

НОВИЙ МЕТОД ОРІЄНТАЦІЇ НЕМАТИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ ПОВЕРХНЯМИ, НАНОСТРУКТУРОВАНИМИ ФЕМТОСЕКУНДНИМИ ЛАЗЕРНИМИ ІМПУЛЬСАМИ

Доповідач: І. Гвоздовський
ВОКЕ, Інститут фізики НАН України, м. Київ

Співавтори:

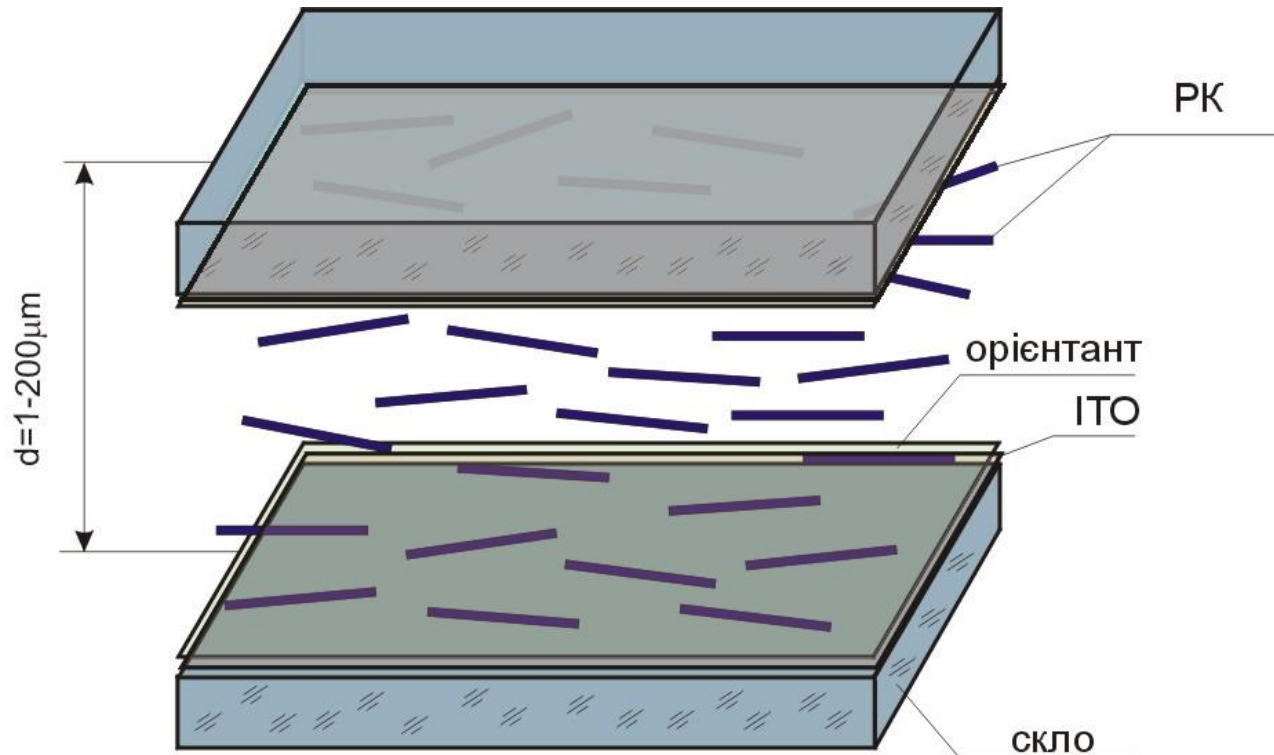
- **І. Павлов** - Університет Бількента, м. Анкара, Туреччина;
- **А. Рибак** - ВФП, Інститут фізики НАН України, м. Київ, Україна;
- **А. Добровольський** - ВГЕ, Інститут фізики НАН України, м. Київ, Україна;
- **В. Кадан** - ВФП, Інститут фізики НАН України, м. Київ, Україна;
- **І. Блонський** - ВФП, Інститут фізики НАН України, м. Київ, Україна;
- **З. Казанцева** - Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ, Україна.

ПЛАН

- **Вступ**
 - Загальні відомості про орієнтацію рідких кристалів.
 - Ідея застосування лазерного наноструктурування поверхонь для орієнтації нематичних рідких кристалів.
- **Експериментальна частина**
 - Лазерне наноструктурування поверхонь;
 - Оцінка енергії зчеплення структурованих поверхонь за теорією Берремана;
 - Азимутальна енергія зчеплення структурованих поверхонь;
 - Збільшення енергії зчеплення структурованих поверхонь.
- **Висновки**
- **Публікації**

Оптична рідкокристалічна комірка (Sandwich cell)

Для того, щоб рідкий кристал проявляв властивості кристала, потрібно його молекули зорієнтувати.



Актуальність дослідження орієнтації рідких кристалів, на прикладі журналу ***Liquid Crystals***: загальна кількість публікацій за 2018 рік - **228**. З них **32 (~ 14%)** - присвячено орієнтації рідких кристалів.

Методи орієнтації рідких кристалів

Контактний метод

1. Механічна натирка (1890);
2. Напилення (SiO_x) (1960).

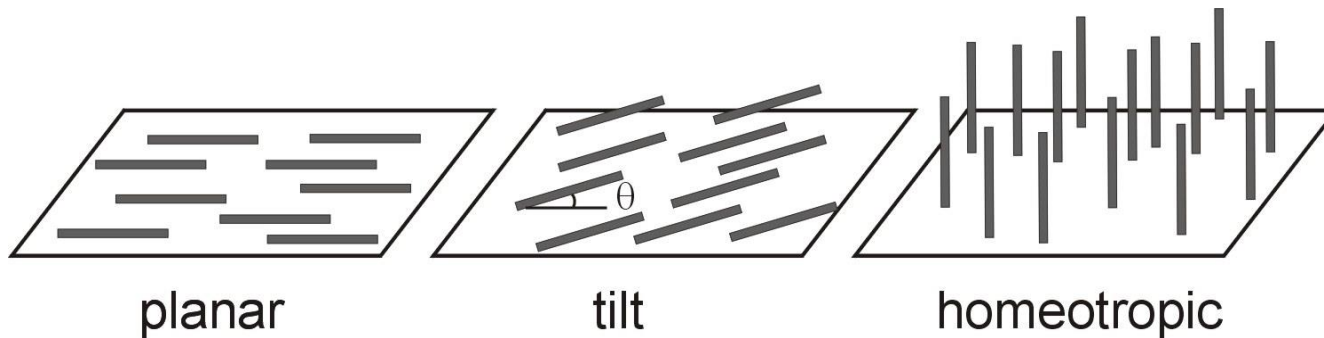
Безконтактний метод

Опромінювання:

- а) Поляризованим світлом (1992);
- б) іонним пучком (2001).

Орієнтація РК здійснюється за допомогою орієнтуючого покриття, яким є, переважно, *тонка полімерна плівка*

Основні типи орієнтації рідких кристалів

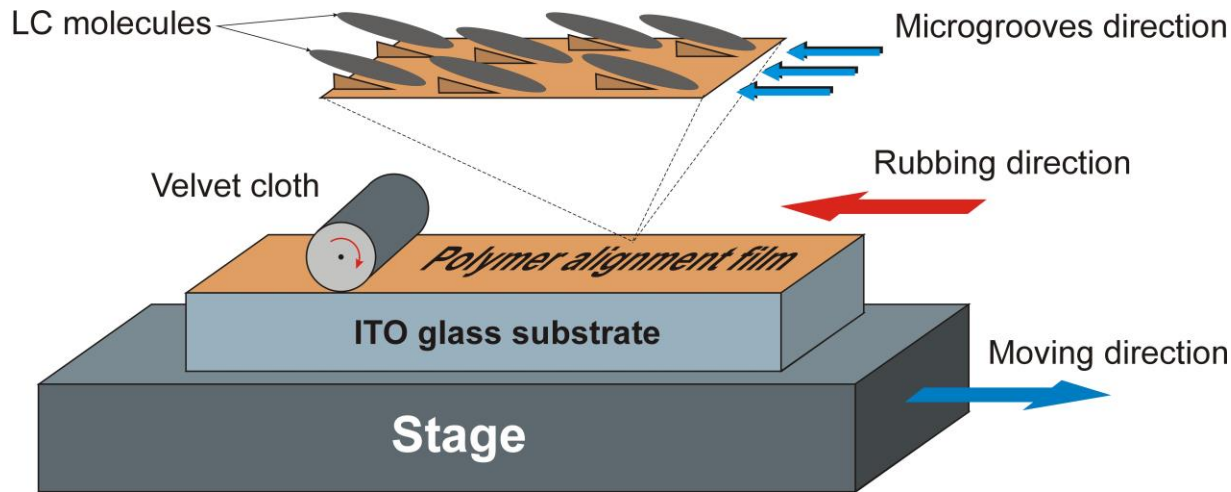


Основні характеристики орієнтуючої поверхні

- 1) вісь орієнтації;
- 2) кут переднахилу;
- 3) енергія зчеплення

Загальні відомості про основні методи орієнтації рідких кристалів

• *Механічний спосіб утворення анізотропії орієнтуючої поверхні (механічне натирання)*



Спостерігається періодична структура канавок:

- висота канавок $A = 150 - 300$ нм,
- період канавок $\Lambda = 100 - 300$ нм.

Енергія зчеплення:

$$W = (4 \pm 1) \times 10^{-4} \text{ Дж/м}^2$$

• J. Congard, Alignment of Nematic Liquid Crystals and Their Mixtures, Gordon and Breach Science Publishers, London, New York, Paris, 1982.

Механічний спосіб орієнтації РК досі використовується, як проміжна ланка, у виготовленні РК дисплеїв

Залежність твіст кута РК комірки та розрахованої енергії зчеплення поліімідної плівки від кількості циклів механічних натирань

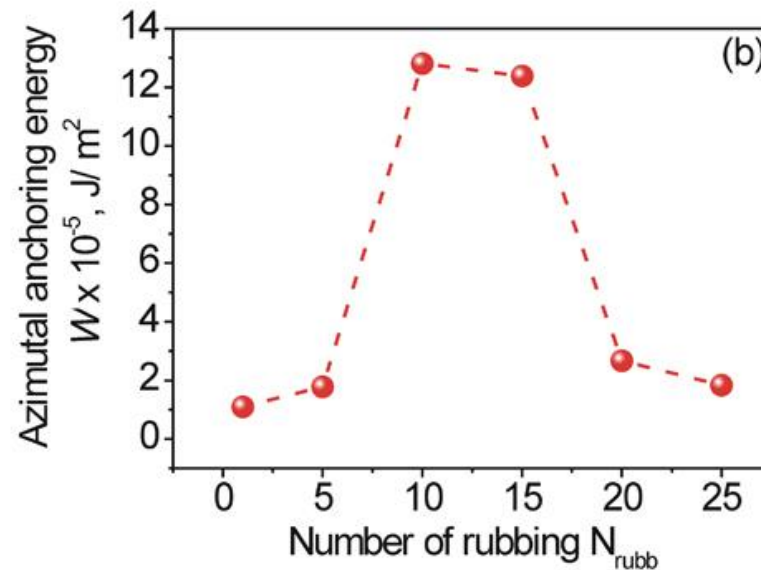
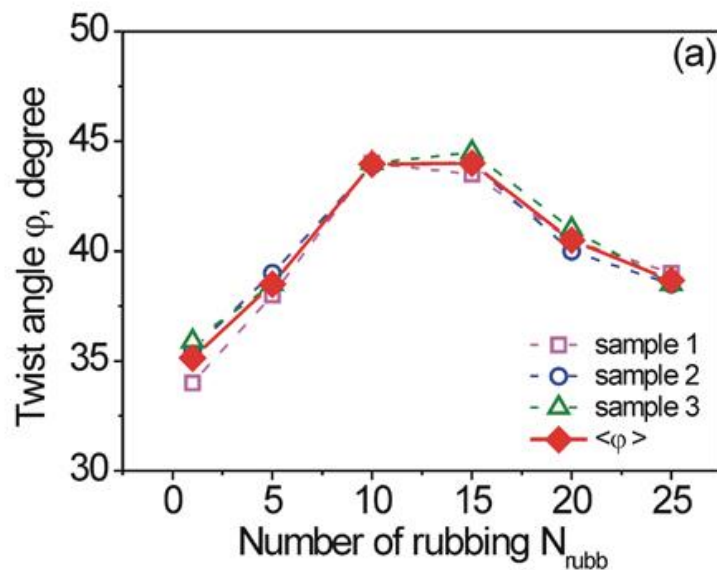
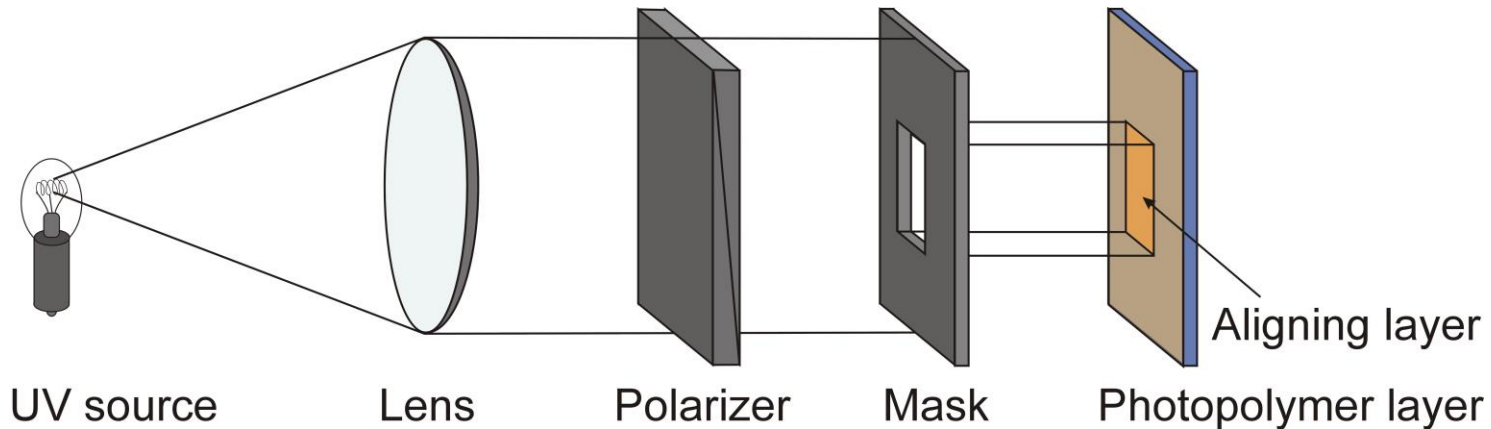


Table 1. Calculated azimuthal anchoring energy W and average twist angle $\langle \varphi \rangle$ for different number of times of the rubbing N_{rubb}

Number of times of the rubbing N_{rubb}	Average twist angle $\langle \varphi \rangle$ (degree)	Azimuthal anchoring energy W (J/m ²)
1	35.1	11×10^{-6}
5	38.5	17×10^{-6}
10	44	1.3×10^{-4}
15	43.9	1.2×10^{-4}
20	40.5	27×10^{-6}
25	38.6	18×10^{-6}

Загальні відомості про основні методи орієнтації рідких кристалів

• Утворення анізотропії орієнтуючої поверхні світлом (фотоорієнтація)



- W. M. Gibbons, P. J. Shannon, S. T. Sun, B. J. Swetlin, Surface-mediated alignment of nematic liquid crystals with polarized laser light, *Nature*. 351 (1991) 49-50.
- M. Schadt, K. Shmitt, V. Kozinkov, V. Chigrinov, Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photopolymers, *Jpn. J. Appl. Phys.* 31 (1992) 2155-2164.
- A. Dyadyusha, V. Kozinkov, T. Marusii, Y. Reznikov, V. Reshetnyak, A. Khizhnyak, Light-induced planar alignment of nematic liquid-crystal by the anisotropic surface without mechanical texture, *Ukr. Fiz. Zh.* 36 (1991) 1059-1062.

Спостерігається періодична структура канавок:

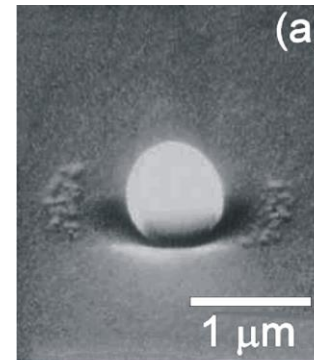
- висота канавок $A = 80 - 150$ нм,
- період канавок $\Lambda = 100 - 300$ нм.

Енергія зчеплення:

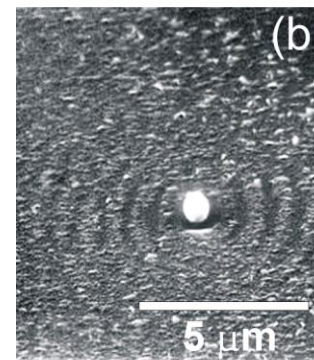
$$W = 10^{-8} - 10^{-4} \text{ Дж/м}^2$$

Дуже інтенсивно досліджується. Використовується в лабораторних зразках

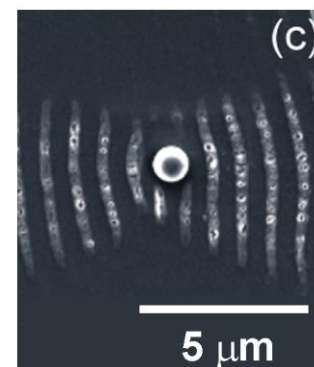
Ідея застосування наноструктурованих поверхонь для орієнтації нематичних рідких кристалів



15 імпульсів



30 імпульсів



50 імпульсів

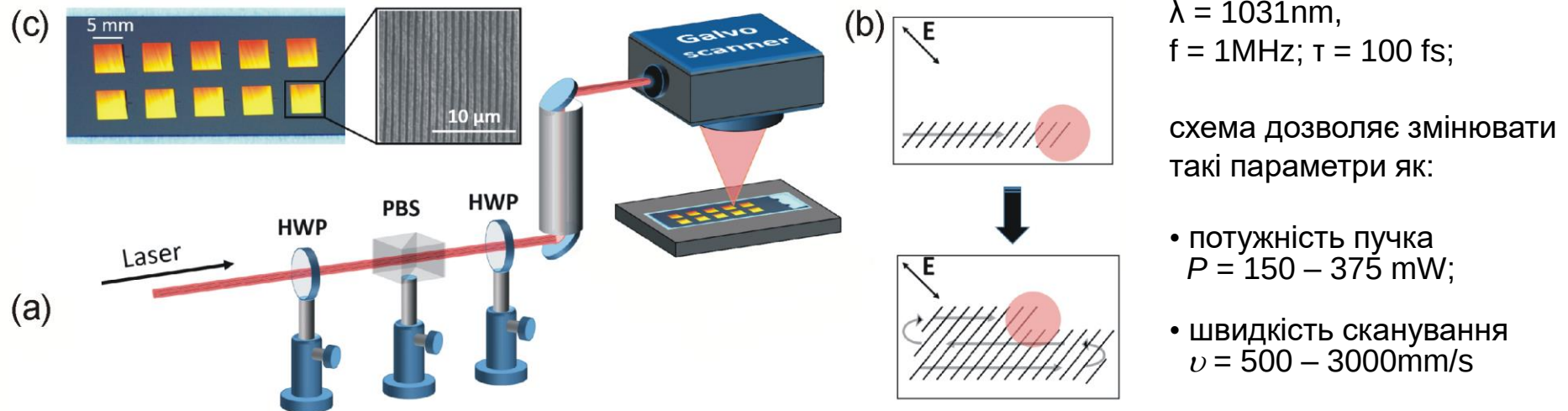
А. С. Рыбак, Р. Н. Кравчук, В. И. Стёпкин, И. А. Павлов, И. В. Блонский. Наноструктурирование поверхности титана под действием мощных ультракоротких лазерных импульсов.

Загальні відомості про лазерне структурування

1. **Метод лазерного структурування** базується на явищі **лазерно-індукованого періодичного структурування поверхні (LIPSS)**, відкритого близько 40 років тому назад.
2. **Основні переваги методу лазерного структурування:**
 - швидкий;
 - відносно дешевий;
 - створення рельєфу (мікро- та нанограток) як малої, так і великої площі.

- X. Lu, Q. Lu, Z. Zhu, Alignment mechanism of a nematic liquid crystal on a pre-rubbed polyimide film with laser-induced periodic surface structure, Liquid Crystals, 30 (2003) 985-990.
- A. Solodar, A. Cerkauskaitė, R. Drevinskas, P.G. Kazansky, I. Abdulhalim, Ultrafast laser induced nanostructured ITO for liquid crystal alignment and higher transparency electrodes, Appl. Phys. Lett. 113 (2018) 081603-1-5.

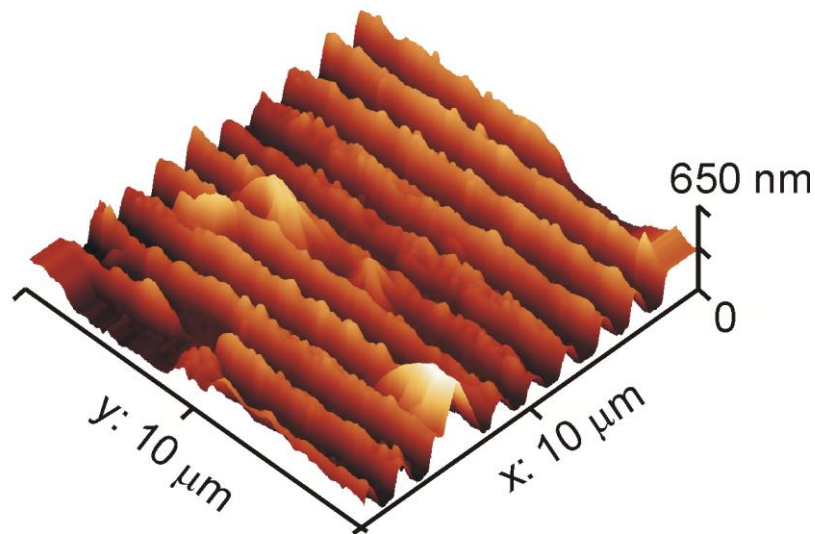
Створення періодичної поверхні методом лазерного структурування:



- B. Öktem, I. Pavlov, S. Ilday, H. Kalaycioğlu, A. Rybak, S. Yavas, M. Erdoğan, F.Ö. Ilday, Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulse, Nat. Photonics. 7 (2013) 897-901.

Експериментальне дослідження орієнтації нематика, наноструктурованими шарами титану

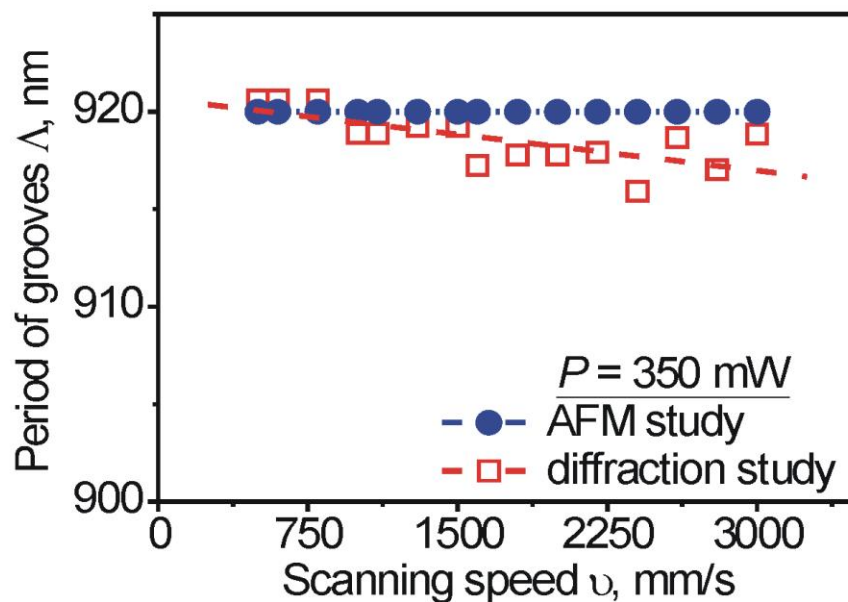
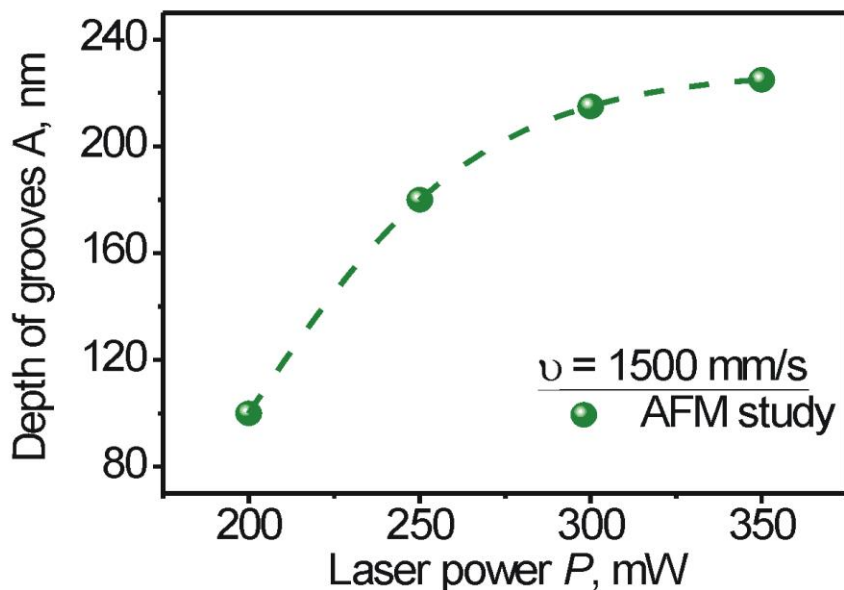
1. АСМ дослідження наноструктурованих шарів титану



Спостерігається періодична структура:

- висота канавок $A = 90 - 225$ нм,
- період канавок $\Lambda = 920$ нм.

$$\Lambda = m \cdot \lambda / \sin \alpha$$



Експериментальне дослідження орієнтації нематика, наноструктурованими шарами титану

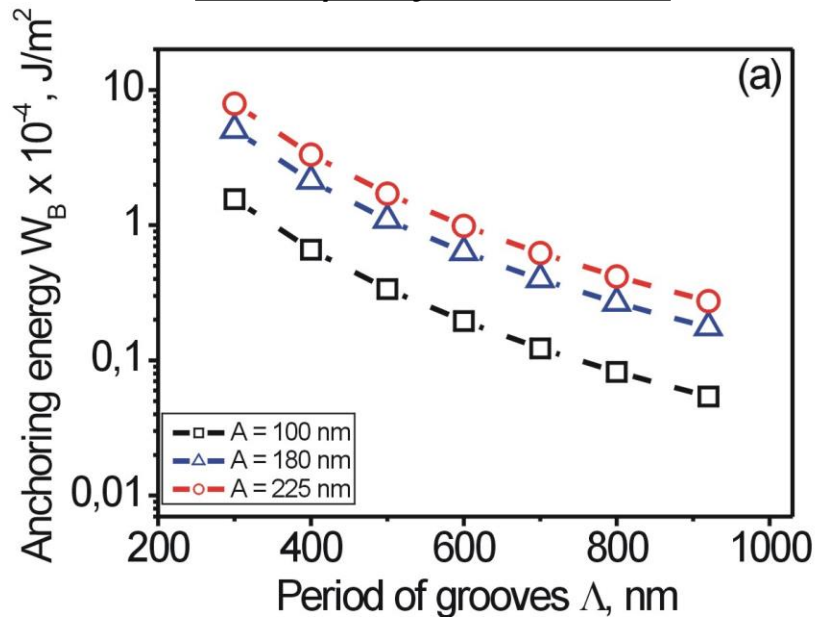
2. Оцінка енергії зчеплення орієнтуючої поверхні за теорією Берремана

Згідно з теорією Берремана, енергія зчеплення залежить від **висоти A** та **періоду Λ** канавок так:

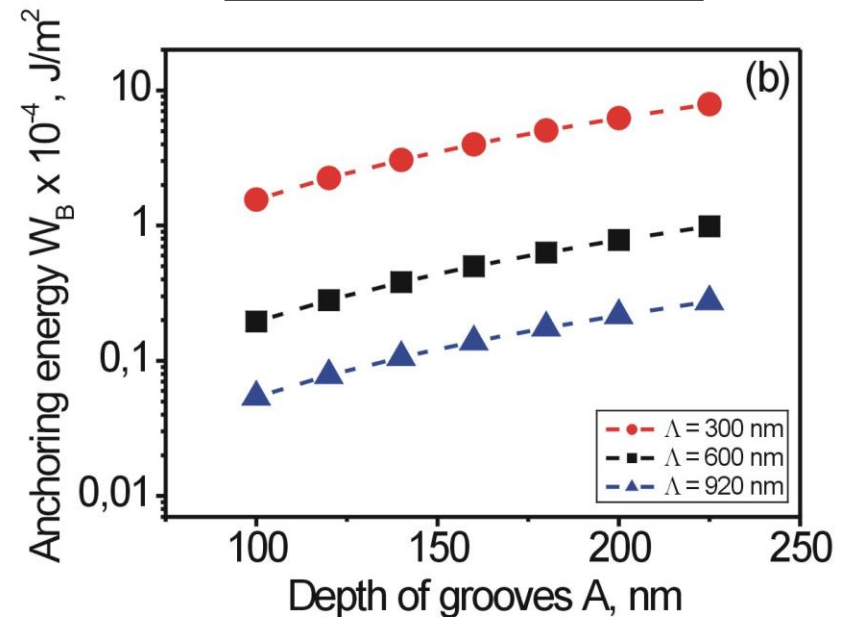
$$W_B = 2\pi^3 \cdot K \cdot \frac{A^2}{\Lambda^3}$$

K - пружна константа РК

від періоду Λ канавок

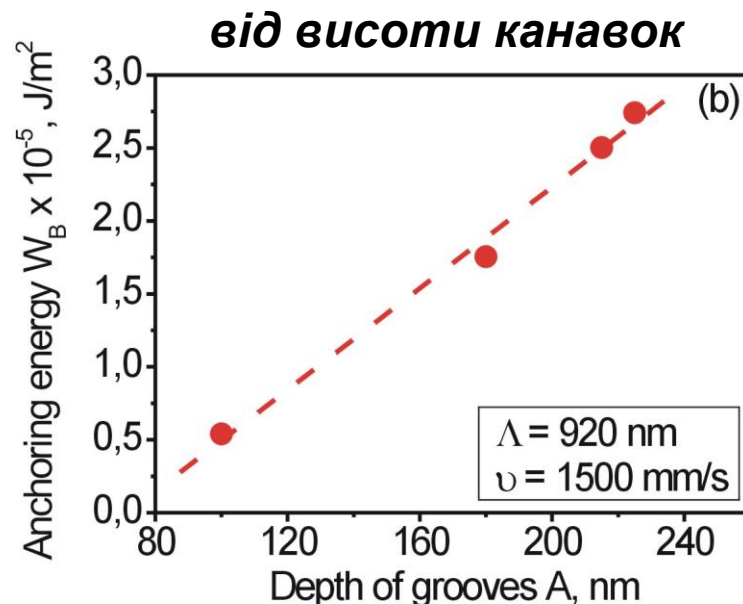
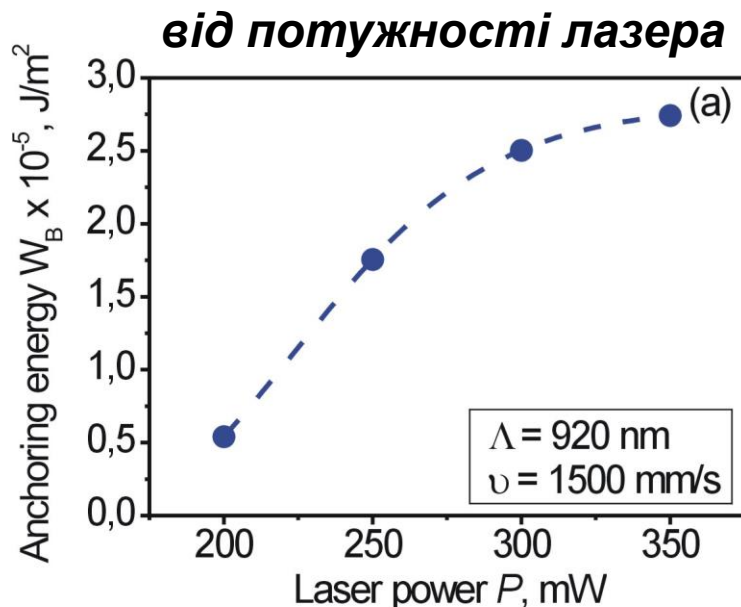


від висоти A канавок



Експериментальне дослідження орієнтації нематика, наноструктурованими шарами титану

3. Оцінка енергії зчеплення орієнтуючої поверхні титану за теорією Беремана



Для $\Lambda \sim 920 \text{ nm}$ та $A \sim 225 \text{ nm}$, при певних параметрах обробки Ті поверхні (при потужності лазера $P = 350 \text{ мВт}$ та швидкості сканування $v = 1500 \text{ мм/с}$)

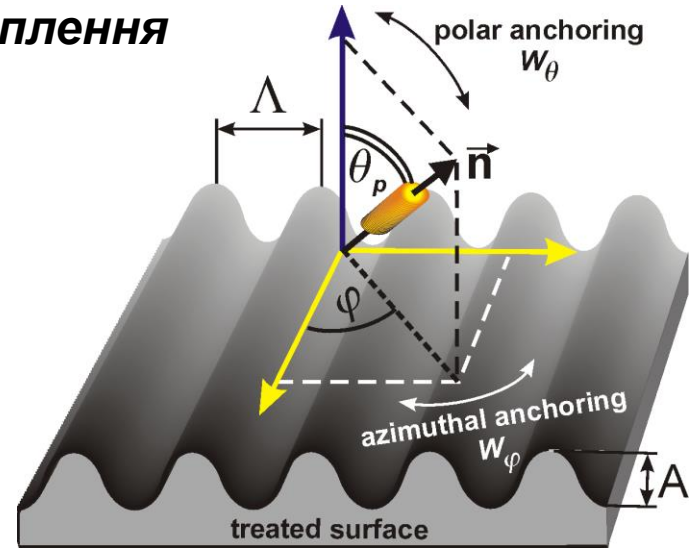
$$W_B \sim 2.7 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$$

Таке значення енергії зчеплення притаманне фотоорієнтуючим поверхням.

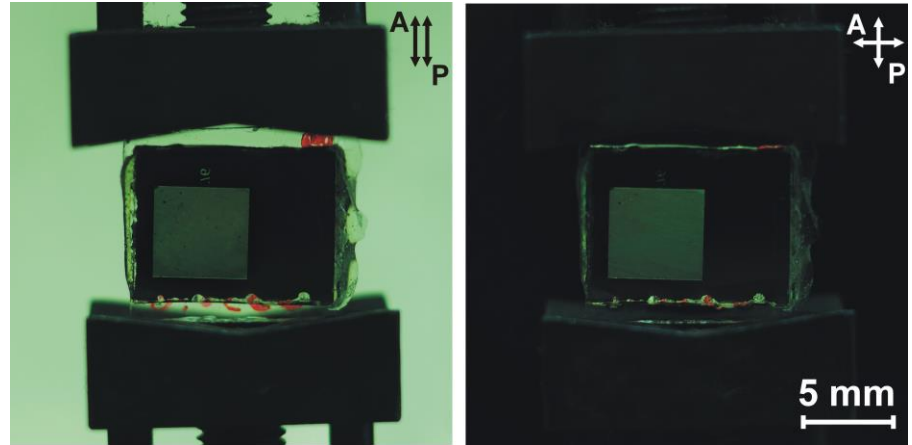
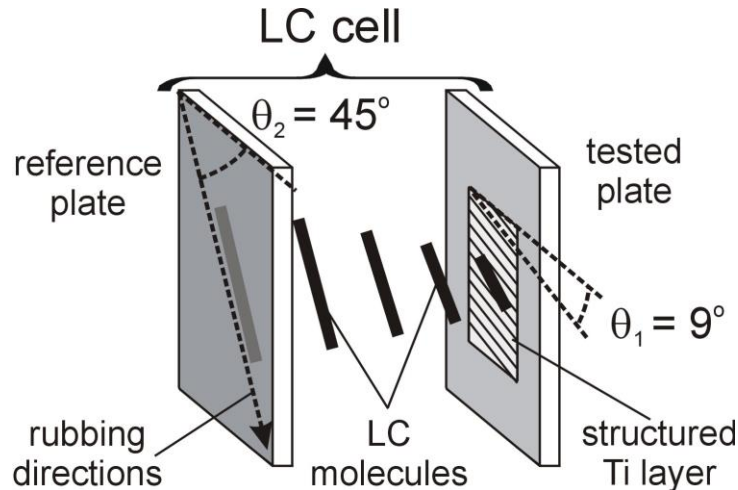
Експериментальне дослідження орієнтації нематика, наноструктурованими шарами титану

• Азимутальна та полярна енергія зчеплення

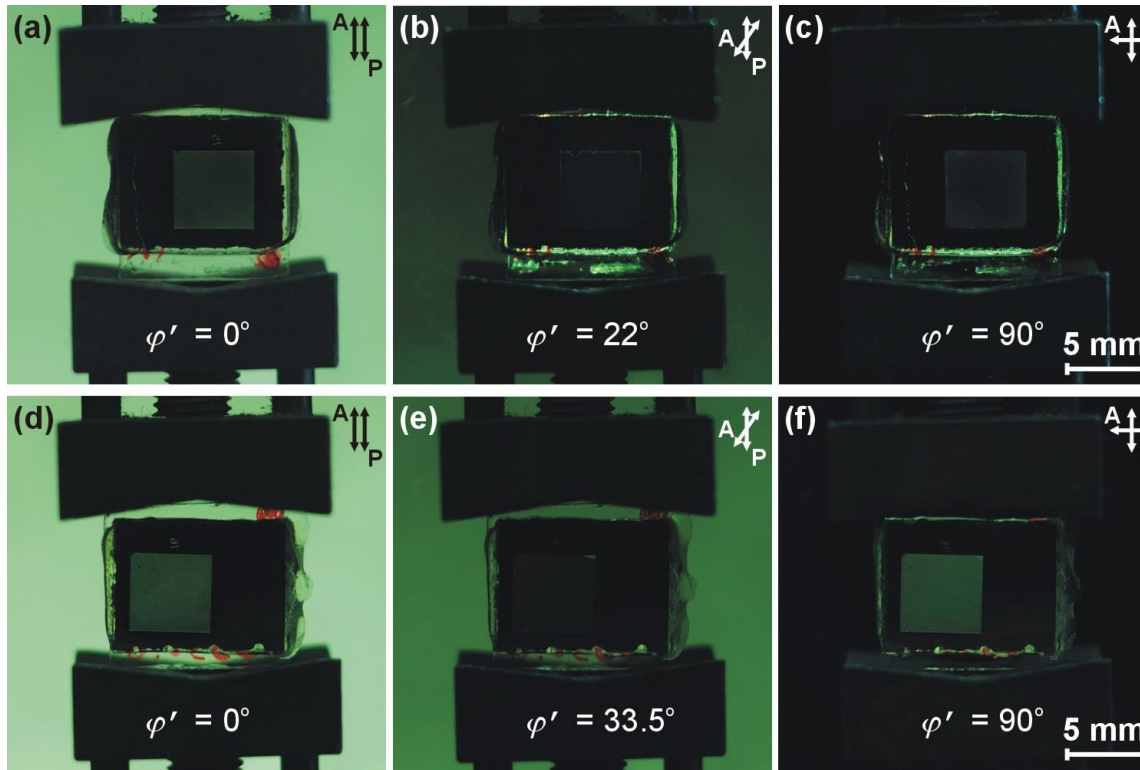
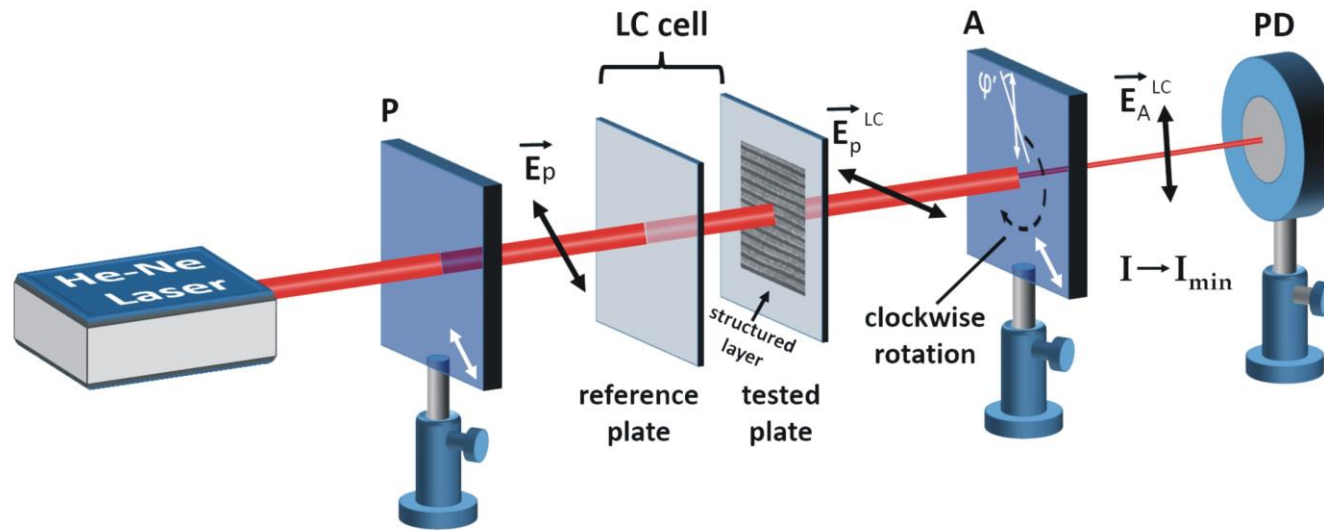
$\mathbf{n}$ – директор;
 φ – азимутальний кут;
 θ_p – полярний кут.



• Конструкція комбінованої твіст комірки



Методика визначення твіст кута: комбінована твіст комірка



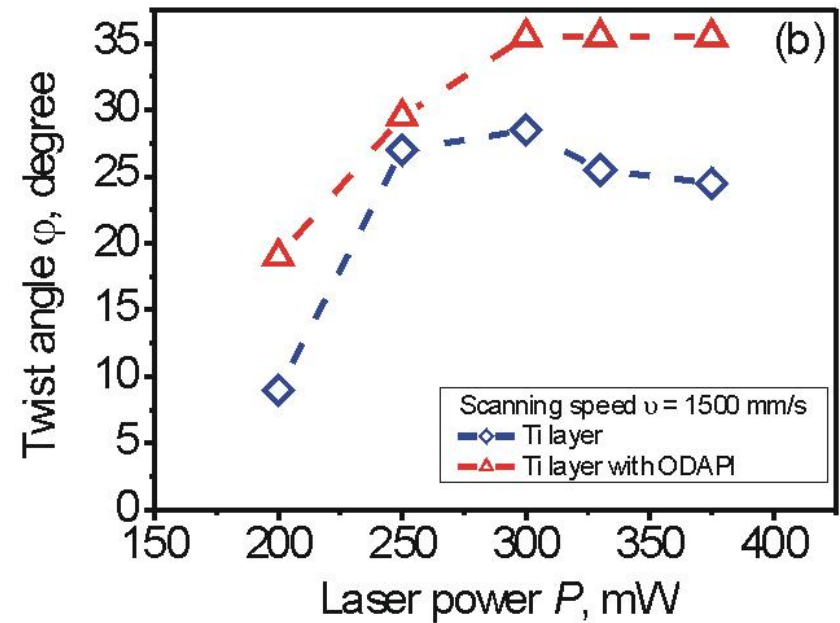
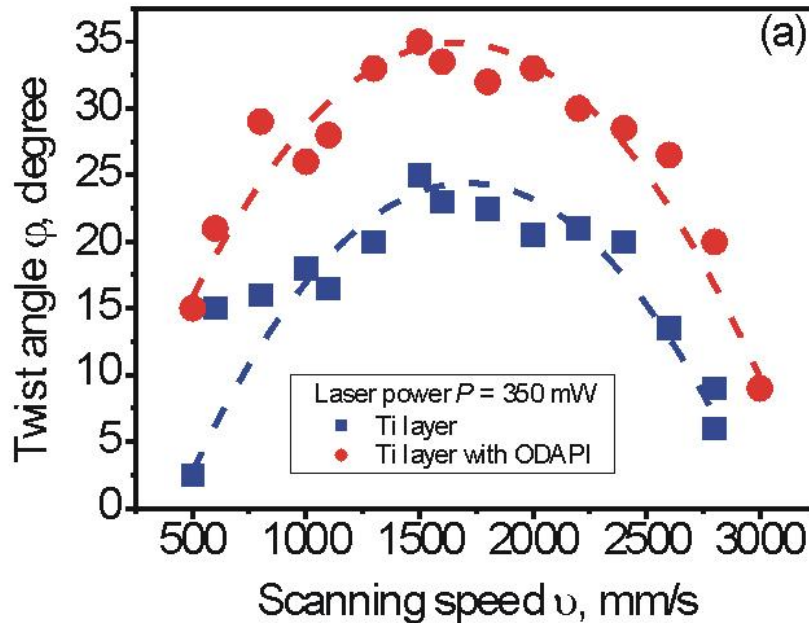
наноструктурована
поверхня Ti;
твіст кут $\varphi = 22^\circ$
($v = 1500$ мм/с, $P = 350$ мВт)

наноструктурована
поверхня Ti,
покрита полімером;
твіст кут $\varphi = 33.5^\circ$
($v = 1500$ мм/с, $P = 350$ мВт)

Експериментальне дослідження орієнтації нематика, наноструктурованими шарами титану

Залежність твіст кута від параметрів лазерної обробки поверхні:

- швидкості сканування
- потужності лазерного випромінювання



Існує оптимальне значення параметрів лазерної обробки при структуризації Ті шару, коли спостерігається максимальний твіст кут, а отже і азимутальна енергія зчеплення, яка розраховується по формулі:

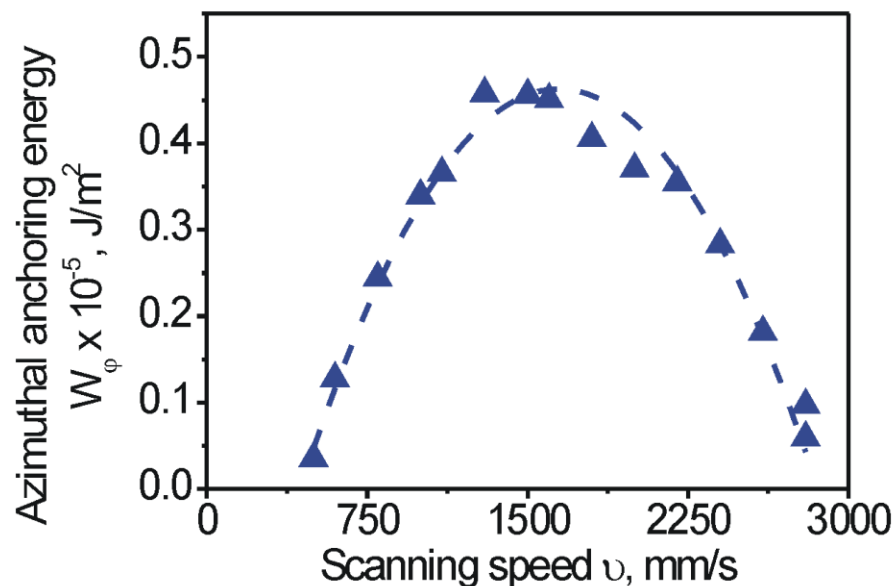
$$W_{\varphi} = K_{22} \frac{2 \sin(\varphi)}{d \sin 2(\varphi_0 - \varphi)}$$

$$\varphi_0 = 36^\circ$$
$$d = 20 - 22 \mu\text{m}$$

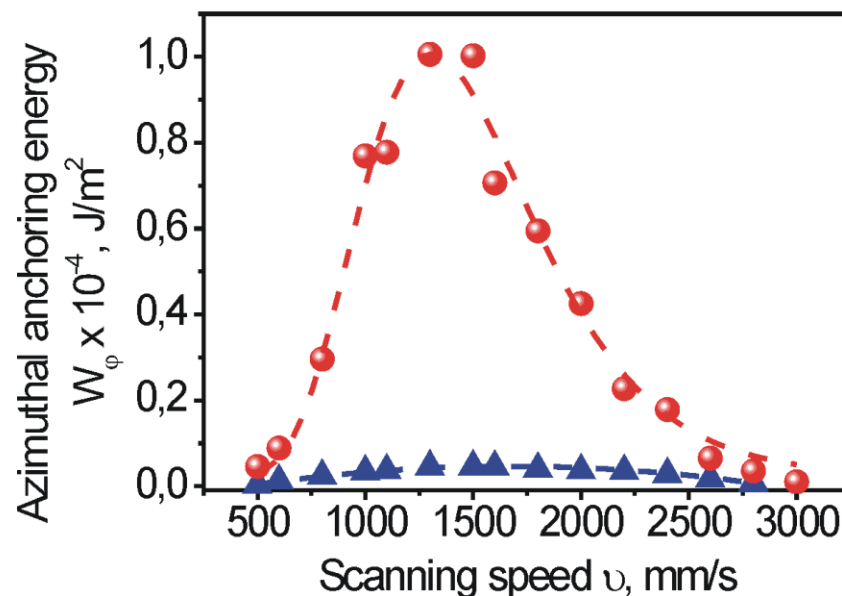
Експериментальне дослідження орієнтації нематика, наноструктурованими шарами титану

Залежність азимутальної енергії зчеплення від швидкості сканування:

наноструктурований Ті шар



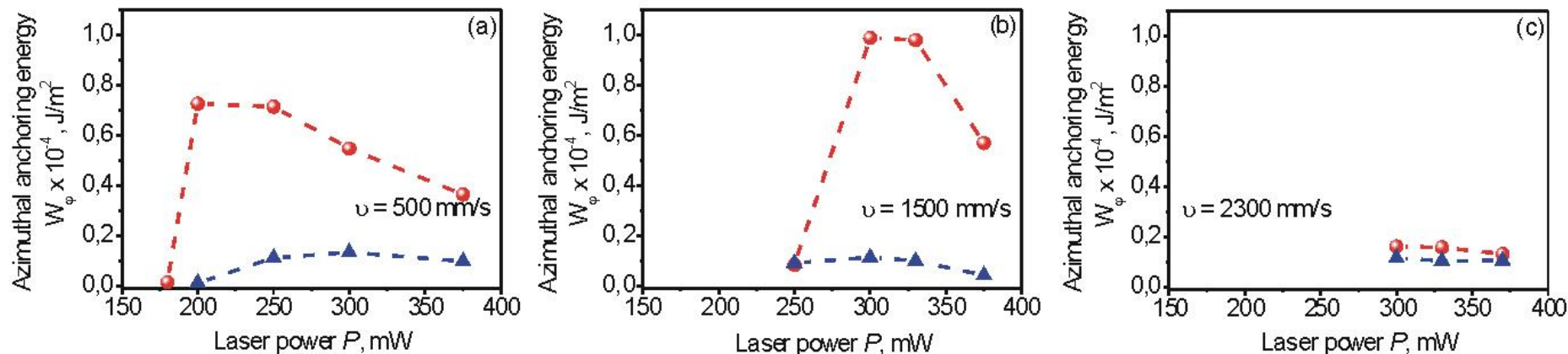
наноструктурований Ті шар,
покритий полімером



- Спостерігається сильне зростання азимутальної енергії зчеплення (приблизно на порядок) при покритті полімером наноструктурованої поверхні Ті.

Експериментальне дослідження орієнтації нематика, наноструктурованими шарами титану

Залежність азимутальної енергії зчеплення від потужності лазерного випромінювання:



Існує **оптимальне значення** параметрів лазерного структурування (швидкість сканування та потужність лазерного випромінювання) при обробці Ті шару, коли спостерігається **максимальне значення** азимутальної енергії зчеплення.

Висновки

- Нами, на прикладі поверхонь Ti , експериментально показано, що **використання лазерної структуризації поверхні може стати альтернативним методом орієнтації нематичних рідких кристалів** завдяки своїй **відносній дешевизні** та **високій швидкості** створення як і **малих**, так і **великих площ** періодичних структур;
- Експериментально було показано, що **наноструктуровані поверхні** Ti забезпечують монокристалічну орієнтацію рідкого кристалу з енергією зчеплення $\sim 10^{-5}$ Дж/м², яка відповідає **значенням енергії при використанні методу фотоорієнтації**;
- Для **підвищення енергії зчеплення** наноструктурованих поверхонь Ti , нами було запропоновано додатково їх **покривати полімерною плівкою**. Це дозволило нам збільшити енергію зчеплення на порядок ($\sim 10^{-4}$ Дж/м²).
- Для **збільшення енергії зчеплення**, нами, на основі результатів роботи, можуть бути запропоновані наступні кроки:
 - 1) **зменшення періоду канавок** структури шляхом зміни параметрів лазерного структурування (зменшення довжини хвилі лазерного випромінювання),
 - 2) **збільшення висоти канавок** шляхом збільшення товщини шару Ti , який обробляється,
 - 3) **використання полімерів** з більшою енергією зчеплення.
- Для приготування орієнтуючого покриття потрібно зробити максимум два кроки. **Основним кроком** є створення періодичної наноструктури **методом лазерного структурування на будь-якій поверхні** (метал, скло, полімер тощо). Допоміжним кроком є додаткове нанесення полімеру на наноструктуровану поверхню.

Публікації

1. Ihor Pavlov, Andrey Rybak, Andrii Dobrovolskiy, Viktor Kadan, Ivan Blonskiy, Fatih Ö. Ilday, Zoya Kazantseva and Igor Gvozдовsky. **The alignment of nematic liquid crystal by the Ti layer processed by nonlinear laser lithography.** *Liquid Crystals (Letters)*, 2018, Vol.45, N9, pp.1265-1271.
(doi:10.1080/02678292.2018.1429027) (IF = 2.6, Quartiles = Q2)

1. I.A. Pavlov, A.S. Rybak, A.M. Dobrovolskiy, V.M. Kadan, I.V. Blonskiy, Z.I. Kazantseva and I.A. Gvozдовsky. **High-quality alignment of nematic liquid crystals using periodic nanostructures created by nonlinear laser lithography.** *Journal of Molecular Liquids*, 2018, Vol.267, pp.212-221.
(doi:10.1016/j.molliq.2018.02.058) (IF = 4.5, Quartiles = Q1)

1. Кандидатська дисертація: Рибак А. С. **“Ефекти структурування нано- та мікрометрового масштабу в твердотільних середовищах під дією фемтосекундного лазерного випромінювання”**

Ми висловлюємо подяку:

- Проф. **І. Герусу** (ІБОХН НАНУ);
- Проф. **О. Лаврентовичу** та д-р. **Б. Лі** (Державний університет Кента, США);
- Снс. **П. Литвину** та снс. **А. Корчовому** (ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ);
- Снс. **С. Лук'янцю** (ВТФ ІФ НАНУ).

Дякую за увагу!

