozszerzalności α_2 (wzdłuż direktora) | -0,005 |
| Ciepło właściwe [J/kg·K] | 1200 |
| Współczynnik konwekcji [W/m ² ·K] | 20 |
| Liczba elementów skończonych | 4860 |

Grzanie elementu **laserem**

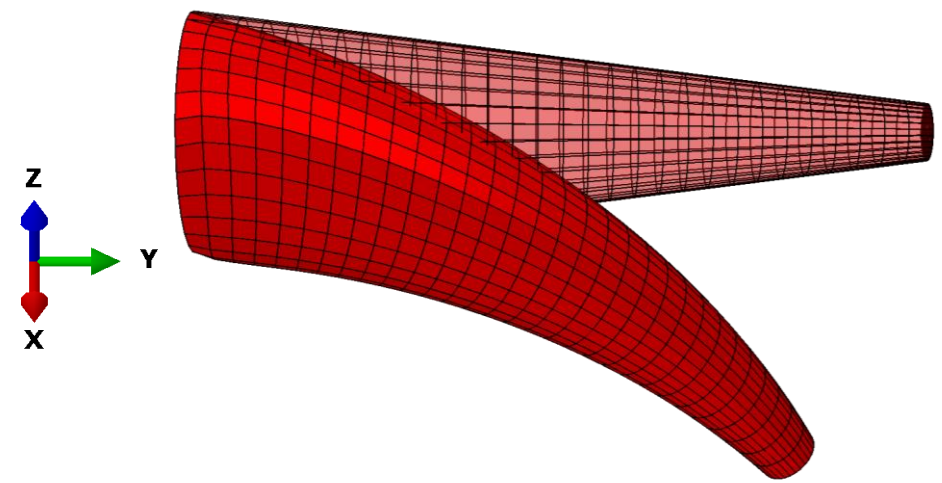
Chłodzenie poprzez **konwekcję** i **promieniowanie**



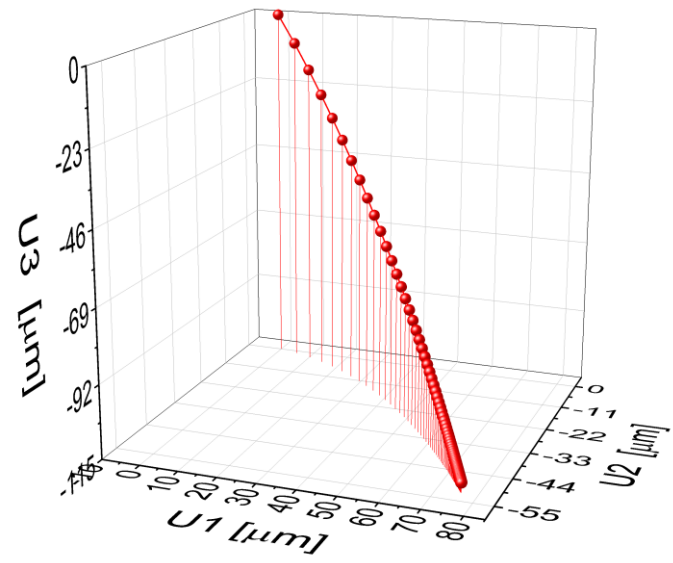
Orientacja direktora

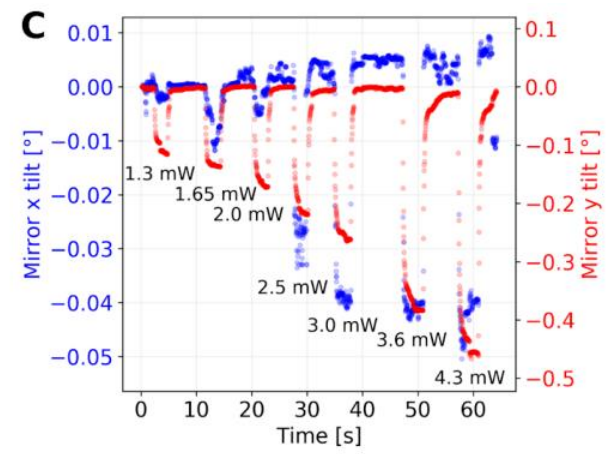
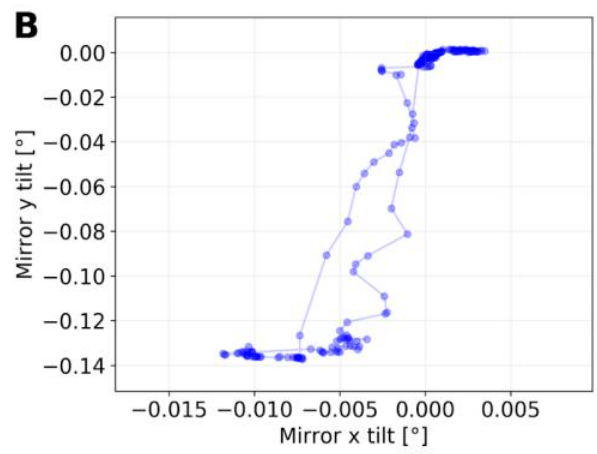
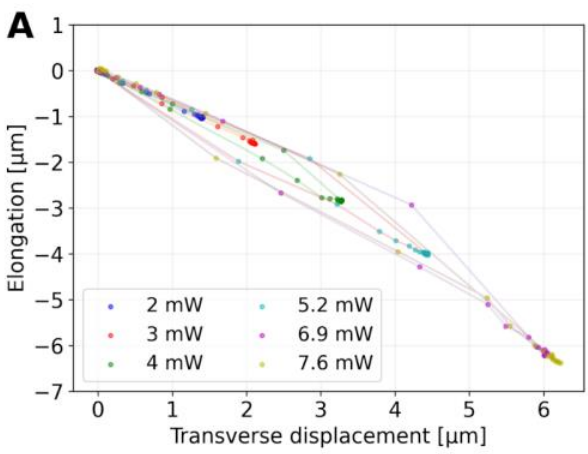
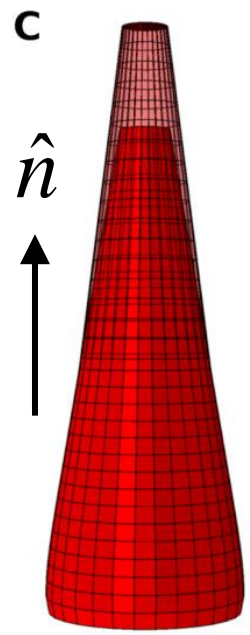
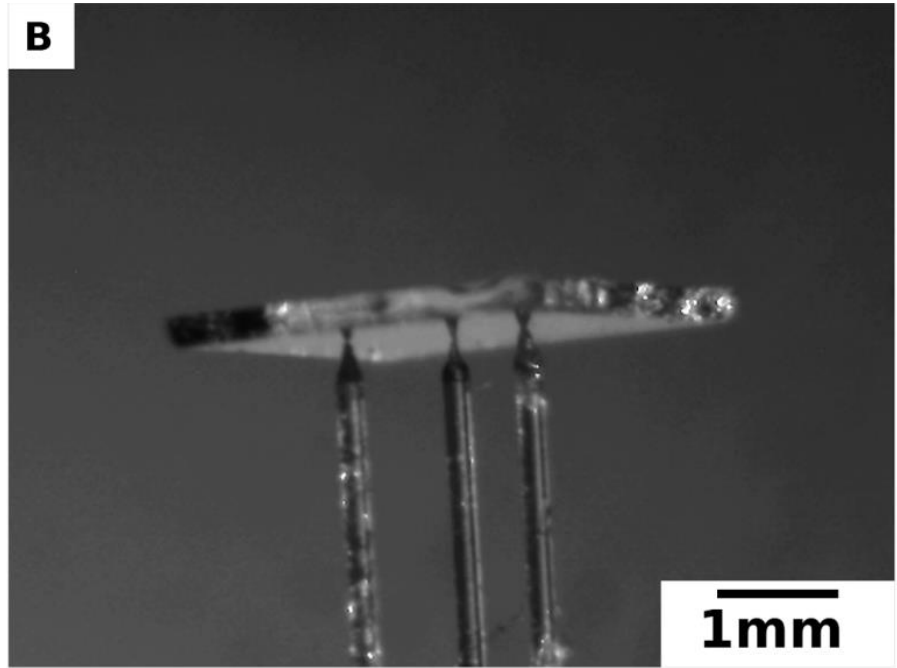
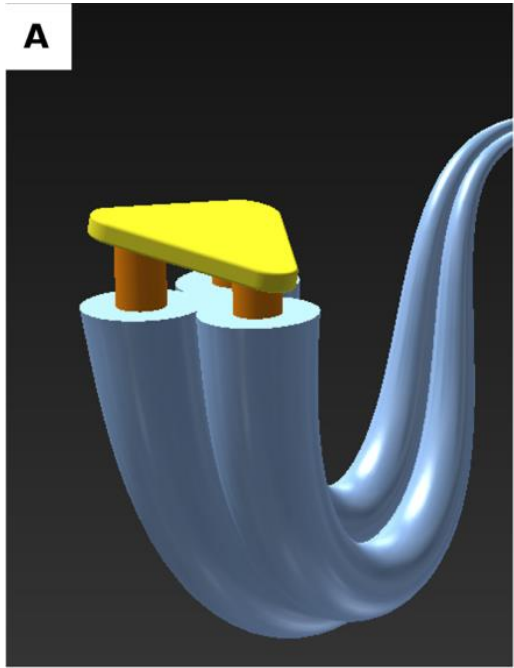


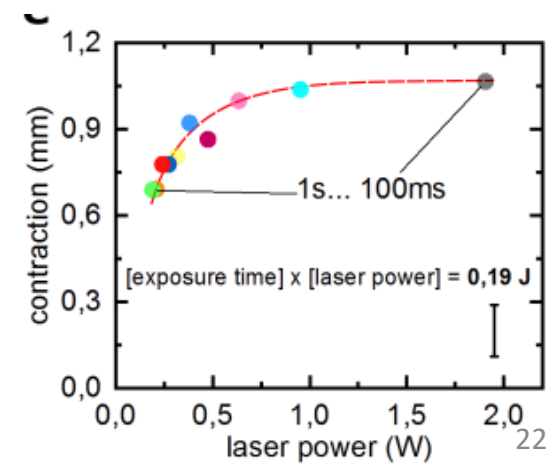
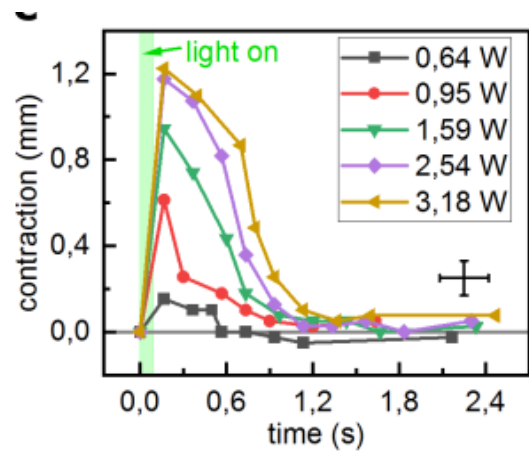
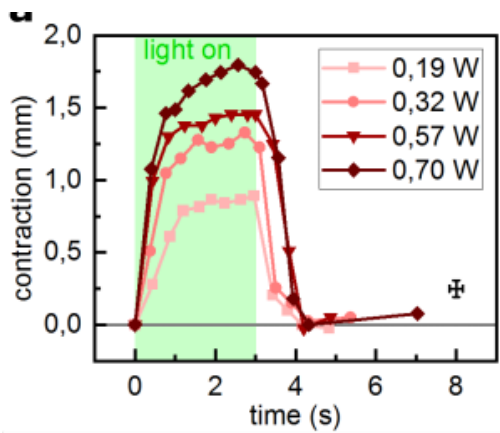
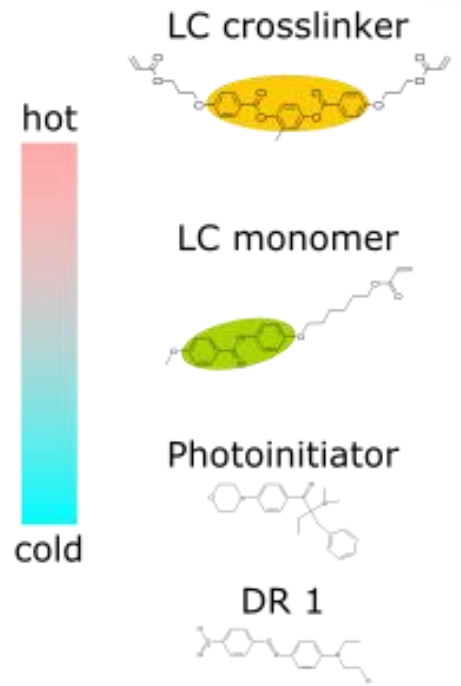
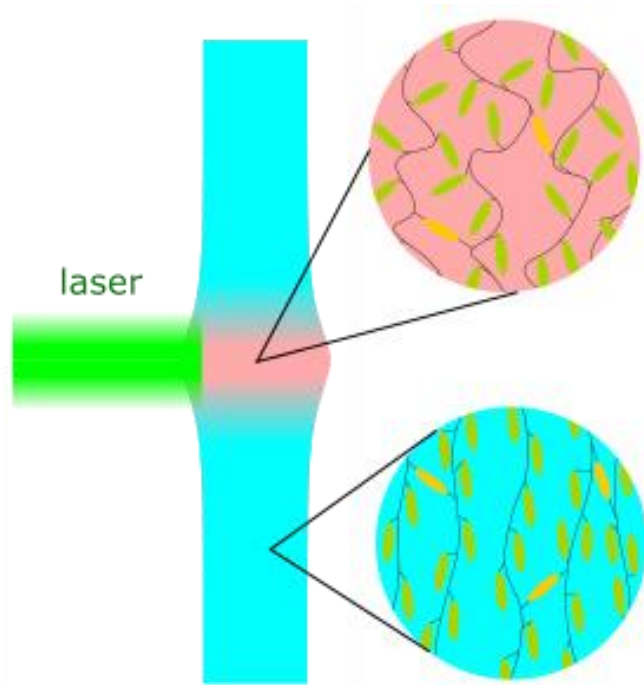
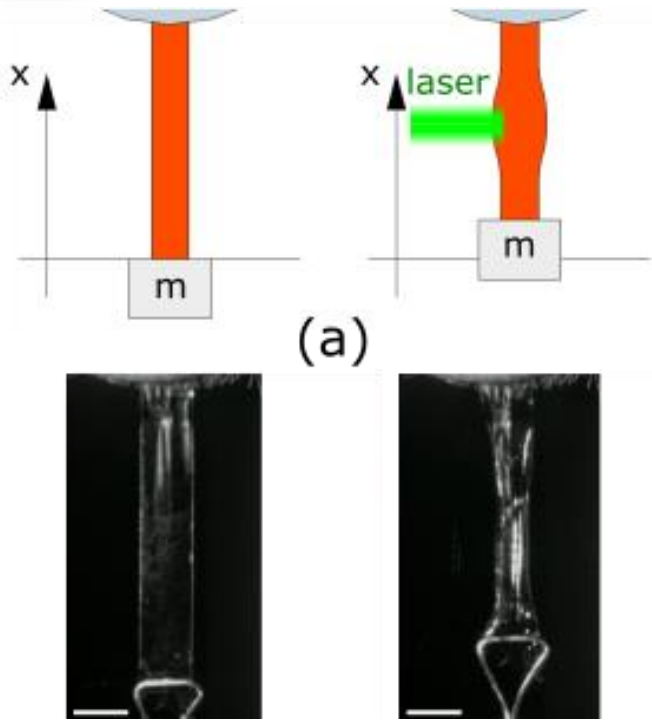
Ramię przed i po odkształceniu

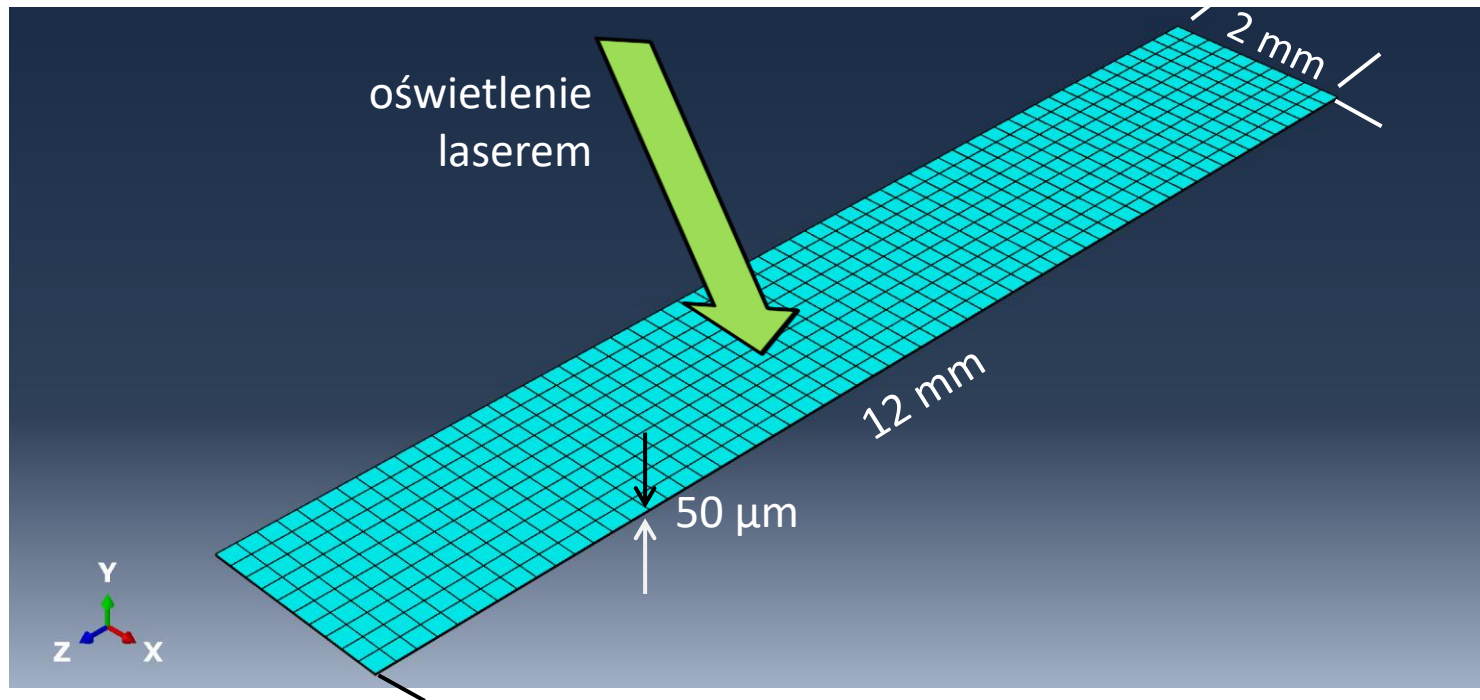


Trajektoria końcówki ramienia









Grzanie: źródło mocy cieplnej o profilu wiązki lasera

Oświetlenie laserem:

- Wiązka gaussowska, FWHM=2 mm
- Absorpcja wiązki zgodna z pr. Lamberta-Beera, 90% absorpcji na drodze 25 μm \rightarrow
- Gęstość mocy cieplnej w pasku:

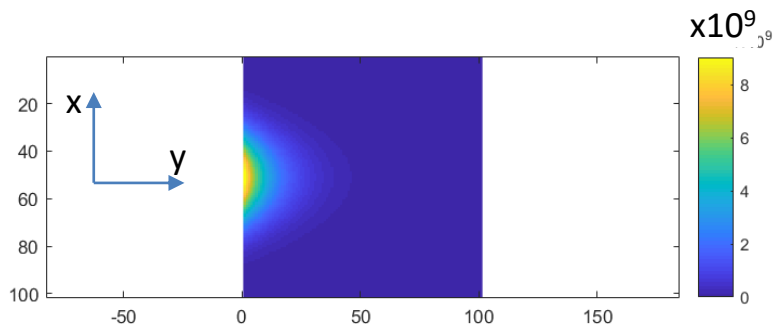
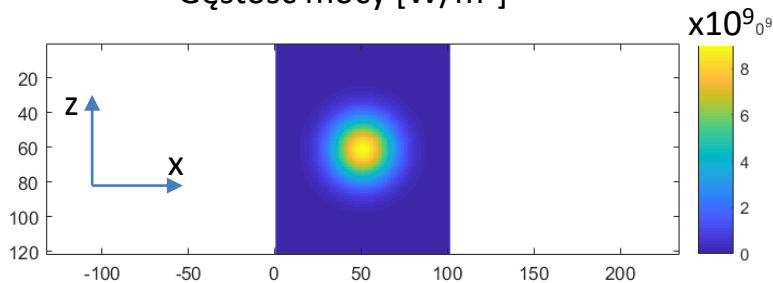
$$T(y) = T_o \exp(-ay), \quad a = 92103 \text{m}^{-1}$$

$$\rho(x, y, z) = \frac{P_{laser} \cdot a}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + (z - z_o)^2}{2\sigma^2} - ay\right)$$

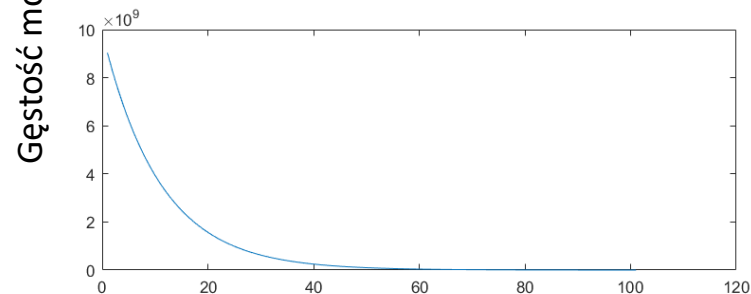
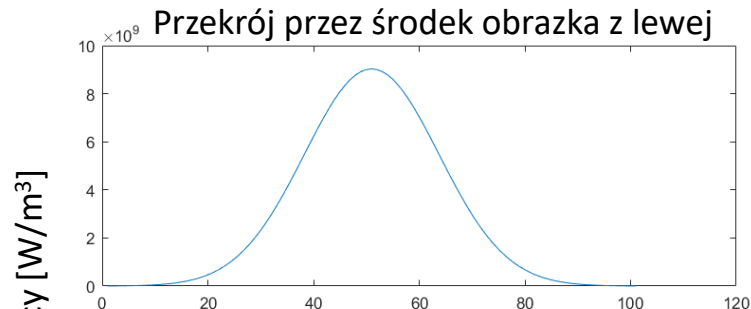
$$\sigma = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}} = 1.27 \text{mm}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_0^{+\infty} dy \int_{-\infty}^{+\infty} dz \rho(x, y, z) = P_{laser}$$

Gęstość mocy [W/m³]

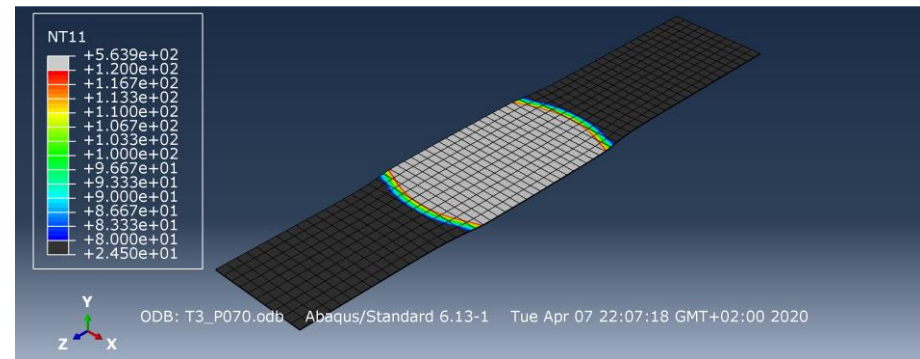
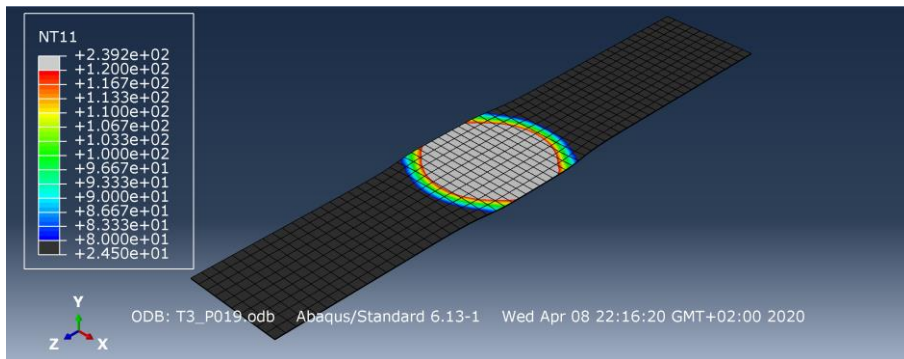
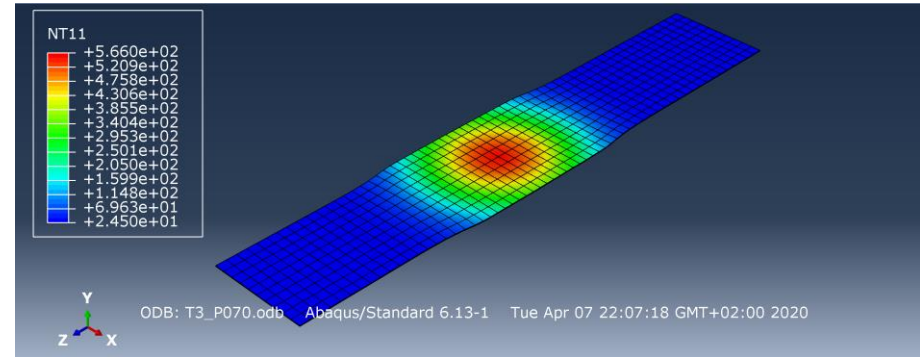
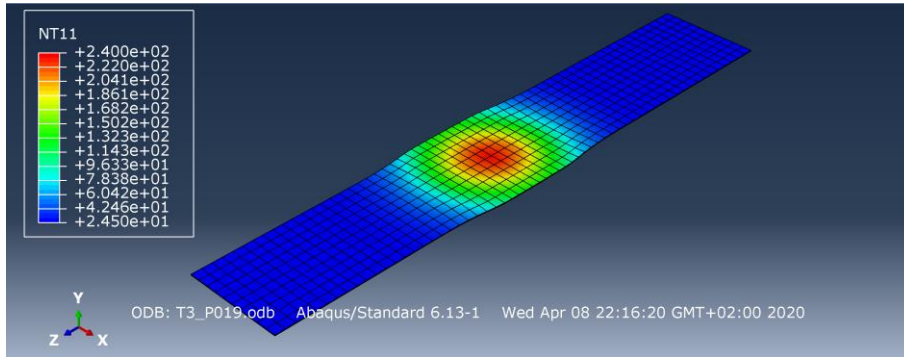


Przekrój przez środek obrazka z lewej

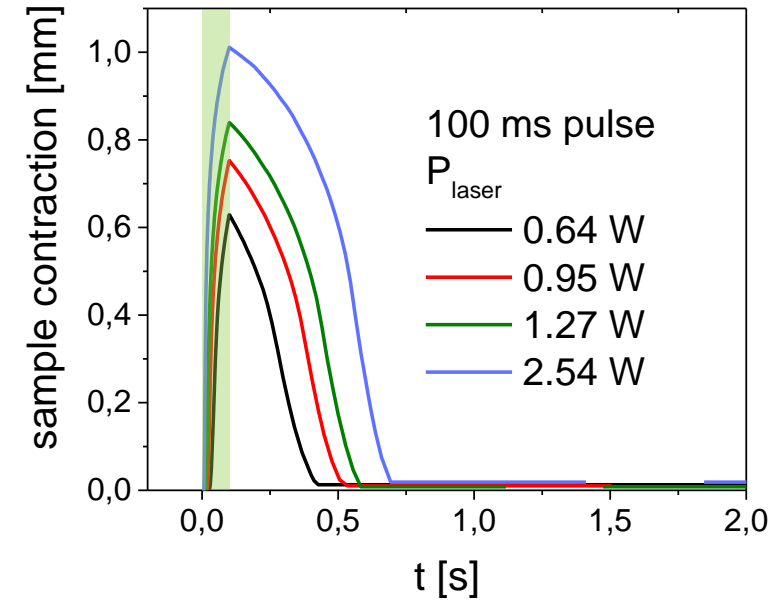
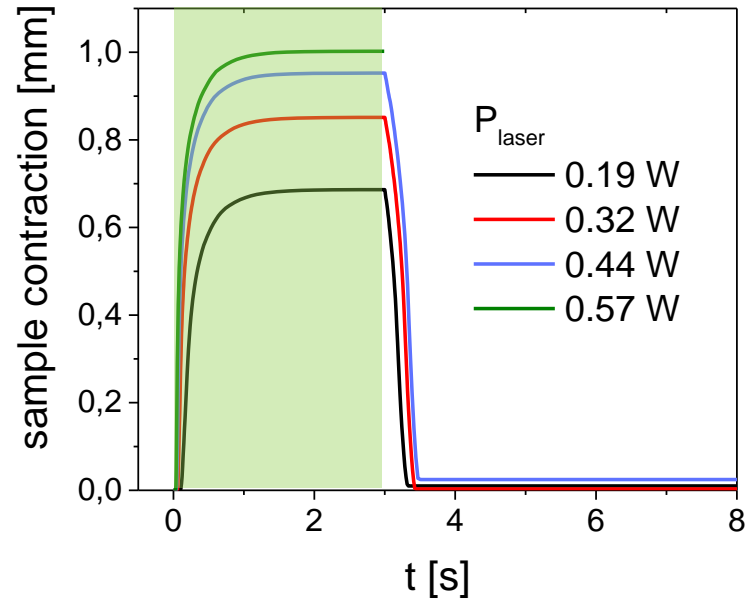


P = 0.19 W

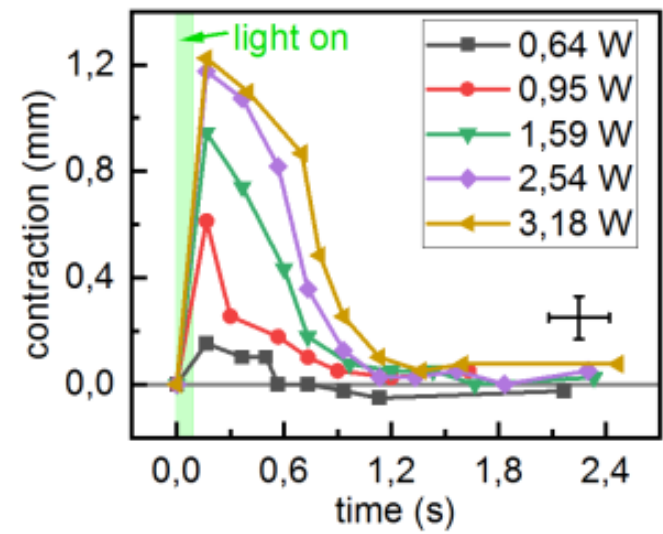
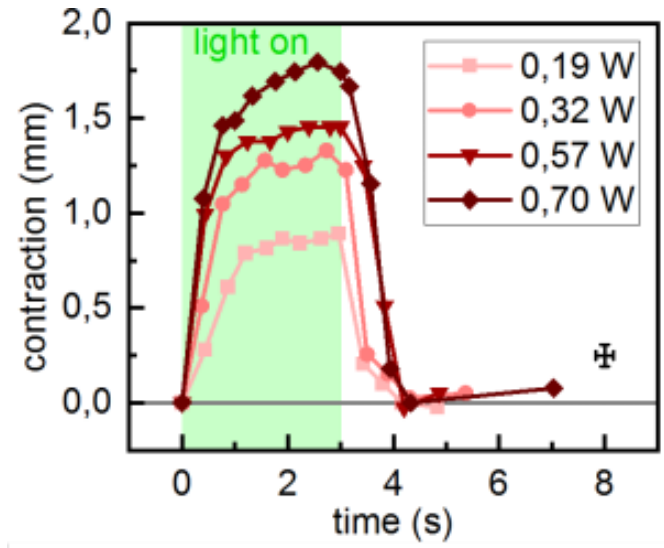
P = 0.70 W

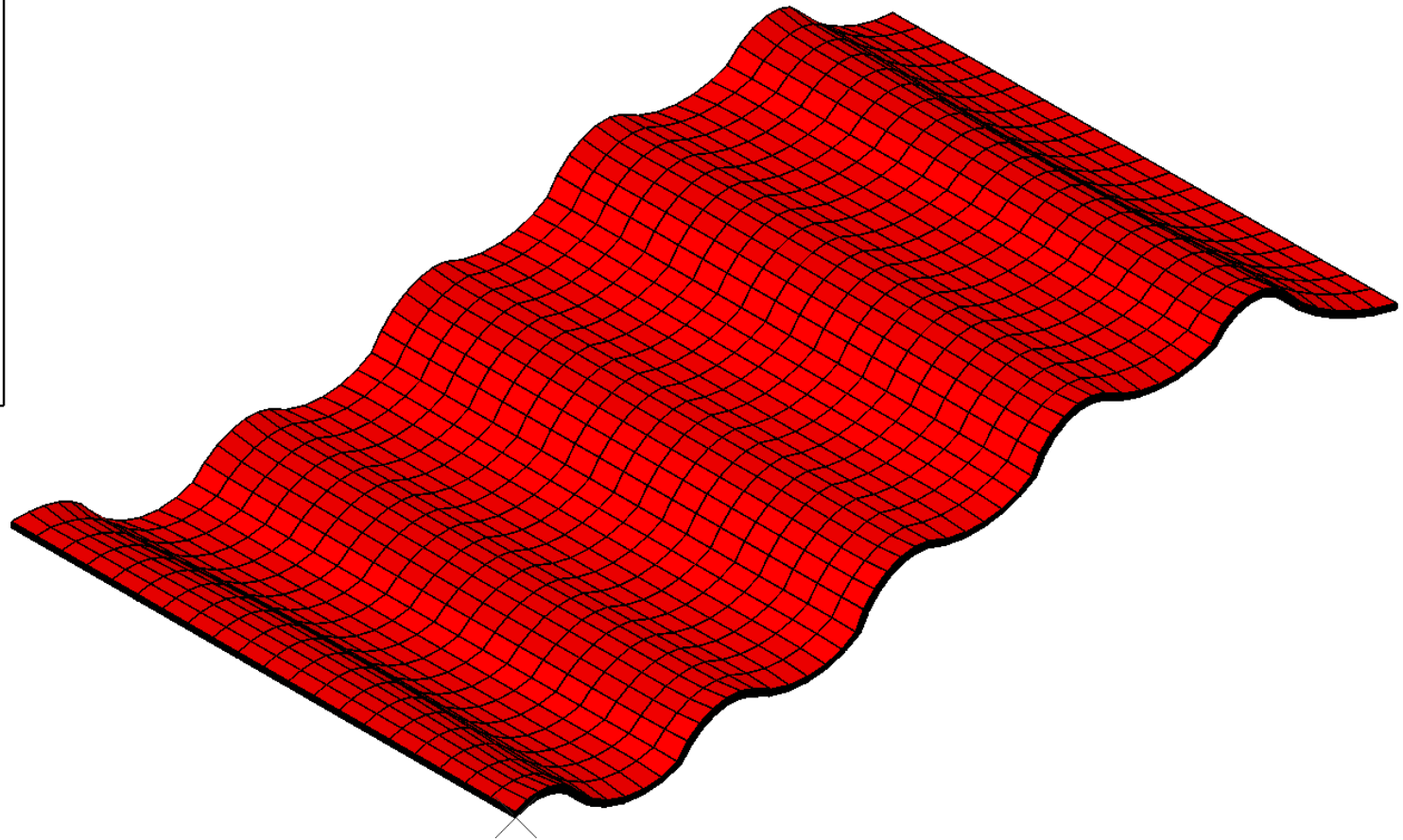
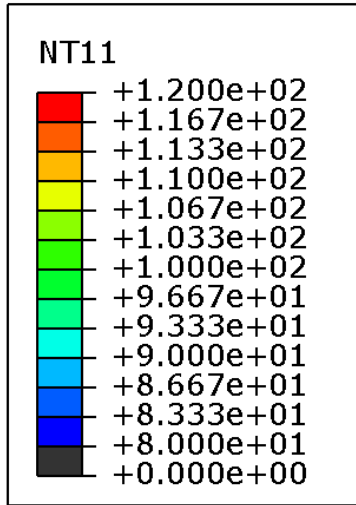
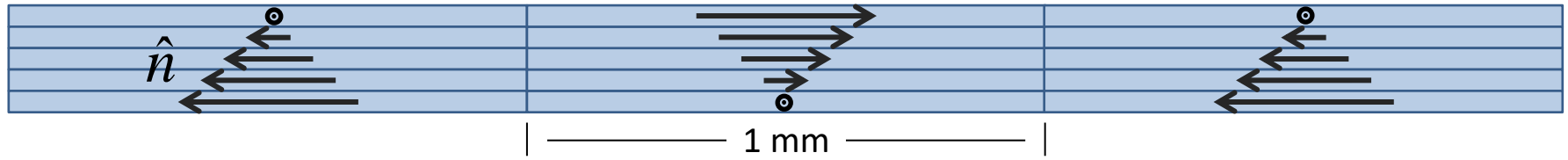


symulacje



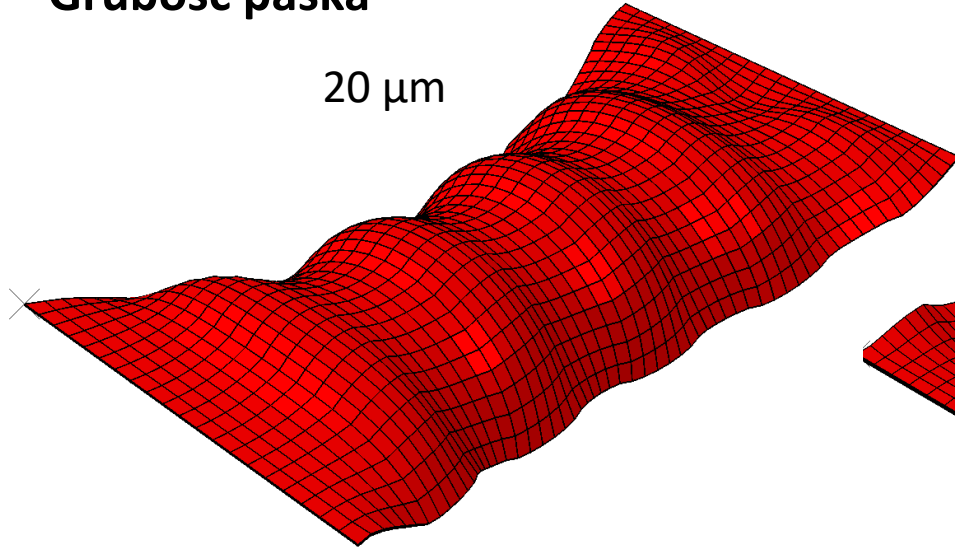
eksperyment



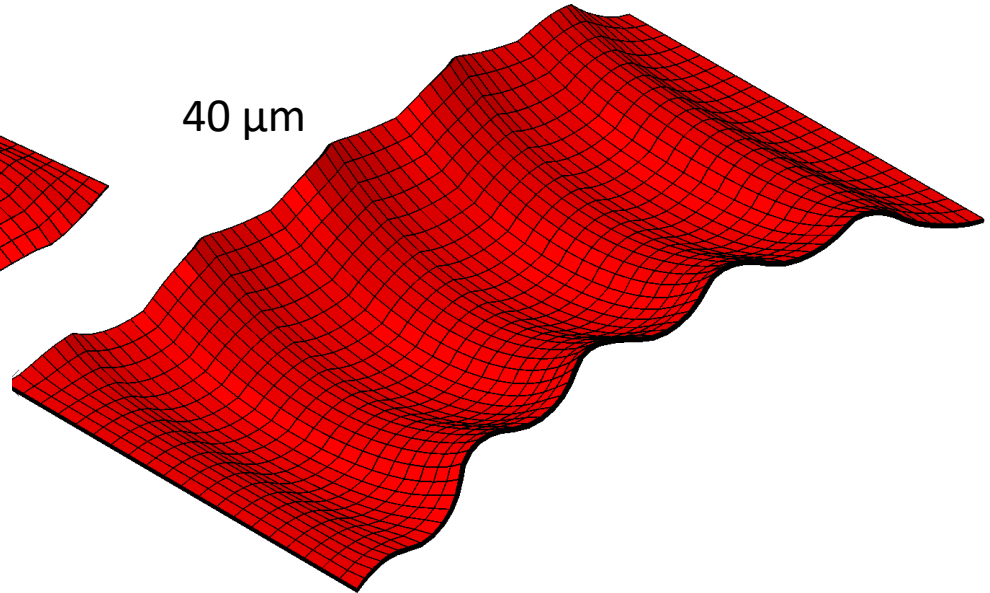


Grubość paska

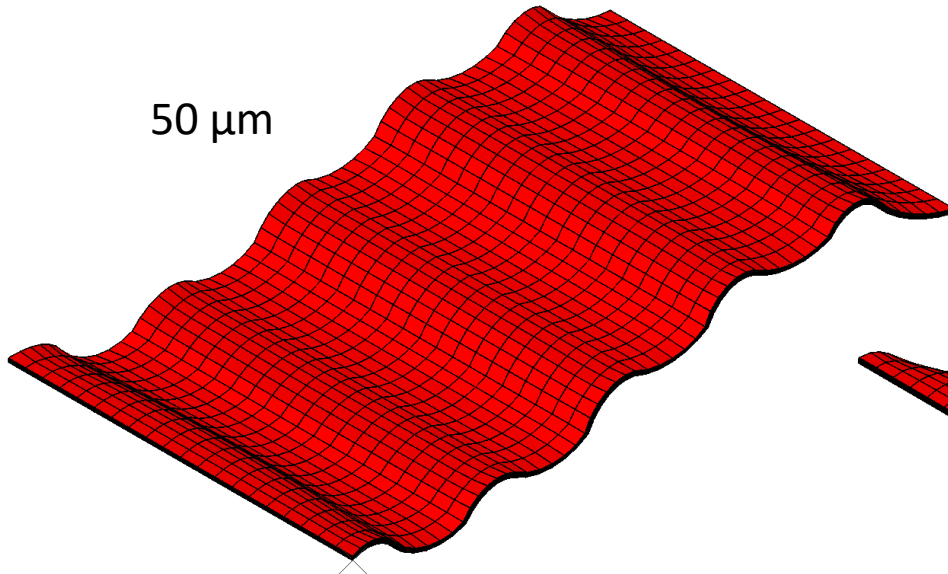
20 μm



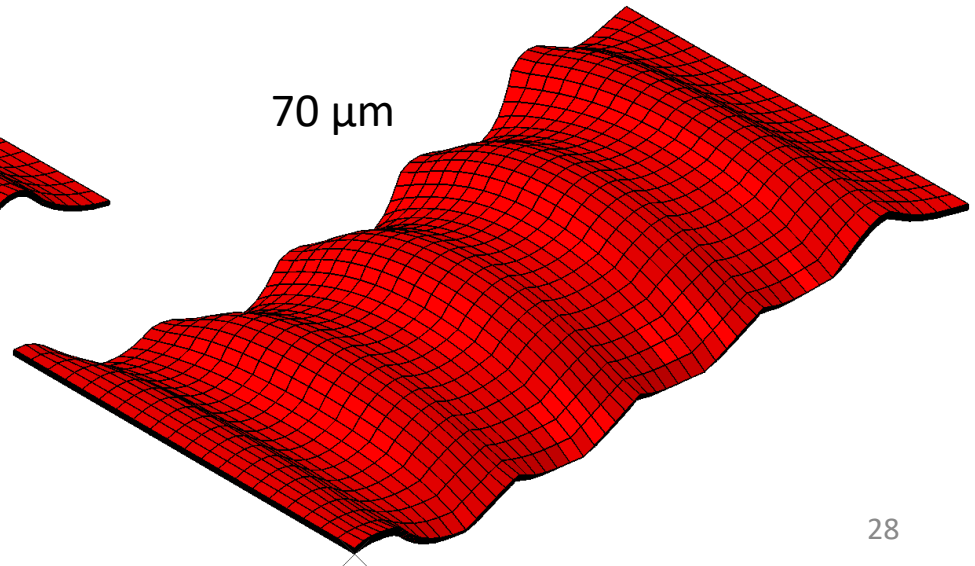
40 μm

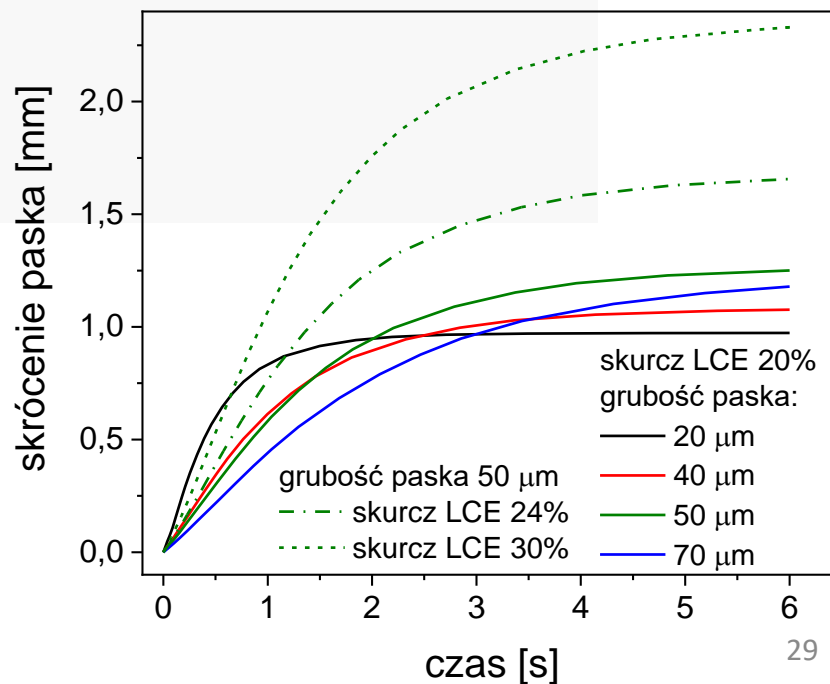
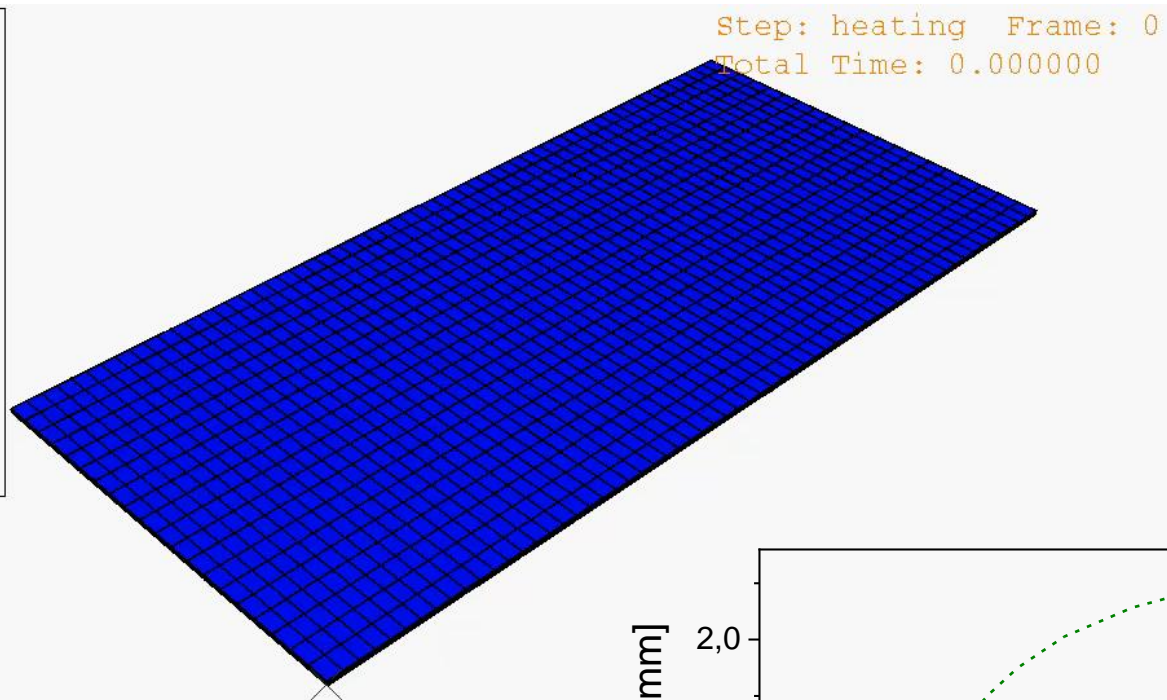
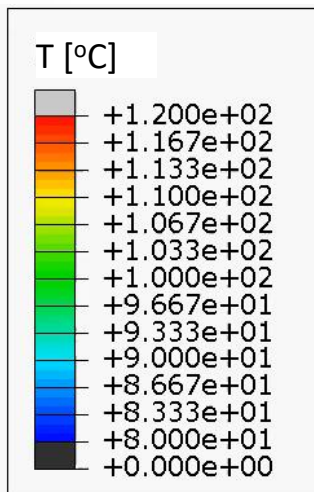


50 μm



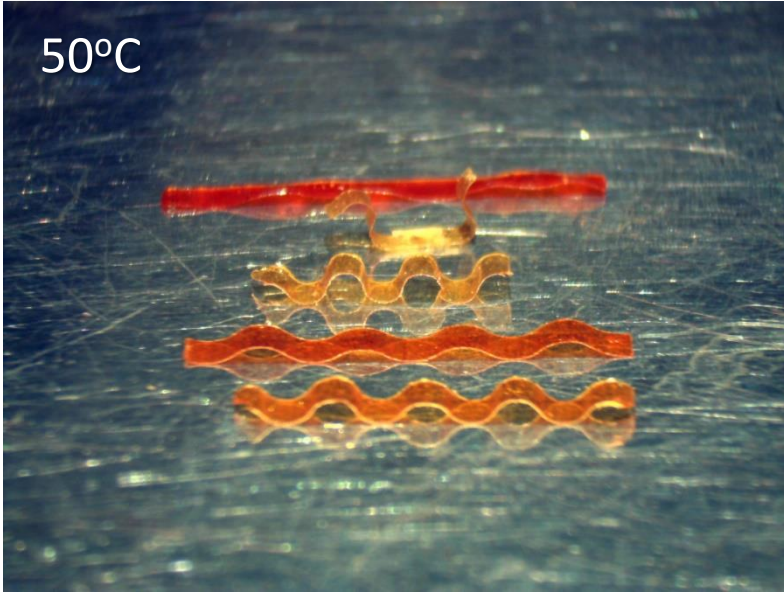
70 μm



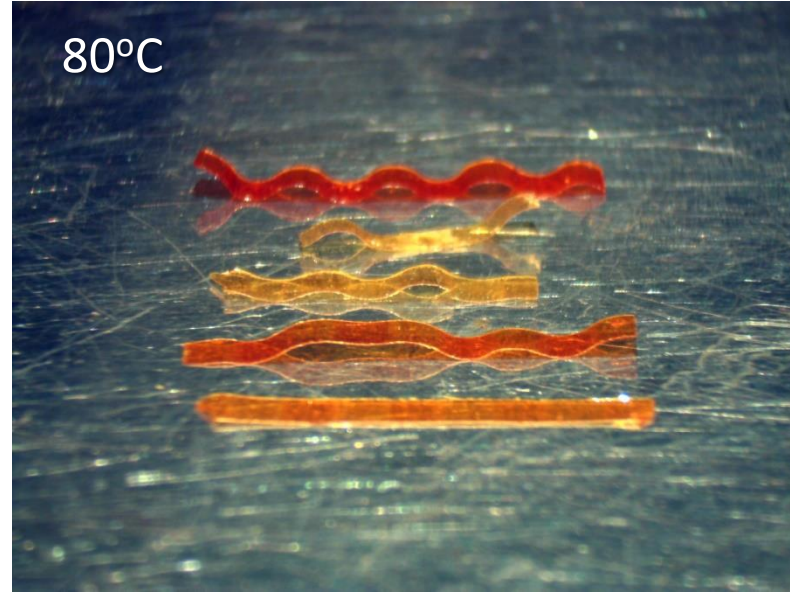


Akordeon – eksperyment

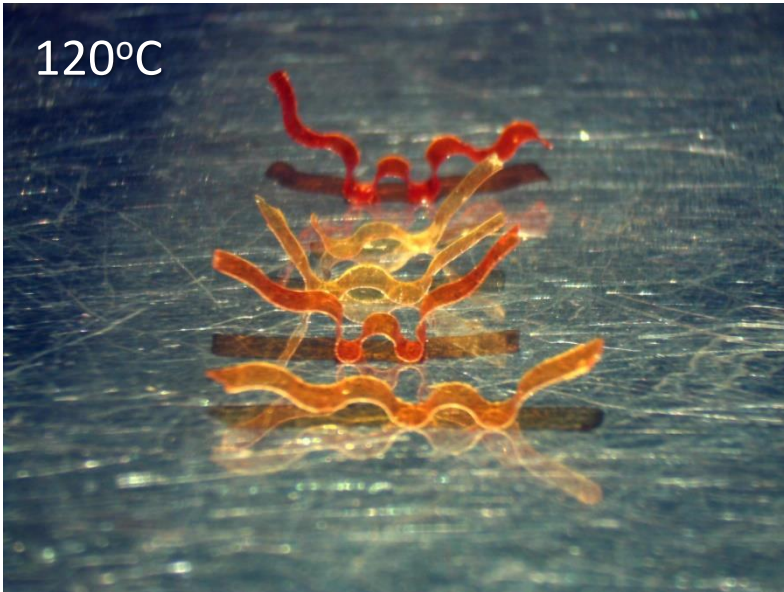
50°C



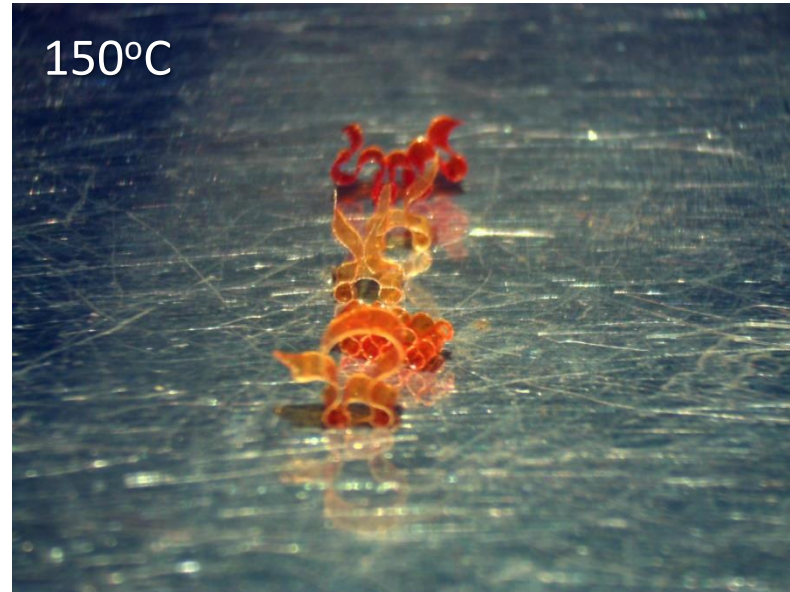
80°C



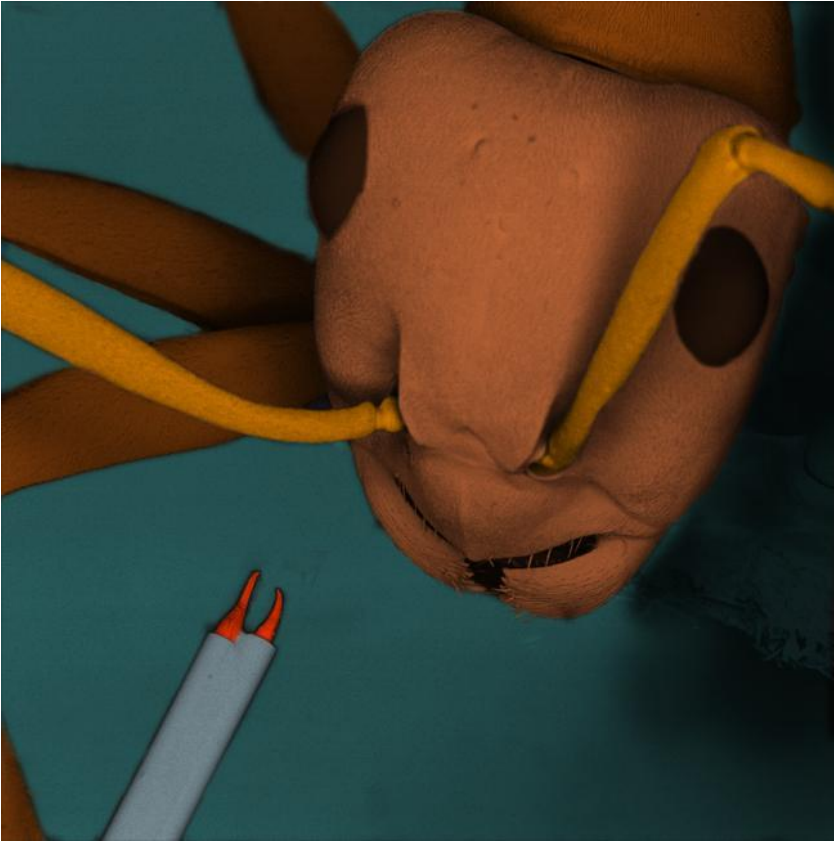
120°C



150°C



- LCE świetnie nadają się do konstrukcji miękkich robotów i ich elementów
- Elementy mogą być aktywowane zmianą temperatury i światłem
- Jak uzyskać bardziej skomplikowane rozkłady директора?
 - orientacja światłem spolaryzowanym
 - orientacja polem elektrycznym
 - orientacja polem magnetycznym (?)
- Połączenie nanolitografii z orientacją polem elektrycznym – „materiał 5D”
- Symulacje MES będą miały rosnące znaczenie w projektowaniu elementów i przewidywaniu ich odkształceń



- Michał Zmyślony
- Klaudia Dradrach
- Paweł Nałęcz-Jawecki
- Mikołaj Rogóż
- Piotr Wasylczyk



- M. Zmyślony, K. Dradrach, J. Haberko, P. Nałęcz-Jawecki, M. Rogóż, P. Wasylczyk, *Optical Pliers - Micrometer Scale Light-Driven Tools Grown on Optical Fibers*, **Adv. Mater.** **2020**, **32**, 2002779
- P. Grabowski, K. Dradrach, J. Haberko, P. Wasylczyk, *Photo-mechanical response dynamics of liquid crystal elastomer linear actuators*, **Materials** **2020**, **13**, 2933; doi:10.3390/ma13132933

Dziękuję za uwagę