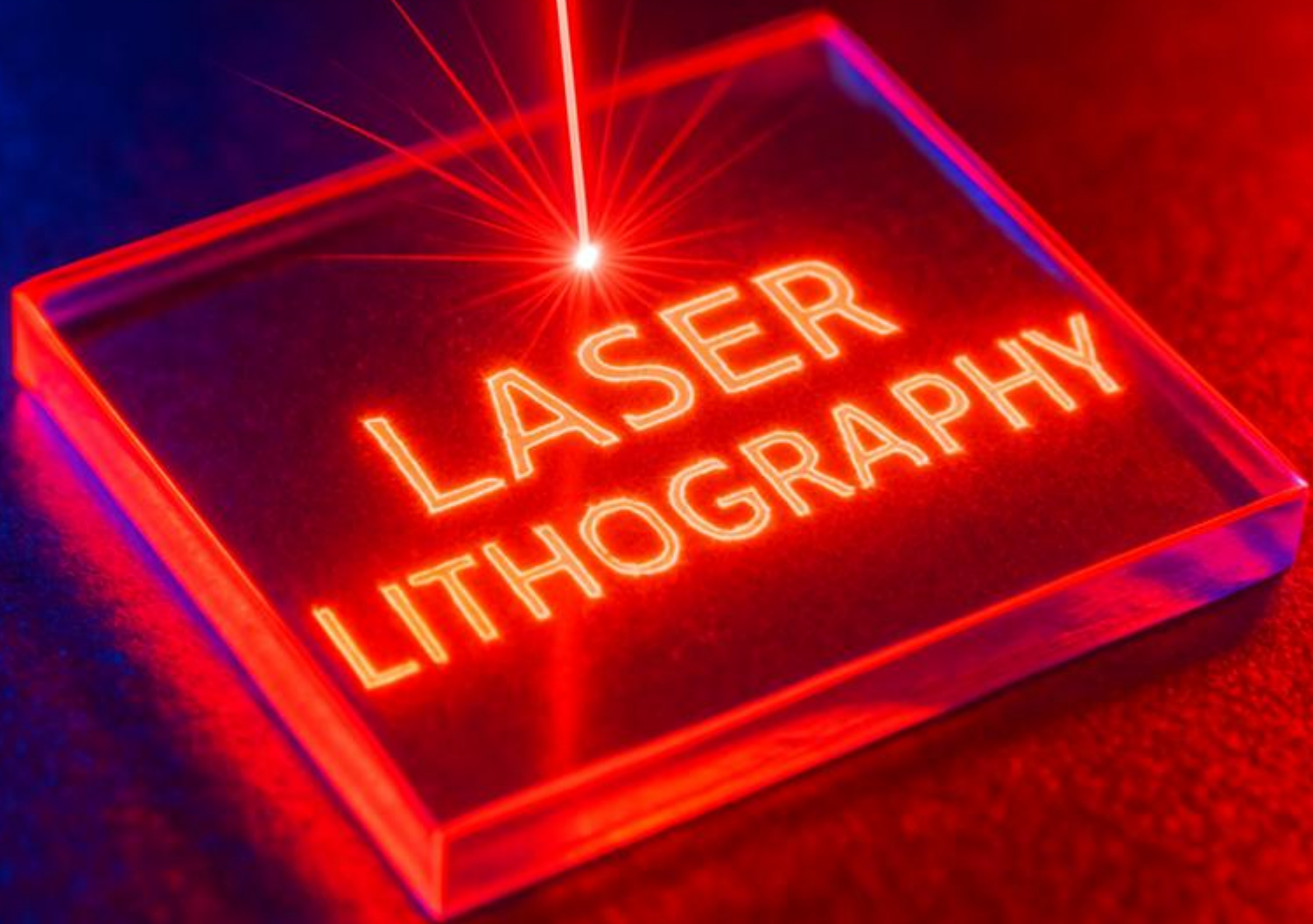


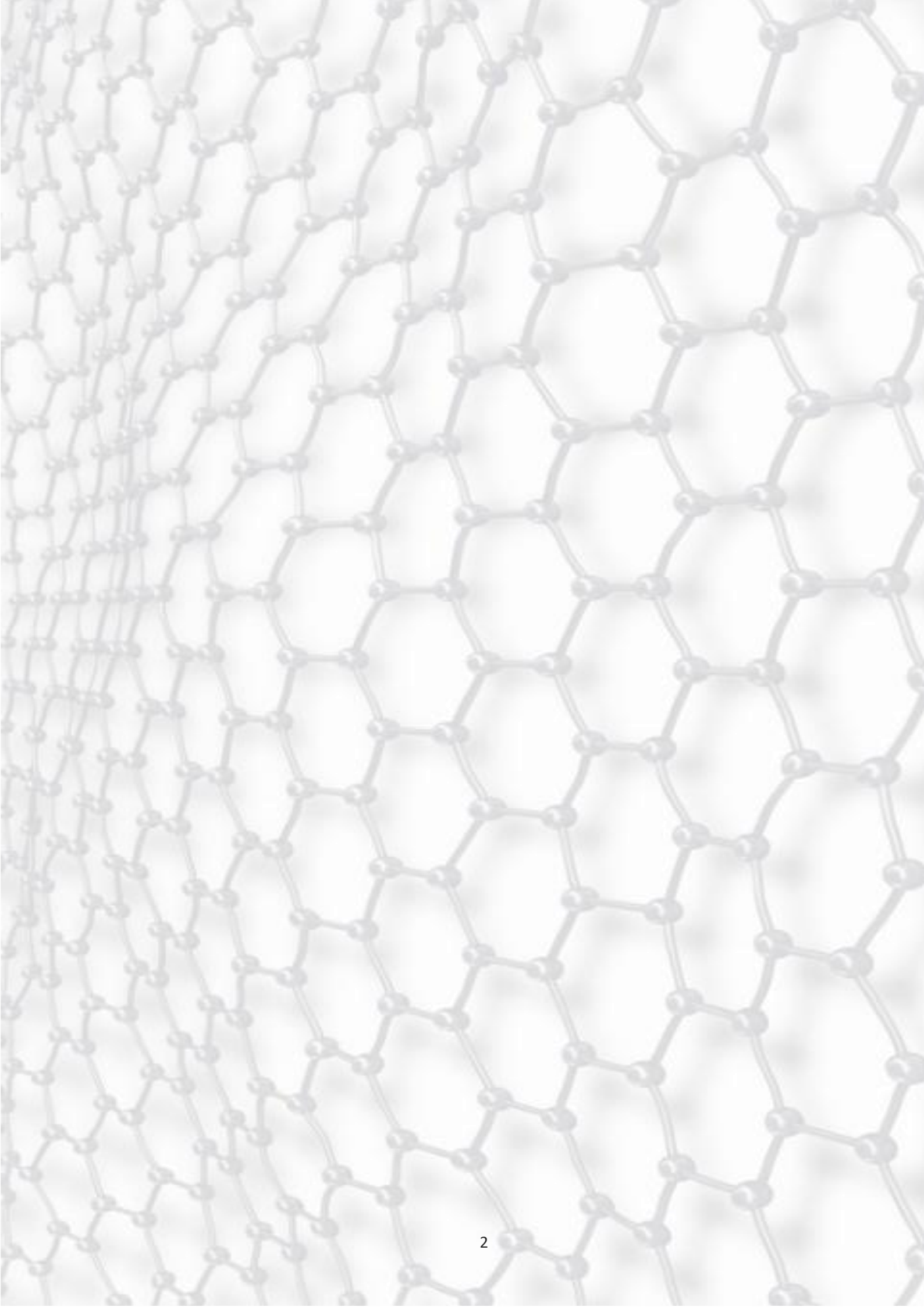
Лазерна та нанозондова літографія



тематична сесія

X Української наукової конференції
з фізики напівпровідників
(УНКФН-10)

26-30 травня 2025, Ужгород
<http://conference.isp.kiev.ua>



Мікро-, нано- та оптоелектроніка, ІЧ- та ТГц-техніка, сенсорика, переживають стрімкий технологічний ріст і зростання попиту у найрізноманітніших галузях, від індустрії розваг до безпеки і оборони. Значний запит на впровадження різноманітних сенсорних систем, датчиків, мікроконтролерів, мікроелектромеханічних систем (MEMS) в різні сфери побуту, промисловості та безпеки, зумовлює постійну потребу у вдосконаленні існуючих і розробці нових матеріалів, для зменшення вартості і покращенні їх характеристик. Зокрема, цілий ряд технологій, які розвивалися протягом десятиліть, вже досягли чи досягнуть в найближчі роки своєї межі. Тому, актуальним є пошук нових матеріалів з кращими фізичними властивостями і нових технологічних рішень щодо їх використання. Зокрема, застосування традиційних фотошаблонів не є достатньо гнучким методом створення приладових структур на етапі їх розробки і дослідження, оскільки для внесення навіть незначних змін в архітектуру приладу необхідно виготовити повністю новий набір шаблонів. Саме тому, популярності в секторі досліджень набирає безмаскова проекційна і скануюча лазерна фотолітографія, а також зондова нанолітографія, як методи структурування матеріалів та модифікації їх фізичних властивостей, від яких очікується якісний поступ для цілої галузі. В контексті вітчизняної науки і технології, ще одна стратегічна перевага таких видів літографії та не обхідність їх розвитку, пов'язана з відсутністю можливості виготовлення традиційних фотошаблонів для оптичної літографії.


















На розв'язання цієї проблеми спрямований, зокрема, інституційний грант Національного фонду досліджень України (2024-2026 рр) "Створення Державної ключової лабораторії «Центр критичних оптоелектронних мікро-/ нано-технологій та експертиз»", який виконується на базі Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України і передбачає створення лабораторії безмаскової літографії. Поряд із розбудовою дослідницької інфраструктури, досліджуються можливості створення мікроструктур та керованої модифікації властивостями різних матеріалів за допомогою програмованих лазерних маркерів з різною довжиною хвилі випромінювання та режимом роботи (неперервним або імпульсним). Вивчається широке коло перспективних матеріалів – напівпровідникові сполуки з фотоіндукованими фазовими переходами (VO_2) та кристалізацією (GeSn), тонкі плівки металів (Au , Ni , Al) та квантових матеріалів (квантові точки, графен).

З метою інформування наукової спільноти України та світу про результати досліджень у проекті, а також популяризації даного науково-технологічного напрямку серед вчених України і залучення їх до співпраці на базі створюваної дослідницької інфраструктури, в рамках профільної напівпровідникової конференції України (УНКФН), співорганізатором якої є ІФН імені В.Є. Лашкарьова НАН України, було проведено тематичну сесію, до якої було зібрано доповіді за тематикою безмаскової літографії, зокрема прямого лазерного запису та нанозондової літографії. Серед авторів доповідей є виконавці згаданого проекту (О. Назаров, А. Корчовий, С. Кухтарук), інші вчені з України, а також науковці з Бельгії (Denis Flandre) та Словаччини (V. Komanicky). У даному збірнику всі тези наведені в їх авторській редакції.

З усіма матеріалами конференції УНКФН-10, а також детальною інформацією про проект можна ознайомитися на офіційному сайті ІФН імені Лашкарьова НАН України (www.isp.kiev.ua).



ЗМІСТ

Доповідь	стор.	Наук. профілі дповідача
<u>D. Flandre</u>  , <i>N. Bidoul, G. Brandsteert, J.-Ch. Delvenne, T. Ratier, X. Zeng, L. Van Brandt.</i> Emerging vanadium dioxide memristor-based spiking concepts towards analog neuromorphic event sensing.	6	
<u>A. Dmytruk</u> , <i>I. Dmytruk, V. Kadan.</i> Femtoseconds for semiconductors	7	
<u>S. Kondratenko</u>  , <i>O. Datsenko, F.M. de Oliveira, S.Kryvyi, K. Yablochkova, P.M. Lytvyn, M.E. Ware, S. Maliuta, S.Q. Yu, Y.I. Mazur, G.J. Salamo.</i> Impedance spectroscopy and ac conductivity mechanism in GeSn Thin Films	8	
<u>A.N. Nazarov</u>  , <i>P.V. Lytvyn, A.A. Korchovyy, V.V. Strelchuk, A.S. Nikolenko, O.M. Slobodyan, S.I. Tyagulskiy, V.M. Dzhagan</i> Laser reduction and maskless laser lithography of Graphene Oxide films on dielectric	9	
<u>V. Komanicky</u>  , <i>V. Bilanych, S. Vorobiov, O. Shylenko, S. Soroka, V. M. Rizak, P. M. Lytvyn.</i> Electron beam induced phenomena in amorphous chalcogenide semiconductors and their applications	12	
<u>В.А. Данько</u> , <i>Минько В.І., Беляєв О.Є., Індутний І.З., Мамикін С.В.</i> Створення зустрічно-штирьових контактів за допомогою інтерференційної фотолітографії	14	
<u>В.В. Коротєєв</u> , <i>Б. Романюк, Сапон С., Кульбачинський, Мельник В., Максименко З., Дубіковський О.</i> Використання поверхнево плазмонного резонансу в лавинних кремнієвих фотодіодах	16	
<u>Ю.І. Чегіль</u>  , <i>О.М.Буток, Д.Ю.Манько, Є.Є. Антонов, В.М. Джазган, Корчовий А.А.</i> Особливості безмаскового лазерного запису графічних зображень на тонких металевих плівках	18	
<u>А.А. Крючин</u>  , <i>В.В. Петров, Є.В. Беляк, І.В. Косяк.</i> Аналіз можливостей прямого лазерного запису з створення структур з субмікронними розмірами	20	
<u>А.А. Крючин</u>  , <i>Є.Є. Антонов, В.М. Зенін.</i> Плоско-фокусувальна оптика для напівпровідникових концентраторних сонячних фотоперетворювачів	22	

<u>I.M. Danylenko</u>  , Maziar D.M., Kolomys O.F., Strelchuk V.V., Dzhagan V.M., Dubikovskiy O.V. Raman and photoluminescence spectroscopy of laser-induced structural phase transition in polycrystalline VO ₂	24	
<u>H. Kochubej</u> , Stronski A., Dzhagan V., Shportko K., Shamrovska P., Zahn D.R.T. Structural studies of Ge-Sb-Se alloys	26	
<u>I. Gvozdovskyy</u>  , H. Bohatyryova, S. Schwarz, K. Bischoff, R. Hellmann, I. Koshets, A. Korchovij, P. Lytvyn, S. Chernyshuk. The stabilization of azimuthal anchoring of LIPSS-modified SiO ₂ surfaces by polymer post-treatment	28	
<u>V. Bilanych</u>  , S.Vorobiov, B.Bilanych, Yu.Matyovka, V.Rizak, A.Feher, V.Komanicky. Use of chalcogenide films as photo- and electronic resists for the production of master originals of security elements using single-step dry lithography technology	30	
<u>H.B. Мазур</u>  , В.О. Юхимчук, О.Й. Гудименко, О.А. Капуш, В.С. Єфанов, В.М. Джаган, П.М. Литвин, А.М. Дмитрук, О.В. Косуля, О.В. Дубіковський. Лазер індукована кристалізація іонно- (С+, В+) імплантованих GeSn плівок	32	
<u>Ю. М. Ажнюк</u>  , В.О. Юхимчук, А.І. Погодін, М.Й. Філеп, В.В. Лопушанський, В.Ю. Ізай, В. М. Кришеник, І.М. Войнарович, О.В. Гомоннай. Структурне і спектроскопічне дослідження фотоіндукованих перетворень у склах системи Ag–As–S	34	
<u>М.О. Сорокатий</u> , В.М. Стребезев, І.М. Юрійчук, Ю.Б. Халавка, Д.А. Бурченко. Оптичні та фотоелектричні елементи на основі In ₄ Se ₃ , модифіковані в області лазерного впливу	36	
<u>P. Lytvyn</u>  , A. Korchoviyi, A. Rusavsky, A. Vasin, K. Svezhentsova, V. Dzhagan. Practical Aspects of Single-, Multi-Pulse, and Continuous Wave Laser Micro-/Nano-Structuring of Materials	38	



Emerging vanadium dioxide memristor-based spiking concepts towards analog neuromorphic event sensing

Denis Flandre, Noémie Bidoul, Grégoire Brandsteert, Jean-Charles Delvenne, Thomas Ratier, Xi Zeng, Léopold Van Brandt

SWIMS ERC project, ICTEAM institute, UCLouvain, Louvain-la-Neuve, Belgium

Event-based detection has emerged as a solution to lower the data rate and energy consumption of sensor arrays, notably in the case of image sensors. However, to combine them with promising spiking neural networks (SNN) for event identification in internet-of-things edge nodes, digital interfaces and spike regeneration circuits are still required, leading to increased resource complexity and power consumption.

In our work, we first investigate how analog spikes could be generated within the sensors themselves towards direct interfacing with neuromorphic processors. We propose a specific implementation, based on vanadium dioxide (VO_2), a phase-change material that exhibits reversible metal-insulator transitions (MIT) at a temperature of about 70°C . Insulator-to-metal transition (IMT) can also be triggered by applying a voltage across the VO_2 resistor exceeding a certain threshold value (V_{IMT}) and reversely when lowering the voltage below another metal-to-insulator threshold (V_{MIT}). The resulting I-V characteristics are typical of a memristor behavior, featuring a hysteresis in voltage-driven operation or a negative differential resistance (NDR) in current-driven mode.

These behaviors can be leveraged to design oscillators made of a single VO_2 memristor, a bias resistor or current source, and a capacitor. The properties of such oscillators have been measured as a function of VO_2 characteristics, temperature, bias current and capacitor value, and analyzed in terms of average frequency and cycle-to-cycle fluctuations, leading to a potential precision of about 0.1°C on a hazard temperature threshold of about 45°C . Similar studies have been carried out notably in EPFL (Switzerland) with respect to other stimuli such as electromagnetic or strain.

Secondly, encoding the sensed stimulus into the rate or frequency of the oscillator is not sufficiently energyefficient. A better encoding can be achieved by sparse spikes or spike trains further used as input for the neurons and synapses of a SNN. The proposed VO_2 -based sensory neuron is reported to operate in this mode when biased below threshold, by exploiting intrinsic noise sources to generate stochastic spike bursts. Their temperature dependence has been measured and characterized. The statistics of the bursts have been observed to follow Poisson distributions, corresponding to more biologically-plausible signals.

Finally, we have adapted a physics-based memristor model to further analyse and discuss the experimental behaviors. This compact model could be used as a tool to design new sensors based on VO_2 memristor targeting ultra low-power consumption (sub-pJ per spike) and bio-plausible signals (towards event-based detection).



Femtoseconds for semiconductors

Andriy Dmytruk, Igor Dmytruk, Viktor Kadan

Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv 03028, Ukraine

The Laser Femtosecond Complex (LFC) is the Center for collective use of equipment of NAS of Ukraine within the Institute of Physics [1]. The LFC was founded in 2005 for fundamental research and applied laser technologies in the field of interaction of ultrashort (~150 fs) powerful (up to 10 GW) pulses of light (fundamental wavelength of 800 nm, 2nd and 3rd harmonics in UV, parametric amplification in IR) with matter, as well as for education and training of graduate and PhD students in the fields of laser physics, ultrafast spectroscopy, and material processing [2].

Several optical research techniques have been elaborated at the LFC: pump-probe for transient absorption [2], Kerr-gate for ultrafast secondary emission [3], time-resolved polarization microscopy and shadowgraphy for direct observation of space-time transformations of a femtosecond laser pulse in transparent media [4], z-scan and low-frequency loss modulation technique for nonlinear-optical measurements [5], and others.

As for semiconductors, the femtosecond laser processing provides a unique possibility for “cold” (nonthermal) ablation, which is based on Coulomb explosion phenomenon. As the excitation of a material (namely, of its electron subsystem) by a femtosecond laser pulse occurs faster than heat dissipation (vibrations of nuclei), such processing allows precise (submicron) formation of surface structures on a semiconductor material without disturbing its bulk, and so its electronic structure. Laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on semiconductors attract much attention as potentially simple way to join electronic and optical elements within the same production technology, but also – more practically – for coloring (darkening) elements, for example, solar panels.

Silicon as a fundamental semiconductor technology material has been extensively studied at LFC. Namely, the impact of wavelength, intensity and polarization on the morphology of LIPSS on Si has been demonstrated [6], a real-time optical diagnostic method of the LIPSS formation has been suggested [7], polarization and kinetics of the emission, which accompany the ablation, have been studied in details [8]. Features of surface structuring of direct and indirect band gap semiconductors by femtosecond laser have been investigated [9]. For GaAs wafer coated with semitransparent gold (Au) film, the results of direct femtosecond laser structuring are presented recently [10].



Impedance spectroscopy and ac conductivity mechanism in GeSn Thin Films

Serhiy Kondratenko^{1*}, Oleksandr Datsenko¹, Fernando M. de Oliveira², Serhii Kryvyi²,
Kateryna Yablochkova¹, Peter M. Lytvyn⁴, Morgan E. Ware^{2,5}, Serhii Maliuta³, Shui-Qing Yu⁵,
Yuriy I. Mazur^{2*}, and Gregory J. Salamo²

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64 Volodymyrs'ka St. 01601, Kyiv, Ukraine;

² Institute of Nano Science and Engineering, University of Arkansas, Fayetteville, AR 72701, United States of America;

³ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky KPI", 37 Beresteyskyi av., 03056 Kyiv, Ukraine

⁴ V E Lashkaryov Institute of Semiconductors Physics, NAS of Ukraine, 41 pr. Nauki, 03028, Kyiv, Ukraine;

⁵ Department of Electrical Engineering, University of Arkansas, Fayetteville 72701, United States of America.

* kondratenko@knu.ua, *yumazur@uark.edu

Temperature- and frequency-dependent impedance was investigated for GeSn thin films epitaxially grown on Ge/Si substrates. Impedance spectroscopy facilitates identifying the contribution to conductivity of each layer and reveals temperature-dependent relaxation times and AC conductivity behavior, consistent with conduction via hopping mechanisms. Analysis of frequency-dependent AC conductivity, based on Jonscher universal power law, highlights the impact of disorder-induced localized states on electrical conduction. The findings enhance understanding of charge transport in GeSn films, providing insights critical to optimizing their performance in advanced optoelectronic devices.

Acknowledgements

The work is supported by the National Science Foundation of US under award no. EAGER 2423217 and by the National Research Foundation of Ukraine project no. 2023.03/0060.

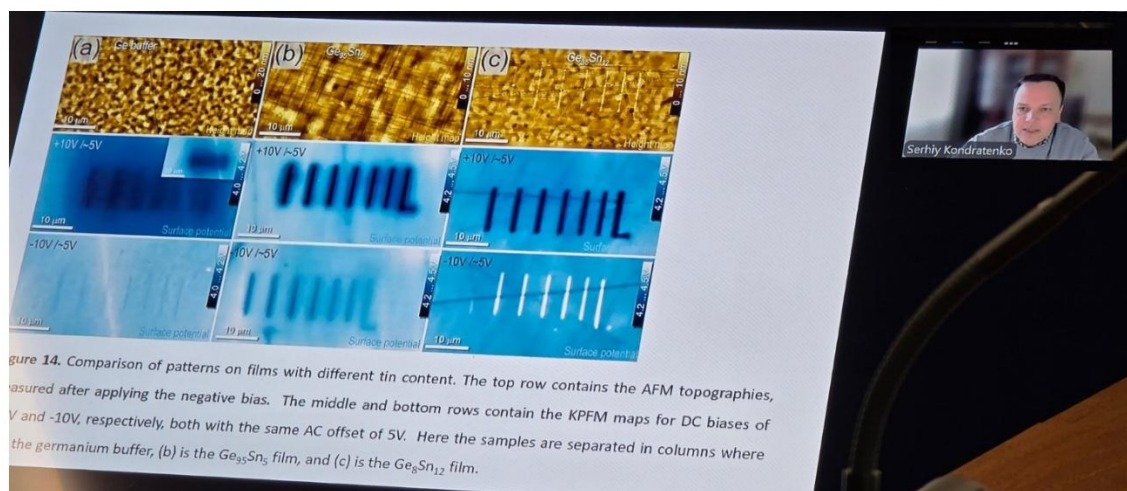


Фото з доповіді С.В. Кондратенка



Laser reduction and maskless laser lithography of Graphene Oxide films on dielectric

A.N. Nazarov^{1,2}, P.V. Lytvyn¹, A.A. Korchovy¹, V.V. Strelchuk¹, A.S. Nikolenko¹, O.M. Slobodyan¹, S.I. Tyagulskiy³, V.M. Dzhagan¹

¹Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National Technical University "Igor Sikorsky KPI", Kyiv, Ukraine

³Institute of Photonics and Electronics CAS, Praha, Czech Republic

Graphene oxide (GrO) is very promising 2D material that is widely used to form effective catalysts, chemical and biosensors, supercapacitors and solar cells. In most cases graphene oxide performs reduction to form physical properties close to graphene. Though electrical resistance of graphene oxide decreases easily with annealing temperature (10^7 times with increase of temperature from 100 to 200°C) [1] but complete loss of oxygen bonds in graphene structure demands temperature more than 500°C in vacuum or very long chemical treatment. The formation of simple graphene based electronic devices demands special photoresist and such chemicals as acetone. Using laser treatment of the graphene oxide allows us to solve both tasks – to perform maskless lithography (without using the chemicals) and effective reduction of the material.

To form CMOS compatible graphene device the graphene oxide water solution was deposited on SiO₂/Si structure by drop casting method with following heating at 50°C for 1 hour. For reduction of the GrO film and its scribing the laser with wavelength of 455 ± 5 nm and power of 5 W (Model CR-Laser Falcon Laser) was used. For reduction of the GrO film the power from 0.150 W to 0.275 W was employed, for scribing of the GrO film on SiO₂ the power more than in factor 10 was used. Obtained structures are shown in figure 1.

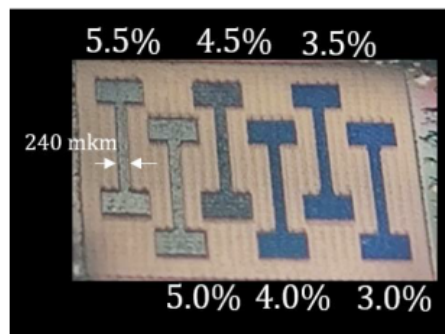


Figure 1. Photo of the GrO strips formed by laser scribing.

Analysis of electrical resistance, surface morphology and structure of the laser reduced strips and comparison with thermal annealing in air at 230°C for 15 minutes using correspondingly I-V characteristics, AFM microscopy and Raman spectroscopy was performed. It was shown that resistance of GrO strip at optimal laser reduction is considerably less than in the case of the thermal

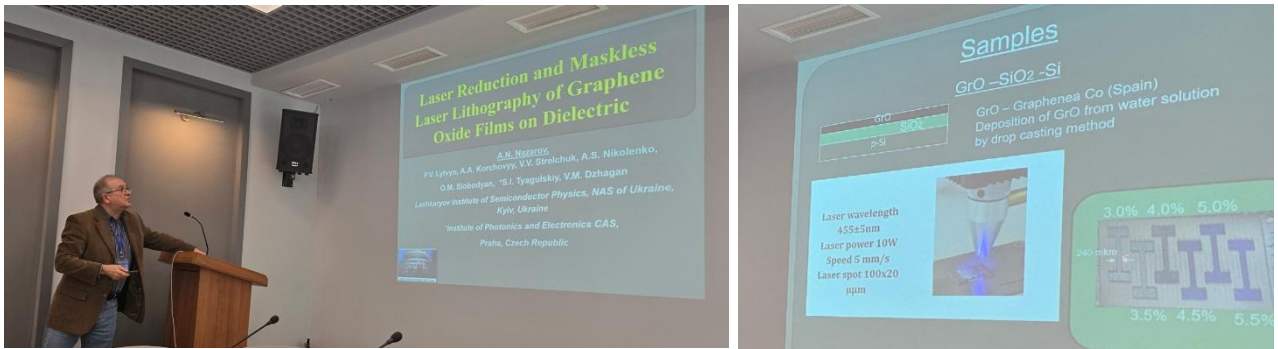


Фото з доповіді О.М. Назарова

annealing. Raman spectra show (Fig. 2) that at optimal regime of laser treatment three narrow lines corresponding to D-line at 1351.3 cm^{-1} , G-line at $1587,6 \text{ cm}^{-1}$ and 2D-line at 2700.8 cm^{-1} were formed, that is similar to defect graphene structure. Comparison of amplitudes relation D to G-lines and D- to 2D-lines attests better graphene structure in case of laser reduction of the GrO in compared with thermal reduction at 230°C for 15 minutes. In the same time surface morphology measured by AFM microscopy method testified that laser treatment forms the graphene surface with more roughness than in case of thermal annealing in air (see Fig.3). Such graphene surface can be useful for using the structures for bio- and chemical sensors.

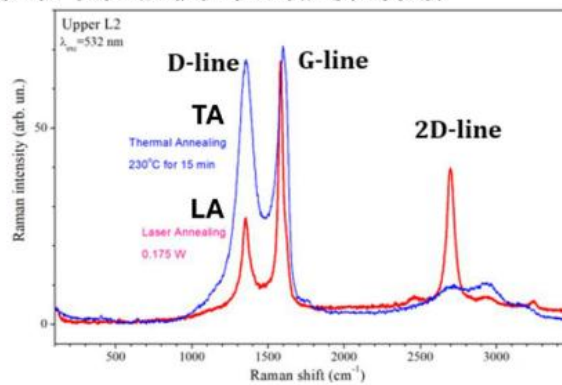


Figure 1. Raman spectra of the GrO films after laser annealing at optimal treatment regime (LA) and thermal annealing at 230°C for 15 minutes (TA).

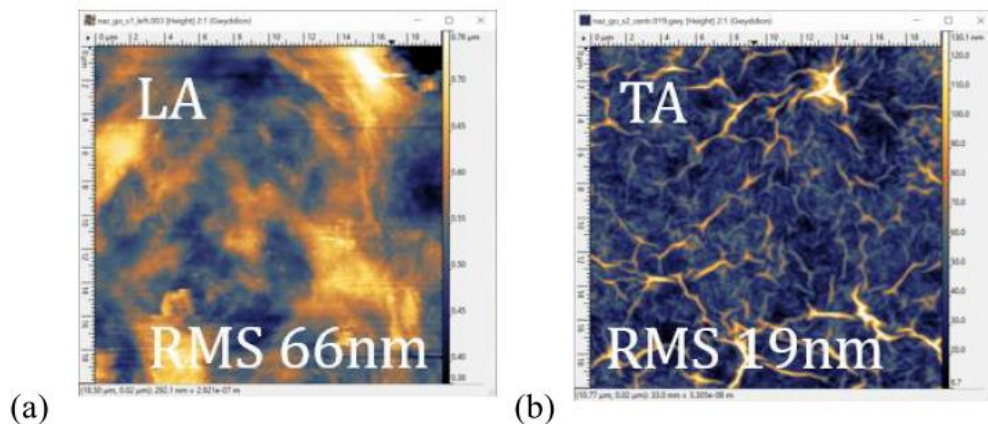


Figure 1. Surface morphology of reduced GrO measured by AFM technique for laser annealing (a) and thermal annealing (b).

Acknowledgments. The research was supported by the National Research Foundation of Ukraine (project №2023.05/0022).

analysis of electrical properties. The gas resistance sensitivity was examined by measurement of resistance between Ni contacts.

It was shown in [1] that MPECVD deposition of carbon film from methane (CH_4) results in formation of highly porous (density – 1.4 g/cm^3 , calculated porosity – 56%) but high resistance ($10^8 - 10^9 \text{ Ohm}\times\text{cm}$) amorphous film with pores size on the surface about 50 nm. Subsequent thermal annealing in vacuum at 600°C formed more dense film (density – 1.6 g/cm^3 , calculated porosity – 27%) with pores size on the surface about 10 nm and considerably less resistance (about $5\times 10^3 \text{ Ohm}\times\text{cm}$). XPS researches demonstrated that after the thermal annealing relation of sp^2/sp^3 carbon bonds in such material reached 5.5. Relative resistance sensitivity to 100 ppm ammonia in chamber was about 0.3%.

Treatment of the thermal annealed graphitized carbon film by nitrogen RF plasma led to nitrogen introduction into carbon film up to 6 at% and to considerably increase of the surface hydrophilicity. Such plasma treatment resulted in increase of resistance gas sensitivity of the film to ammonia in factor two and decrease of the sensitivity to humidity in three times [2].

Adding nitrogen into reactive gas (CH_4) resulted in strong changing of the deposited carbon film structure [3]. Density of the films decreases from 1.28 to 0.90 g/cm^3 in dependence on deposition power. Subsequent thermal annealing in vacuum at 700°C formed less dense film (density – from 0.65 to 0.75 g/cm^3 , calculated porosity – from 60% to 70%). Structure of the films in dependence of deposition power and nitrogen concentration in the gas mixture was changing from sponge-like porous structure to nanorods. XPS measurements shown that CN_x carbon films contain noticeable concentration of sp^3 carbon bonds even after high temperature vacuum annealing. Relative resistance sensitivity to 100 ppm ammonia in chamber was about 1.5% that is in factor 5 more that in case of porous graphitized carbon films.

Highly porous CN_x films was used to form of Pt nanocomposite for hydrogen evolution catalysts for water splitting. The Pt nanocomposite on base of graphitized CN_x porous film contains about 2 at% of nanoclustered Pt and can be used as catalytic layer of cathode in hydrogen electrolyzer. Test on hydrogen generation performed using typical three-electrode cell filled with 1M KOH electrolyte demonstrated that the efficiency is very similar to pure Pt plate with the same area.

[1] O.M. Slobodian, A.V. Rusavsky, A.V. Vasin et al. [Applied Surface Science](#), **V.496**, 143735 (2019)

[2] O.M. Slobodian, P.N. Okholin, P.M. Lytvyn et al. [Applied Surface Science](#), **V.544**, 148876 (2021)

[3] A. Vasin, O. Slobodian, A. Rusavsky et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **V.56** 275302 (2023)



Electron beam induced phenomena in amorphous chalcogenide semiconductors and their applications

V. Komanicky¹, V. Bilanych^{1,2}, S. Vorobiov¹, O. Shylenko¹, S. Soroka¹, V. M. Rizak², P. M. Lytvyn³

¹*Pavol Jozef Šafárik University, Park Angelinum 9, Košice 04001, Slovakia*

²*Uzhhorod National University, Pidhirna 46, Uzhhorod 88000, Ukraine*

³*V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, 03680 Kyiv, Ukraine*

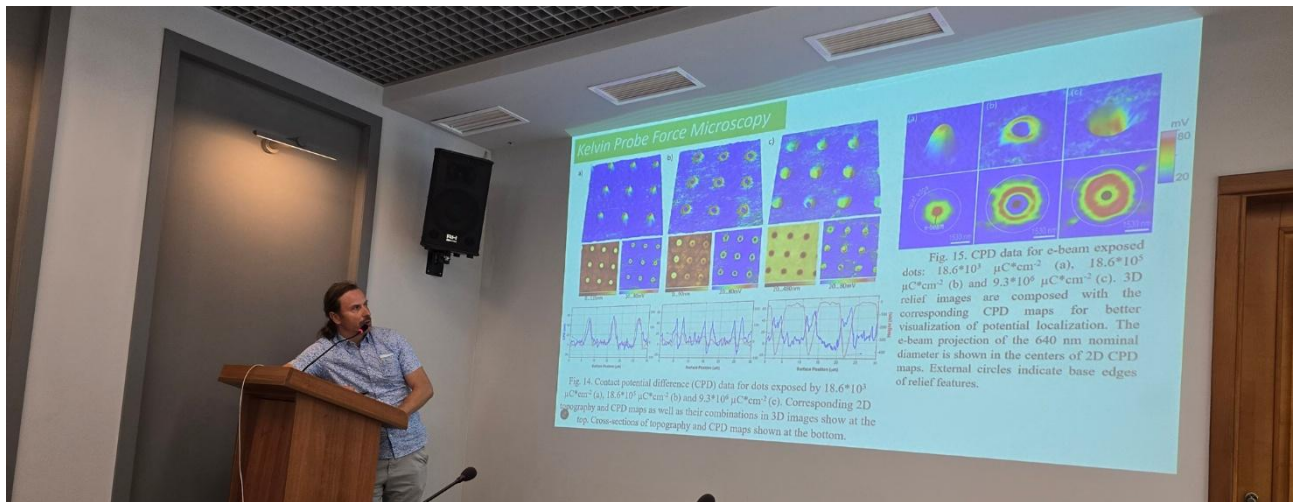
Chalcogenide glasses (ChGs) have been used as construction materials in optics and photonics for over 50 years [1]. The original articles about their applications in optical fiber production were published in the 1960s [2, 3]. Subsequently, there was significant progress in their other applications, described in numerous scientific papers [4-6], and many compositions of these materials have been tested. The most promising results for optical applications were obtained with arsenic and germanium-based chalcogenide materials. Their physical and chemical properties—such as a wide transparency range, low optical losses, stability in humid environments, high nonlinearity of optical properties, etc.—led to further technological applications.

ChGs are sensitive to electromagnetic radiation. The absorption of radiation by these materials leads to various photo-induced phenomena [7], such as photo-induced reversible phase transitions on a nanosecond time scale between two structural phases with different electromagnetic properties [8]. Thanks to this property, these materials have found broad commercial use in the production of optical recording media with writing speeds exceeding 200 Mbit/s [9]. These applications exploit the significant difference in reflectivity between the amorphous and crystalline phases. The phase transition is caused by local heating of the material using laser light. Phase transitions can also be induced by electric current. Interestingly, in addition to different reflectivity, the mentioned phases also have different electrical conductivity. This feature enabled further applications in computing technology. One of the latest is phase-change memory (PRAM), where a bit is stored in an island just a few nanometers in size, and the write energy is on the order of a picojoule [10].

The interaction of ChGs with electromagnetic radiation or an electron beam is often accompanied by visible material transport [11]. However, a deeper understanding of the fundamental processes occurring during this phenomenon is currently lacking. The groundbreaking work of Ovshinsky [9], who explained the structural changes in some types of ChGs when irradiated with electromagnetic radiation, led to many important applications of these materials in the computer industry and information storage technology.

The aim of the present work is to advance the understanding of the processes that occur during the interaction of electrons and electromagnetic radiation with ChGs, using state-of-the-art structural analysis methods and other physical techniques.

Presented work is the result of the author's systematic study of external and internal processes taking place in thin layers of ChG-based glasses under irradiation by an electron beam with energies ranging from 10–30 keV. Changes in surface morphology and surface potential after electron beam irradiation were studied using Atomic Force Microscopy (AFM) and Kelvin Probe Force Microscopy (KFM). Based on the observed surface structures, a physical model was proposed describing charge accumulation and dissipation, which explains the observed phenomena. This model will be described in detail. The



Фотом з доповіді V. Komanicky

model was later confirmed by KFM measurements and further refined. Using advanced synchrotron-based X-ray spectroscopy techniques, processes occurring during electron irradiation of these materials were studied at the atomic level. These results will be presented. Many new discovered phenomena phenomena such as the formation of surface structures during electron beam exposure, electrohydrodynamic flow, and stress-induced catalysis—have inspired several application-oriented articles and patents which also be presented.

References

1. R.J. Frerics, J. Opt. Soc. Am., New optical glasses with good transparency in the infrared, 43 (1953) 1153–1154.
2. R.R.Standler, R.E. Henderson, Infrared Physics, Infrared fiber optics technique 3 (1963) 223–227.
3. N.S. Kapany, R.S. Simms, Infrared Physics, Recent Developments in Infrared Fiber Optics 5 (1965) 69–80.
4. T. Katsuyama, H. Matsumura, Infrared Optical Fibers, Adam Hilger, Bristol (1988).
5. G.G. Devyatykh, E.M. Dianov, V.G. Plotnichenko, I.V. Skripachev, M.F. Churbanov, High-Purity Substances, Fiber Waveguides Based on High-Purity Chalcogenide Glasses 5 (1) (1991) 1–27.
6. J. Nishii, T. Yamashita, J.S. Sanghera, I.D. Aggarwal (Eds.), Infrared Fiber Optics, CRC Press, Boca Raton, FL (1998), pp. 143–183.
7. A. Elliott, S.R. Zakery, Journal of Non-Crystalline Solids, Optical Properties and Applications of Chalcogenide Glasses: A Review 330 (2003) 1–12.
8. S.R. Ovshinsky Physical Review Letters, Reversible Electrical Switching Phenomena in Disordered Structures 21 (1968) 1450–1453.
9. M. Yamada, N. Wuttig, Nature Materials, Phase-change materials for rewriteable data storage 6 (2007) 824–832.
10. W. Wuttig, M. Welnic, Materials Today, Reversible Switching in Phase-Change Materials 11 (2008) 20–27.
11. N. F. Mott and R. W. Gurney, Electronic Processes in Ionic Crystals, Dover, N.Y., 1964

Acknowledgments.

This work has been supported by the grants EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V01-00096 grants of the Slovak Research and Development Agency under contracts APVV-23-0049 and APVV-17-0059



Створення зустрічно-штирьових контактів за допомогою інтерференційної фотолітографії

Данько В.А., Минько В.І., Беляєв О.С., Індутний І.З., Мамикін С.В.
*Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
03028, Київ - 28, пр.Науки, 41, Україна*

Зустрічно-штирьові контакти (ЗШК) - це структура, що складається з двох систем металічних смужок, періодично розташованих на плоскій поверхні. Кожна система має окремий електрод, який з'єднує смужки тільки з одного краю, тобто металічний (електричний) контакт між системами відсутній. ЗШК використовуються в різних галузях науки та техніки, включаючи такі як електроніка, комп'ютерна техніка, телекомунікації і т.п. Зокрема, в сонячній енергетиці зараз дуже широко досліджується технологія «[Interdigitated Back Contact cells](#)», тобто технологія при якій сонячна комірка не має переднього електричного контакту, а задній її контакт виконано в формі зустрічно –штирьового. Прикладом застосування ЗШК є також малоінерційні детектори інфрачервоного випромінювання. Виготовляти ЗШК можна різними методами, як то штампування, лазерна різка, плавлення, лиття і т.д. Якщо ж говорити про високочастотні ЗШК з субмікронними ширинами металічних смужок, то коло технологій їх виготовлення звужується і на перший план виходять літографічні методи.

Попередні дослідження авторів показали, що системи планарних металічних структур з технологічно заданими міжелементними проміжками, що можуть складати величину до 100 нм, можна отримати методом інтерференційної фотолітографії з використанням неорганічних халькогенідних фоторезистів. Один з варіантів методу отримання планарних металічних структур за допомогою двохшарового резисту (два тонкоплівкові халькогенідні резисти, один з яких фоточутливий) забезпечував виготовлення хромової планарної структури металічних смужок [1].

В даній роботі представлено новий технологічний процес, який дозволяє створити ЗШК з субмікронними штирьовими елементами за допомогою інтерференційної літографії та деяких додаткових технологічних операцій. В якості підкладінок для формування ЗШК використовувались поліровані скляні, або ж кремнієві пластини на які методом термічного осадження у вакуумі $2,5 \cdot 10^{-3}$ Па послідовно наносились: шар металу (хром, алюміній, або золото) товщиною ~ 30 - 50 нм, та двохшаровий халькогенідний фоторезист ($As_4S_{66}Ge_{30}$ товщиною 80 нм та $As_{40}S_{30}Se_{30}$ товщиною 100 нм). Після цього пластину розміщували в оптичній схемі для запису інтерференційного світлового поля та здійснюють експонування, використовуючи випромінювання гелій-кадмієвого лазера на довжині хвилі 441,6 нм. Експонування здійснювали на віброзахищеному лазерному стенді, величина експозиції становила $0,4$ Дж/см². Період інтерференційної картини визначався величиною кута між двома когерентними пучками лазерного випромінювання, які падали на пластину з нанесеною багатшаровою структурою.

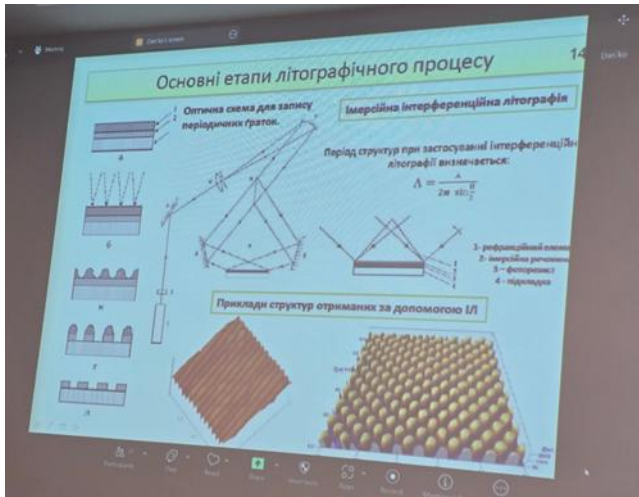
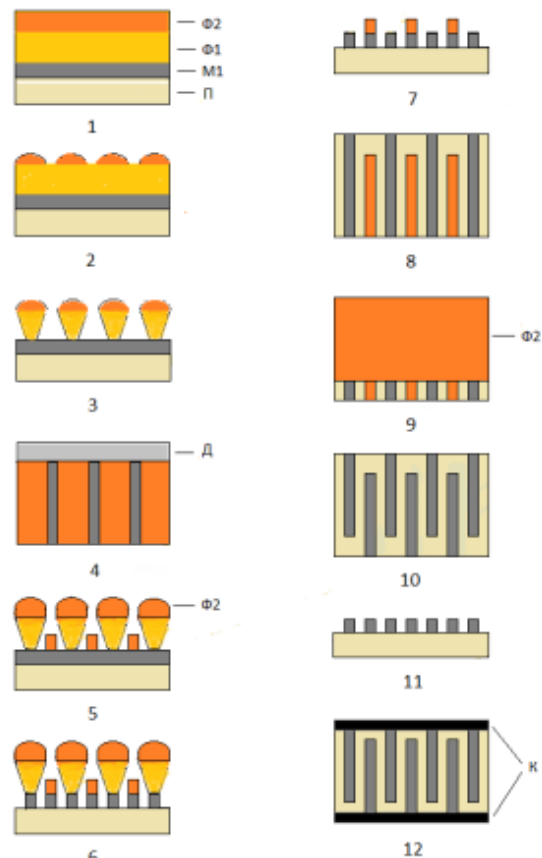


Фото з онлайн-презентації В.Данько.

Наступні технологічні операції забезпечували формування періодичної структури металевих смужок подвоєної частоти порівняно з просторовою частотою інтерференційного світлового поля, аналогічно технологічному процесу, описаному в роботі [1]. Але в даній роботі були введені додаткові операції – нанесення додаткового шару фоторезисту та почергове екранування країв металевих смужок при такому нанесенні. Це дозволило сформувати контакти до двох систем металевих смужок та отримати ЗШК заданої просторової частоти (рис. 1).

Рис. 1. Схема технологічних операцій при формуванні ЗШК. П – підкладинка, М1 – метал, Ф1 – фоторезист $As_4S_{66}Ge_{30}$, Ф2 – фоторезист $As_{40}S_{30}Se_{30}$, Д – діафрагма, К – контакти, 1 – осадження металу та фоторезисту, 2 – формування літографічної маски в шарі Ф2, 3 – часткове травлення шару Ф1, 4, 5 – екранування краю зразка діафрагмою Д та нанесення Ф2, 6 – видалення відкритих ділянок шару металу М1, 7, 8 – травлення шару Ф1 (підризна літографія), 9 – екранування протилежного краю зразка діафрагмою Д та нанесення Ф2, 10, 11 – видалення Ф2, 12 – екранування структури діафрагмою, за винятком країв, та нанесення контактів із срібно-марганцевого сплаву (К).



В результаті вдалося розробити достатньо просту і дешеву технологію формування високочастотних (просторовий період від 200 до 1000 нм) ЗШК з скважністю від 30 до 70%. Деяка модифікація проілюстрованого рис. 1 технологічного маршруту дозволяє також сформувати ЗШК, в якому дві системи штирів виготовлені з різних металів. Окрім того була продемонстрована можливість оперативно змінювати морфологічні параметри структури (розміри та частоту елементів) даних ЗШК в субмікронному інтервалі, а, відповідно, і їх функціональні частоти.



Використання поверхнево плазмонного резонансу в лавинних кремнієвих фотодіодах

Коротєєв В.В. Романюк Б., Сапон С., Кульбачинський, Мельник В. Максименко З., Дубіковський О.

Інститут фізики напівпровідників ім В.Є.Лашкарьова НАНУ м.Київ, пр.Науки 41

Кремнієвий лавинний фотодіод (ЛФД) є ключовим елементом виявлення слабких оптичних сигналів ближнього інфрачервоного ІЧ діапазону спектру для швидкодіючих систем реєстрації випромінювання та лазерного визначення відстані до сканованого об'єкту. Використання лавинних діодів дозволяє на порядки величин підвищити чутливість і, відповідно, величину і точність визначення відстані до об'єктів. Для аналізу основних електричних характеристик лавинного діода нами було розроблена теоретичну модель, яка була застосована для визначення основних параметрів та профілів легування лавинного діода на основі Si. У розрахунках використовували такі параметри: $p^- = 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $L_b = 380 \text{ мкм}$, $m_c = 6 \times 0,36m_e$ (тут m_e – маса вільного електрона, коефіцієнт 6 враховує кількість долин), $m_v = 0,81m_e$, $\varepsilon_g = 1,1 \text{ еВ}$, $\kappa_0 = 11,7$ і $\mu_{n(p)} = 1000 (500) \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$

На рисунку 1а показано поперечний переріз виготовленого кремнієвого ЛПД на платформі КМОН технології. Видно, що розроблена конструкція складається з класичного набору електроактивних n^+-p-p^+-n-p областей. Для формування n^+ -шару було використано високодозову імплантацію іонів арсену ($E = 60 \text{ кеВ}$, $D = 6.25 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) в імплантовану бором ($E = 800 \text{ кеВ}$, $D = 3.1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$) високоомну пластину Si (111) з наступними термічними обробками при температурі 1000°C 120сек в атмосфері N_2 .

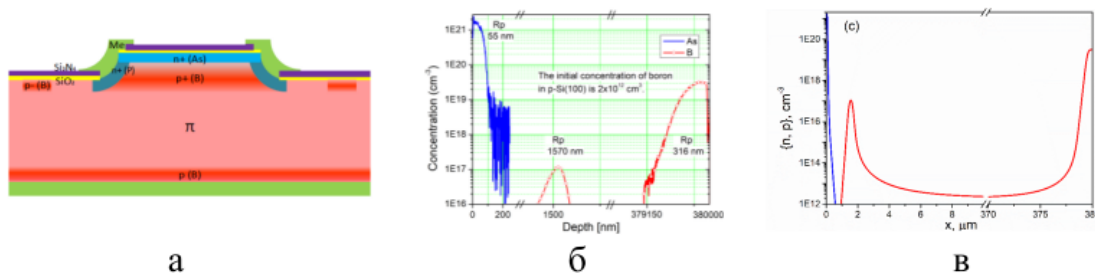


Рис.1. а) поперечний переріз виготовленого ЛПД; б) SIMS- профілі розподілу легуючих домішок; в) розрахований розподіл електронів (синя крива) та дірок (червона крива) по товщині пластини .

Для покращення фотодетекції нами було використано явище поверхневого плазмонного резонансу. Підхід ґрунтується на збудженні локальних плазмонів в 1D (одно-періодичній) металічній ґратці (Рис.2а). Таке покриття дозволяє збільшити ефективне поглинання падаючого

випромінювання в бажаній області фотодіоду, завдяки резонансному збудженню поверхневих плазмон-поляритонів та ефектів ближнього поля.

У випадку збудження плазмонного резонансу інтенсивність ближнього поля збільшується на порядок величини. Відповідно, середнє поглинання в активному шарі також збільшується. Важливо, щоб частота локалізованого ґраткового плазмона лежала за краєм фундаментального поглинання. З результатів моделювання, приведених на Рис.2б, бачимо, що ефективність поглинання по всій глибині платівки збільшилась на 1,6% тоді як в приповерхневій області поглинання структури із ґраткою не вийшло за межу структури з антивідбиваючим покриттям. Такий несуттєвий приріст може пояснюватись великою площею затінення, тому, ми вирішили нанести на поверхню наших структури наночастинки золота.

Перед нанесенням наночастинок на серії виготовлених лавинних фотодіодів йонним пучком протравлювалось оптичне вікно до активної області катоду. Далі золь-гель методом на поверхню сформованого ЛФД наносились наночастинки золота. Концентрація наночастинок становила величину ($1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$), а їх середній розмір був $\sim 17 \text{ нм}$.

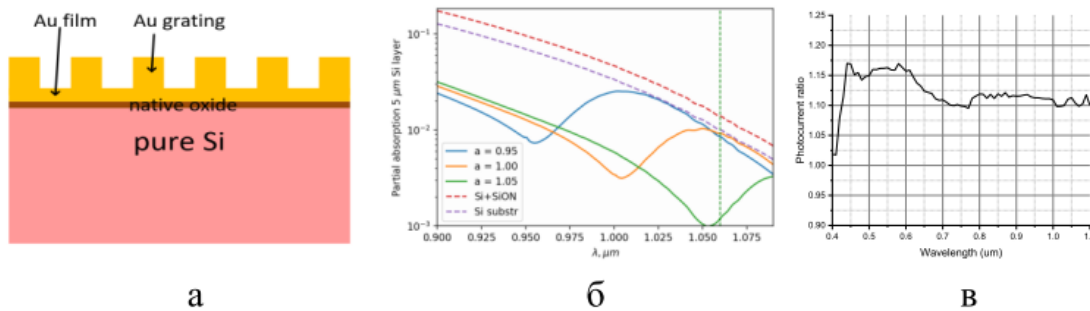


Рис.2 а) Структура поверхньої металічної ґратки б) залежності поглинання випромінювання в приповерхневій області 5 мкм від періоду ґратки, в) графік залежності співвідношення фотоструму після та до осадження наночастинок від довжини хвилі.

На Рис. 2а приведені результати вимірювання спектральних характеристик вихідних ЛФД та з нанокластерами золота. З графіків на рисунку 2б бачимо, що осадження наночастинок збільшило чутливість на $>10\%$ в діапазоні довжин хвиль від 0.9 до 1.1 мкм. Слід відмітити, що змінюючи архітектуру ґраток або геометричні розміри наночастинок можна ефективно змінювати резонансні частоти поверхневих (локалізованих) плазмонів й геометрію ближнього поля для колімації поглинання в активну область р-п переходів. Це може бути ефективно використано для створення спектрально селективних приймачів ближнього ІК.



Особливості безмаскового лазерного запису графічних зображень на тонких металевих плівках

Ю.І. Чегіль¹, О.М.Буток¹, Д.Ю.Манько¹, Є.Є. Антонов¹, В.М. Джаган²,
Корчовий А.А.².

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, 03113, Київ, вул. Шпака, 2.

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України. 03028, Київ, просп. Науки, 41

У безмасковій літографії широко застосовується технологія прямого лазерного запису на шарах фоторезистів з подальшою селективною обробкою. Перевагою цього способу є висока роздільна здатність, що дозволяє формувати елементи субмікронних розмірів. Процес створення зображень на основі фоторезистів є багатоступеневим і потребує високої чистоти при операціях селективного хімічного травлення. Для формування металевих зображень з елементами розміром у десятки мікрометрів ефективним є процес лазерної абляції металевих плівок короткими імпульсами сфокусованого лазерного випромінювання. При обробці металевих плівок перевага надається фемтосекундним імпульсам, які забезпечують високу роздільну здатність запису [1]. Було проведено дослідження запису зображень на плівках хрому товщиною 180–200 нм з оптичною щільністю 2,3–2,5 на довжині хвилі 1,06 мкм. Опромінення потужними лазерними імпульсами дозволяє формувати зображення без додаткової хімічної обробки підкладок. Зображення, отримані шляхом прямого випаровування хромових плівок сфокусованим випромінюванням ІR-гравера Raucus 30W RA20, показано на рис. 1.

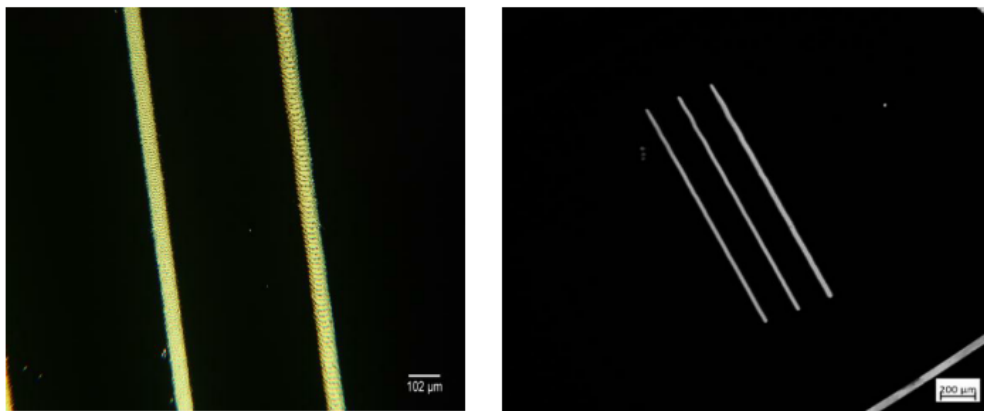


Рис.1.Зображення отримані прямим випаровуванням сфокусованим лазерним випромінюванням плівок хрому на ІR гравері Raucus 30W RA20 .

Такий режим запису зображень вимагає точного вибору параметрів експонування. Перевищення потужності лазерного

випромінювання призводить до локальної деформації підкладки. Зображення, отримані внаслідок прямого випаровування плівок хрому сфокусованим лазерним випромінюванням на ІЧ-гравері Raycus 30W RA20 з пошкодженням поверхні підкладки, наведено на рис. 2.

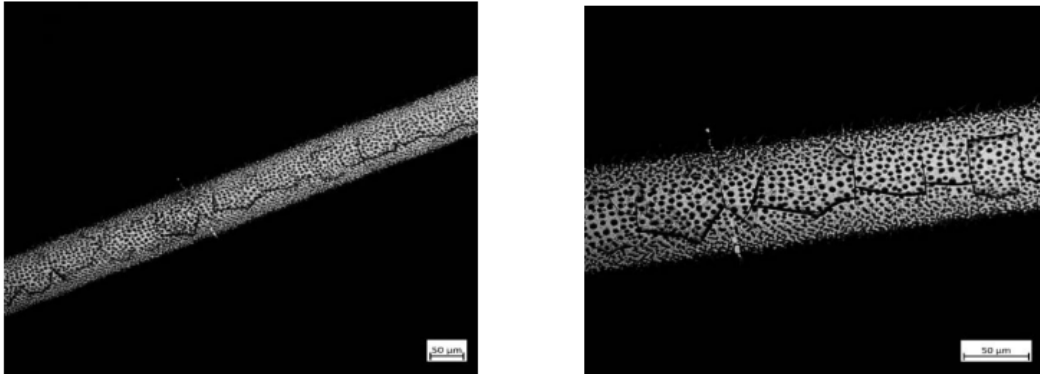


Рис.2.Зображення отримані прямим випаровуванням сфокусованим лазерним випромінюванням плівок хрому на ІЧ гравері Raycus 30W RA20 з руйнуванням поверхні підкладки .

Запис зображень здійснювався з частотою повторюваності імпульсів 40 кГц, потоком 95 Дж/см^2 з кроком по поверхні 8 мкм. Тривалість одного імпульса 150 нс. Точність фокусування лазера складала $\pm 250 \text{ мкм}$. Такий спосіб прямого абляційного запису зможе знайти реальні застосування при виготовленні лімбів та кодових дисків.

1. Продемонстровано, що опромінення тонких плівок тугоплавких металів потужними імпульсами лазерного випромінювання дає змогу формувати прецензійні графічні зображення без необхідності додаткової хімічної обробки підкладок, що спрощує технологічний процес.
2. Ефективне застосування режиму локальної абляції металевих плівок потребує точних налаштувань оптичної системи з покращеним налаштуванням вибору параметрів експонування, доповненої набором лінійних оптичних фільтрів і контролем температури та атмосфери для запобігання небажаних ушкоджень підкладки.

Дослідження виконані за підтримки Національного фонду досліджень України грант 2023.04/004, 2023.05/0022.



Аналіз можливостей прямого лазерного запису з створення структур з субмікронними розмірами

А.А. Крючин, В.В. Петров, Є.В. Беляк, І.В. Косяк

Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України

Технологія прямого лазерного запису (Direct Laser Writing, DLW), як методика безмаскової фотолітографії мікророзмірних і нанорозмірних структур, на сьогоднішній день набуває значного поширення у галузі оптоелектроніки. Зазначається, що відповідна технологія надає широкий інструментарій з виготовлення високоякісних дифракційних оптичних елементів (Diffractive Optical Elements, DOE) різних типів і призначення у відповідності до швидкого росту вимог сучасного нанотехнологічного виробництва. При цьому необхідно вказати на важливість дотримання вимог із роздільної здатності та швидкості формування субмікронних структур системою прямого лазерного запису при виготовленні метаповерхонь, які використовуються для керування світловими потоками, як то концентричних кільцевих металінз [1]. При цьому основними перевагами технології прямого лазерного запису є здатність створювати реконфігуровані метаповерхні на основі фоточутливих матеріалів завдяки відсутності необхідності у застосуванні фотошаблону, що дозволяє додатково прискорити процес виготовлення та підвищити якість виготовлених структур. Як показали проведені нами експериментальні дослідження впровадження технології прямого лазерного запису також дозволяє суттєво збільшити роздільну здатність фотолітографічного процесу [2]. На розмір елементів, які формуються в процесі прямого лазерного запису значний вплив мають характеристики лазерного випромінювання, такі як розподіл інтенсивності сфокусованого лазерного променя, швидкість сканування та точність фокусування. Принципове значення для формування субмікронних структур має використання нелінійної взаємодії лазера з фоточутливим матеріалом на основі якого проводиться фотолітографічна процедура. Запис патерну інформаційної структури сфокусованим лазерним променем з неоднорідним розподілом при такій взаємодії дозволяє обійти обмеження у роздільній здатності, які визначаються критерієм Релея [3]. При цьому для досягнення високої точності у записі субмікронних елементів необхідно забезпечити високу точність роботи системи автофокусування лазерного випромінювання. В режимі запису з використанням нелінійної взаємодії лазера з фоточутливим матеріалом коливання щільності потужності експонуючого випромінювання приводять до значних змін у розмірі записаних елементів, порушуючи інформаційну структуру.

Також важливим аспектом формування з застосуванням технології прямого лазерного запису патернів інформаційних структур є програмування процесу переміщення сфокусованого лазерного променя або рух підкладки з фоточутливим матеріалом відносно нього. У результаті проведення серії експериментальних досліджень було запропоновано і реалізовано оптимальний варіант прямого лазерного запису растрових оптичних структур. Дискава підкладка в процесі запису дифракційних елементів розміщується на планшайбі – поворотному столі шпинделя і фіксується вакуумною системою. Для забезпечення високої роздільної здатності фотолітографічного процесу було використано шпиндель на аеростатичних опорах, який забезпечує мінімальні радіальні биття. При технології прямого лазерного запису на круговій лазерній записуючій системі, на відміну від технології лазерного запису фотошаблонів в декартових координатах, експонування здійснюється

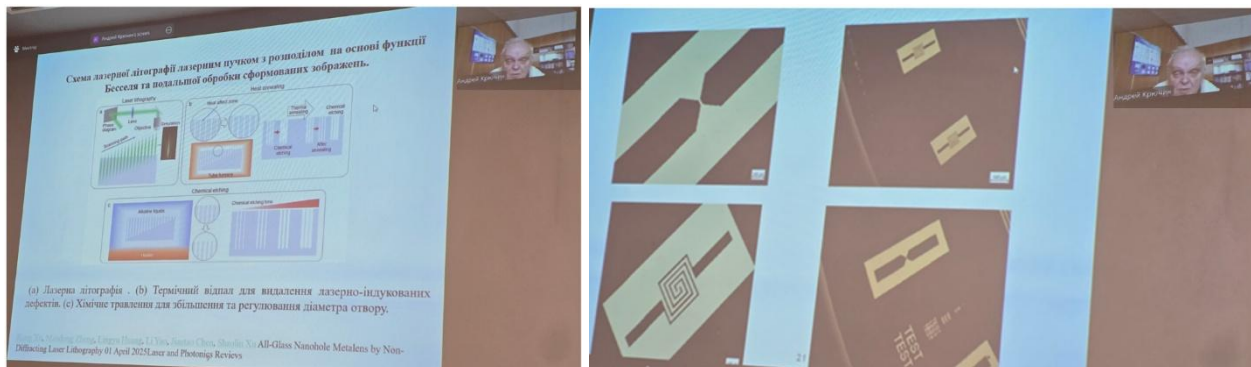


Фото онлайн-презентації А.Крючина

сфокусованим лазерним променем при високих швидкостях сканування у 0,3-0,6 м/с. При виготовленні елемента інформаційної структури підкладка зі світлочутливим матеріалом безперервно обертається, у той час як записуючий промінь повільно рухається у радіальному напрямку від центру до краю відповідно до заданого патерну. Переміщення променя у радіальному напрямку з заданою точністю забезпечує схема управління лінійним приводом позиціонера на основі лазерного цифрового інтерференційного далекоміра з абсолютним відліком координати. Роздільна здатність сформованих радіальних оптичних структур на підкладці методом прямого лазерного запису залежить по осі y від кроку переміщення позиціонера, а по осі x від кількості секторних міток кутового референтного енкодера. Запропонований пристрій прямого лазерного запису дифракційних оптичних елементів, таким чином, дозволяє записувати растрові оптичні структури довільної форми [4]. Значна увага, що приділяється розробці та впровадженню методів подальшого збільшення якості патернів інформаційної структури отриманих методом прямого лазерного запису, головним чином спрямована на виправлення округлення кутів і скорочення кінців ліній інформаційних елементів. Для цього використовується контрольована зміна розподілу енергії експонування, що надає можливість покращити зазначені показники [5].

1. Zhao Jin, Yu Lin, Chengmiao Wang, Yeming Han, Bowen Li, Jianyu Zhang, Xin Zhang, Ping Jia, Yueqiang Hu, Qing Liu, Huigao Duan, Jan G. Korvink, Yingchao Li, Huilin Jiang, and Yongbo Deng, "Topologically optimized concentric-nanoring metalens with 1 mm diameter, 0.8 NA and 600 nm imaging resolution in the visible," *Opt. Express* **31**, 10489-10499 (2023) <https://doi.org/10.1364/OE.478680>
2. Petrov V.V., Kryuchyn A.A., Beliak Ie.V., Manko D.Yu., Kosyak I.V., Melnik O.G. Advantages of direct laser writing for enhancing the resolution of diffractive optical element fabrication processes. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2024. V.25, No 3, P. 587-594. DOI: 10.15330/pcss.25.3.587-594.
3. Wang, Shu & Zhou, Zhican & Bo, Li & Wang, Cong & Liu, Qian. (2021). Progresses on New Generation Laser Direct Writing Technique. *Materials Today Nano*. 16. 100142. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2021.100142>.
4. І.В. Косяк, О.А. Цубін Формування радіальних оптичних структур на круговій лазерній записуючій системі Реєстрація, зберігання і обробка даних 2024, Т. 26, N 1, С. 3-8. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308326>.
5. Yang, S., Zhang, L., & Wei, Y. (2020a). Model-based image quality optimization for submicron direct laser writing. *AIP Advances*, 10 (12). <https://doi.org/10.1063/6.0000595>.

Дослідження виконані за підтримки Національного фонду досліджень України
грант2023.04/004



Плоско-фокусувальна оптика для напівпровідникових концентраторних сонячних фотоперетворювачів

Крючин А.А., Антонов С.С., Зенін В.М.

*Інститут проблем реєстрації інформації НАН України,
Україна, 03113, м. Київ, вул. М.Шпака, 2. E-mail: kryuchyn@gmail.com*

Сонячні концентраторні фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) сьогодні широко використовуються для генерування електрики [1-2]. Основною перевагою таких систем порівняно з традиційними кремнієвими ФЕП є економія фотоелектричних матеріалів, яка прямо пропорційна кратності k_C концентрування сонячного світла і може перебільшувати навіть $k_C = 500-1000$ [3]. Також є можливість використання в сонячних модулях багато-каскадних напівпровідникових матеріалів на основі арсеніду галію з ефективністю 40-45 %, що майже втричі перевищує такий коефіцієнт для кремнію (16-25 %).

Зазвичай концентрування сонячного світла в існуючих сонячних модулях здійснюється традиційними плоскими лінзами Френеля, які створюють на поверхні фотоперетворювача нерівномірне освітлення, розподіл якого близький до гаусового. Це призводить до генерування різної напруги по поверхні ФЕП, внаслідок чого виникають небажані бічні омичні втрати електрики, а також виникає значний додатковий нагрів поверхні модуля. Тому запропоновано різні конструкції оптичних систем для гомогенізації освітлення поверхні ТЕП [4], найчастіше з використанням двох-лінзової або полігональної оптики [5], які досить коштовні і складні для практичного масового виготовлення.

В нашому інституті розроблено плоскі жорсткі мікропризмові лінзи Френеля [3], які створюють в фокальній площині фотоприймача практично гомогенне освітлення необхідного розміру і тому повністю усувають зазначені проблеми. Фокусна відстань таких плоско-фокусувальних лінз може бути будь-якою в межах критичних заломлюючих кутів мікропризм. Для масового тиражування створених плоско-фокусувальних лінз розроблено алгоритми моделювання параметрів матриць таких лінз і методом прецизійного алмазного мікроточіння (АМТ) виготовлено з спеціального алюмінієвого сплаву W-95 штамп-матриці для формування методом термопресування необхідної кількості фінішних виробів з оптичного полікарбонату [6].

Загальний вигляд однієї з виготовлених таких штамп-матриць #31m для формування лінз сонячного модулю з кратністю концентрації $k_C = 280$ (а), зображення сформованої з використанням цієї матриці відповідної лінзи #31m-#06 (б) та форма фокальної світлової плями радіусом $r_V = 1,5$ мм на екрані для номінального фокусу $f_0 = 40$ мм для цієї лінзи в пройденому паралельному колімованому потоці (зовнішнє світлове коло діаметром $D_S = 59$ мм) від діагностичного "зеленого" лазера з довжиною хвилі $\lambda = 0,532$ нм (в) наведено на рисунку 1.

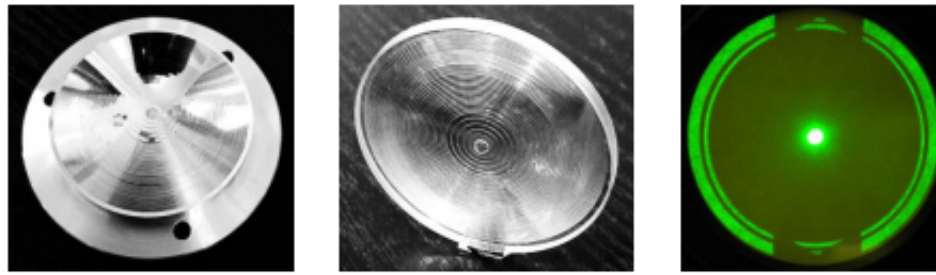


Рисунок 1. Матриця #31m (а), лінза #31m-#06 (б), фокальна пляма (в)

Розподіл освітленості на екрані для цієї лінзи #31m-#06 для різних відстаней спостереження $L=39$ (а), 40 (б) та 41 мм (в) наведено на рисунку 2. Профілі отримано за допомогою програми *Image J 1.53* [6]. Для номінальної відстані $L_0=f_0=40$ мм профіль практично гомогенний, при навіть невеликих змінах відстані L профілі істотно змінюються.

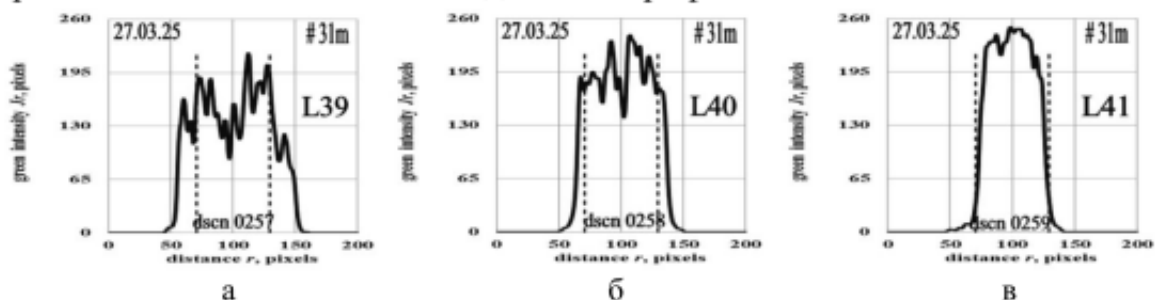


Рисунок 2. Профілі зображень для лінзи #31m-#06: $L=39$ (а), 40 (б), 41 мм (в)

Таким чином, створено мікропризмові плоско-фокусувальні лінзи, які можна використовувати в концентраторних сонячних модулях для досягнення оптимального режиму освітленості поверхні ТЕП.

1. Xie W.T., Dai Y.I., R.Z. Wang R.Z., Sumathy K. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. V.15. P. 2588-2606. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.031>.

2. Baig H, Heasman KC, Mallick TK. Nonuniform illumination in concentrating solar cells. *Renew Sustain Energy Rev*. 2012. V.16. P. 5890–5909. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.020>.

3. Antonov E.E., Kondratenko S.V., Lysenko V.S., Petrov V.V., Zenin V.N. Microprismatic plane-focusing Fresnel lenses for light concentration in solar photovoltaic modules. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 2023. V.26, # 2. P.188-200. <https://doi.org/10.15407/spqeo26.02.188>.

4. Jin N.T.Y., Lim Z.H., Zhou G., Liu K., Kumar A.S. Design and fabrication of composite polygonal Fresnel lenses. *Optics Express*. 2021. V.29, No.22. # 436290. P. 36516–36534. <https://doi.org/10.1364/OE.436290>.

5. Benítez P., Minano J.C., Zamora P., Mohedano R., Cvetkovic A., Buljan M., Chaves J., Hernández M. High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator. *Optics Express*, 2010. V.18, No.S1. #122958, P.A25-A40. <https://doi.org/10.1364/OE.18.000A25>.

6. Fu M.L., Antonov E.E., Lysenko V.S., Petrov V.V., Zenin V.N. Uniform Illumination of Concentrated Sunlight in Photovoltaic Solar Modules with Plane-Focusing Fresnel Lenses. *IEEE Photonics Journal*, 2024. V.16, No.3, #5000511. P.1-11. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2024.3402070>.



Raman and photoluminescence spectroscopy of laser-induced structural phase transition in polycrystalline VO₂

Danylenko I.M., Maziar D.M., Kolomys O.F., Strelchuk V.V., Dzhahan V.M.,
Dubikovskiy O.V.

*V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine,
Prospect Nauky, 41, Kyiv-03028, Ukraine
E-mail: igor.tesV@gmail.com*

Vanadium oxides (VO_x) constitute a class of transition metal oxides with diverse oxidation states (V²⁺ to V⁺⁵) and crystal structures, leading to unique electronic, optical, and catalytic properties and making them highly adaptable for a range of advanced technologies. Structural modifications in VO₂, including the formation of higher oxides such as V₆O₁₃ or V₂O₅, can be induced by laser thermal effects or ionizing high-energy radiation. In oxygen-rich environments, this process is further accelerated due to the interaction of activated oxygen species with radiation-induced defects in the crystal lattice.

In this study, we investigate laser-induced structural changes in vanadium oxide around the metal-insulator transition (MIT) as a function of laser irradiation power. The optical properties of the VO₂ films during the phase transition process were investigated using in-situ temperature- and excitation-dependent Raman and photoluminescence (PL) spectroscopy - a non-destructive and effective method for identifying and mapping their spatial distribution.

As clearly shown in Fig. 1, the vibrational bands of vanadium oxide exhibit spectral changes as a function of laser irradiation power. Well-defined intense narrow phonon bands of A_g and B_g symmetry of the monoclinic VO₂(M1) phase are observed in the Stokes and Anti-Stokes Raman spectra at low laser power excitation ~10 MW/m², λ_{exc} = 532 nm (Fig. 1a).

As shown by the analysis of the intensity ratio of the vibrational bands in Stokes and anti-Stokes Raman spectra laser excitation power ~25 MW/m² on the sample surface could cause instantaneous local heating up to more than 70°C. It is known that as the temperature increases to T_c ≈ 67 °C, a metal-insulator transition occurs, resulting in a gradual decrease in the intensity of the Raman peaks corresponding to the monoclinic VO₂(M1) phase with their subsequent disappearance. At the same time, a broad bands corresponding to the tetragonal rutile VO₂(R) phase are registered in the Raman spectrum. This phenomenon mainly originates from the structural phase transition in VO₂ caused by the laser-induced accumulation of thermal effects.

Further increase in laser irradiation power above 50 MW/m² induces a gradual structural transformation from of VO₂(R) to V₂O₅ phase via the intermediate V₆O₁₃ phase due to the increase in temperature and interaction with an oxygen atmosphere.

The laser heating process induces a reaction between VO_2 and oxygen in the air: $4\text{VO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{V}_2\text{O}_5$. This structural change is irreversible. The research indicates that laser irradiation of an oxide material can significantly influence deviations in oxygen stoichiometry. Laser irradiation of VO_2 promotes the gradual diffusion of oxygen from the air into the surface of thin films. The resulting V_xO_y thin film exhibits varying stoichiometries as the oxygen content increases.

In order to investigate the inter- and intraband transitions in V_2O_5 structure prepared using laser irradiation at a laser power density of 100 MW/m^2 , the PL spectra of the films were measured at temperatures from 78 to 438 K. The V_2O_5 PL spectra exhibit two bands at 2.0 eV and 1.8 eV caused by the interband transitions from the conduction band to the valence band and intraband transitions of oxygen vacancies, respectively. The position of the PL bands showed a strong dependence on temperature, with a gradual high-energy shift (from 1.94 and 1.82 at 78 K to 2.06 and 1.88 eV at 450 K, Fig. 1b), and a decrease in oxygen vacancies contribution with temperature, as evidenced by the redistribution of low- and high-energy band intensities. The presence of oxygen vacancies and structural defects (e.g., from phase transitions) can significantly enhance PL, particularly in the visible range. As the temperature increases, the contribution of defect-related emission decreases, indicating improved structural quality of the V_2O_5 film.

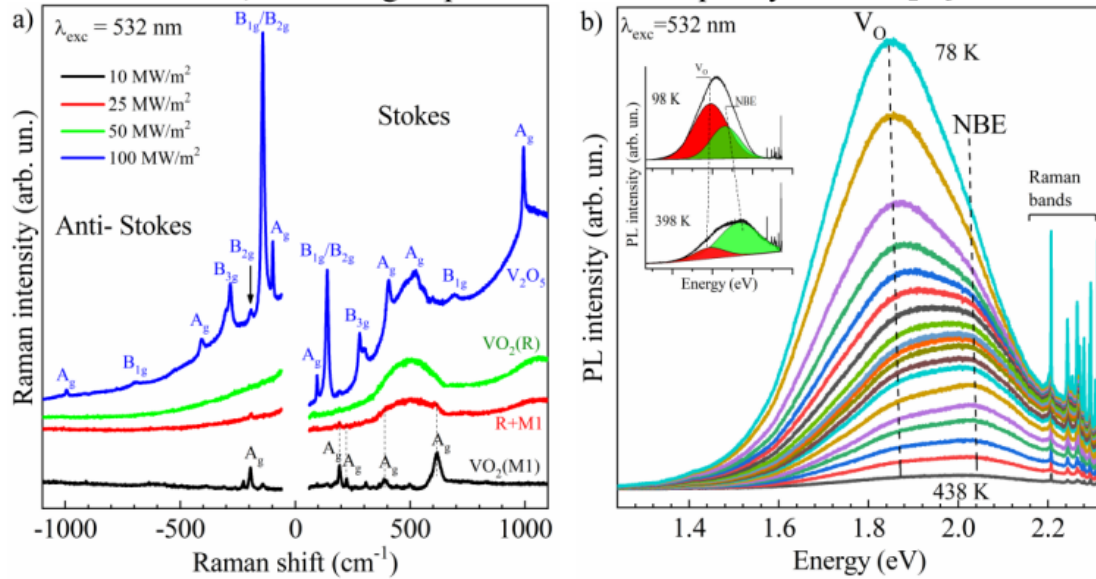


Figure 1. a) Stokes and anti-Stokes Raman spectra of VO_2 films at varied laser powers; b) Temperature-dependent PL spectra of VO_2 films. $\lambda_{\text{exc}} = 532 \text{ nm}$.

The obtained results enhance understanding of the physical properties of vanadium oxide and its structural and phase transformations, which is essential for further application in semiconductor devices. Using optical techniques to study changes in optical properties and phase transition mechanisms under laser irradiation of VO_2 films will be beneficial for the further development of phase transition materials.

The work was financially supported by National Research foundation, grant by NRFU project #2023.05/0022 by S.V.V., D.V.M. and grant # 2023.04/0026 for M.D.M., K.O.F. and grant №08/01-2025(6).



Structural studies of Ge-Sb-Se alloys

Kochubei H.¹, Stronski A.¹, Dzhagan V.¹, Shportko K.¹, Shamrovska P.²,
Zahn D.R.T.²

1- V.Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

2-Chemnitz University of Technology, Chemnitz, Germany

kochubei.hanna@gmail.com

Ge-Sb-Se alloys possess a broad glass formation region, enabling customizable properties through compositional adjustments [1-4]. These alloys are characterized by high nonlinear optical properties, excellent transmission in the IR, and notable acousto-optic properties [2]. Such features allow for targeted optimization of the material's parameters, making them suitable for diverse applications, including optical sensors, infrared lenses, amplifiers, and switching components in optical communication systems.

In this work, the $\text{Ge}_{16}\text{Sb}_{24}\text{Se}_{60}$ alloy was studied by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. The alloy under study was obtained by the traditional melt quenching method. Using the Rad GTK+ software, the radial distribution function was calculated from which the radius of the first and second coordination spheres was obtained, and the bond angle Θ was calculated.

The position of the first peak of the radial distribution function (RDF) gives the distance to the nearest neighbor r_1 , and similarly, the position of the second peak gives the distance to the next neighbor r_2 . The RDF provides only a limited amount of information, which is essentially limited to the local structure around a given atom, i.e. bond lengths and bond angles. Knowing both bond lengths r_1 and r_2 allows us to obtain the value of the bond angle θ . The values of r_1 and r_2 obtained from the radial distribution function of $\text{Ge}_{16}\text{Sb}_{24}\text{Se}_{60}$ glasses were 2.56 and 3.79 Å, respectively, and the value of the bond angle θ was 95.5° .

Diffraction and EXAFS studies [1] have shown that the structure of Ge-Sb-Se glasses can be described by the chemical ordered network model (CONM). According to the CONM model, in the Ge-Sb-Se system, the bonds between M and Se ($M = \text{Ge}$ or Sb) are predominant, and the number of M-M and Se-Se bonds is minimized. The network is constructed from structural units such as $\text{GeSe}_{4/2}$ or $\text{SbSe}_{3/2}$, which are connected by their corners and edges or through Se-Se bridges in Se-rich glasses. In systems with low Se content, where there are not enough Se atoms to satisfy the binding needs of M atoms, M-M bonds are also expected to be present [1]. According to [3], the lengths of the bonds are in the range: Ge-Se 2.36-2.37 Å, Ge-Ge - 2.45-2.46 Å, Sb-Se - (2.58-2.59 Å). It is noted that the structure of the $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{20}\text{Se}_{60}$ glass (which is quite close in composition to the $\text{Ge}_{16}\text{Sb}_{24}\text{Se}_{60}$ glasses studied in this work) corresponds to the model of a chemical ordered network and that, along with the structural units $\text{GeSe}_{4/2}$ and $\text{SbSe}_{3/2}$, there are $\text{Se}_{3/2}\text{Ge-Ge}(\text{Sb})\text{Se}_{3/2}$ blocks to compensate for selenium deficiency [3]. The obtained values of r_1 and r_2 and θ for the studied $\text{Ge}_{16}\text{Sb}_{24}\text{Se}_{60}$ glasses are consistent with the literature data for other Ge-Sb-Se glass compositions.



Фото онлайн-презентації Ганни Кочубей

Raman spectroscopy was used to obtain structural information. The following bands can be recognized in the Raman spectra of Ge-Sb-Se glasses [4], which correspond to the vibrations of the corresponding structural units: $\sim 100 \text{ cm}^{-1}$ band - vibrations in $\text{Sb-Se}_{3/2}$ pyramids, $\sim 150 \text{ cm}^{-1}$ band - Sb-Sb vibrations in $\text{Se}_2\text{Sb-SbSe}_2$, $\sim 170 \text{ cm}^{-1}$ band - Ge-Ge vibrations in $\text{Ge-Se}_{4-n}\text{Ge}_n$, $\sim 190 \text{ cm}^{-1}$ band - Sb-Se stretching vibrations in $\text{Sb-Se}_{3/2}$ pyramids, $\sim 200 \text{ cm}^{-1}$ band - symmetric stretching vibrations of angular $\text{GeSe}_{4/2}$ tetrahedra, band $\sim 215 \text{ cm}^{-1}$ - vibrations of $\text{GeSe}_{4/2}$ tetrahedra, bands in the region $\sim 235\text{-}250 \text{ cm}^{-1}$ - vibrations of different structural units of Se, band $\sim 265 \text{ cm}^{-1}$ - vibrations of angular $\text{GeSe}_{4/2}$ tetrahedra, band in the region $\sim 285\text{-}300 \text{ cm}^{-1}$ - asymmetric vibrations of $\text{GeSe}_{4/2}$ tetrahedra. The spectra of Raman light scattering of the studied $\text{Ge}_{16}\text{Sb}_{24}\text{Se}_{60}$ glasses were decomposed using the above-mentioned bands ($156, 170, 190, 201, 216, 232, 267 \text{ cm}^{-1}$) [4], and a good agreement with the experimental spectra was obtained. Raman experiments show the presence of $\text{GeSe}_{4/2}$ and $\text{SbSe}_{3/2}$ structural units in $\text{Ge}_{16}\text{Sb}_{24}\text{Se}_{60}$ glasses, as well as some chemical ordering disorders in the form of Se-Se and M-M bonds. However, further studies of their structure at the atomic level are still needed to help us better understand their structural properties.

ACKNOWLEDGEMENTS H.Kochubei has a pleasure to acknowledge support by project DAAD №57703089 . The work was partially supported by the priority research programmes of NAS of Ukraine (0125U000799)

1. Pethes, R. Chahal, V. Nazabal, C. Prestipino, S. Michalik, J. Darpentigny, P. Jónvári, Chemical order in Ge-Ga-Sb-Se glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Volume 484, 2018, Pages 49-56, ISSN 0022-3093, <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.01.017>.

2. Grayson, Michael & Zohrabi, Mo & Bae, Kyuyoung & Zhu, Jiangang & Gopinath, Juliet & Park, Wounjhang. (2019). Enhancement of third-order nonlinearity of thermally evaporated GeSbSe waveguides through annealing. *Optics Express*. 27. 33606. 10.1364/OE.27.033606.

3. Pethes, R. Chahal, V. Nazabal, C. Prestipino, A. Trapananti, S. Michalik, et al., Chemical ShortRange Order in Selenide and Telluride Glasses, *J. Phys. Chem. B*. 120 (2016) 9204–9214. doi:10.1021/acs.jpcc.6b05996.

4. R. Svoboda, J. Máleka, M. Liška Correlation between the structure and structural relaxation data for $(\text{GeSe}_2)_y(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_{1-y}$ glasses *Journal of Non-Crystalline Solids* 505 (2019) 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.11.013>



The stabilization of azimuthal anchoring of LIPSS-modified SiO₂ surfaces by polymer post-treatment

I. Gvozдовskyy¹, H. Bohatryyova¹, S. Schwarz², K. Bischoff², R. Hellmann², I. Koshets³, A. Korchovij³, P. Lytvyn³, S. Chernyshuk¹

¹Institute of Physics, NAS of Ukraine, 46 Nauky ave., Kyiv, 03028, Ukraine

²University of Applied Sciences, Würzburger Straße 45, 63743 Aschaffenburg, Germany

³V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, 41 Nauky ave., Kyiv, 03028, Ukraine

Today there exist various methods of processing of surface to obtain a uniform alignment of liquid crystals (LCs), *e.g.*, rubbing [1], photoalignment [2] and many other methods [3-7]. We should also highlight the perspective technique of alignment of LCs based on the laser-induced periodic surface structuring (LIPSS) recently studied in detail [8,9].

It is generally known that one of the main characteristics of aligning layer, possessing by anisotropic features, is the anchoring energy (AE), which is connected with period Λ and depth A of nanogrooves as follows [10]:

$$W_B = 2\pi^3 \times A^2 \times \frac{K}{\Lambda^3} \quad (1),$$

where K is the average value of elastic constants of the splay K_{11} , twist K_{22} and bend K_{33} deformation of LC.

The dependence of value of the azimuthal AE (AAE) on the depth A of nanogrooves of the LIPSS-treated titanium surfaces was early studied in [8].

The aligning features of transparent dielectric material, *e.g.*, sapphire, was studied in [11]. Due to some difficulties during LIPSS processing of surface, so-called *zebra-like* layer with periodic alternating both the nanostructured line and unstructured gap is formed [12] (Figure 1).

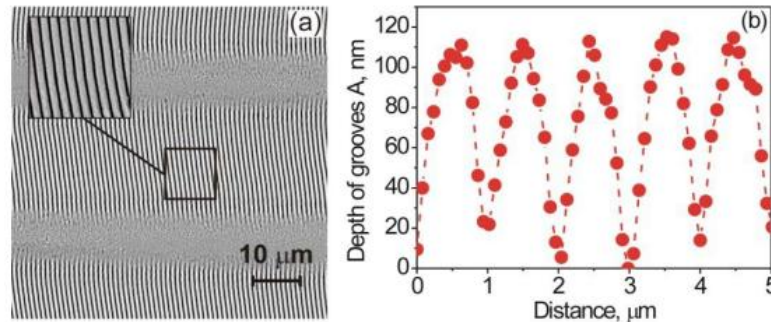


Figure 1. (a) SEM image of *zebra-like* layer. (b) The cross-section of the nanostructured line taken with the AFM.

As has been suggested previously [11,12], to increase the azimuthal anchoring the nanostructured surface is covered with polymer PI2555. The use of photosensitive polymer PVCN-F allows changing of AAE depending on irradiation conditions (*e.g.*, relative orientation between the light polarization and direction of nanogrooves) [12].

In this work the influence of nanogrooves period Λ (Eq. 1) on the value of AAE of the LIPSS-treated SiO_2 surfaces was studied. For this purpose, the femtosecond lasers with various wavelengths were used. Owing to the use of different lasers *zebra*-like layers are characterized by various periods Λ of nanogrooves (*i.e.*, 352, 556 and 1111 nm) and various width L of unstructured gaps (from 5 to 17 μm with a step of 2 μm). It was obtained that the decrease of the nanogrooves period Λ leads to increase of AAE (Figure 2a).

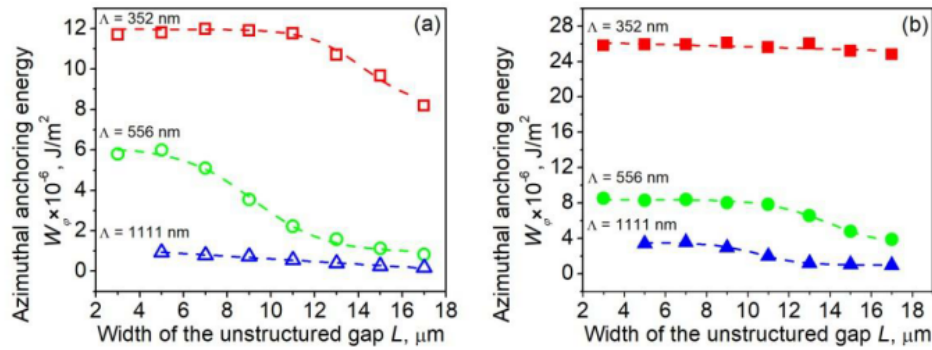


Figure 2. Dependence of AAE value for pure (a) and coated by polymer (b) *zebra*-like layer possessing by various nanogrooves periods Λ on width L of the unstructured gap.

Figure 2b shows both increasing of AAE value and enhancing of stabilization of azimuthal anchoring (*i.e.*, when AAE does not change from width L of unstructured gap) after polyimide coating on the *zebra*-like surfaces having various periods Λ of nanogrooves and widths A of unstructured gaps. LIPSS-treated surfaces possessing 352 nm period covered with a layer of polyimide PI2555 are a very promising for future applications.

Acknowledgments: The authors I.G., H.B., I.K., P.L., A.K and S.C. thank warriors of the Armed Force of Ukraine who are protecting us during genocidal war in Ukraine.

Reference:

1. J. Cognard, Alignment of Nematic Liquid Crystals and Their Mixtures. London, New York, Paris. Gordon&Breach Science Publishers, 1982.
2. Yaroshchuk O, et al. J Mater Chem. 2012; 22: 286-300.
3. O. Yaroshchuk, et al. Liquid Crystals. 31 (2004) 859-869.
4. D. Dumont, et al. Mol. Cryst. Liq. Cryst. 375 (2002) 341-352.
5. P. Chaudhari, et al. Nature. 411 (2001) 56-59.
6. S. Y. Chou, et al. Science. 272 (1996) 85-87.
7. T.-C. Lin, et al. Soft Matt. 5 (2009) 3672-3676.
8. I. Pavlov, et al. Liq. Cryst. 45 (2018) 1265-1271.
9. I. Pavlov, et al. Liq. Cryst. 48 (2021) 131-149.
10. D.W. Berreman. Mol. Cryst. Liq. Cryst. 23 (1973) 215-231.
11. I. Gvozдовskyy, et al. Nanomater. 12 (2022) 508-1-15.
12. I. Gvozдовskyy, et al. J. Mol. Liq. 387 (2023) 122623-1-13.



Use of chalcogenide films as photo- and electronic resists for the production of master originals of security elements using single-step dry lithography technology

V.Bilanych¹, S.Vorobiov², B.Bilanych¹, Yu.Matyovka¹, V.Rizak¹, A.Feher², V.Komanicky²

¹*Uzhhorod National University, Pidhirna 46, Uzhhorod 88000, Ukraine*

²*Pavol Jozef Šafárik University, Park Angelinum 9, Košice 04001, Slovakia*

Modern requirements for information security, including the protection of documents and securities, impose high standards on technologies for creating elements of visual and electronic authentication. Development of high-precision, reliable and effective methods for forming master originals of security elements with a complex micro- and nanostructure is the one of the key areas in this area. Chalcogenide amorphous semiconductors are promising materials for direct recording in lithography due to their high sensitivity to laser and electron irradiation, ability to undergo structural transformations, amorphous-crystalline transformations and formation of surface relief.

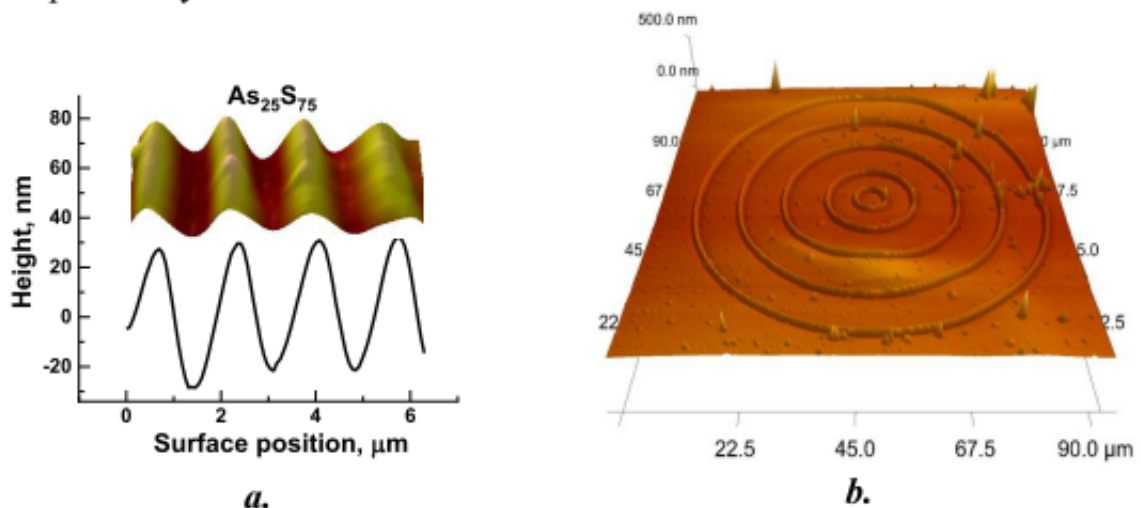


Fig. 1. Laser-induced periodic relief (surface relief grating) on the $As_{25}Se_{75}$ film and its cross-section (a), as well as the result of the test for an electron exposure dose of 500 $\mu C/cm^2$ when using this film as a negative electron resist (b).

In this paper, we consider the application of chalcogenide films based on Ge-Se and As-Se systems as photo- and electron resists in single-stage lithographic technologies for creating master originals of security elements. The laser-induced effects of surface structuring and direct optical recording of surface relief gratings were studied on a microscale on As_xSe_{100-x} and Ge_xSe_{100-x} films irradiated with a thin polarized laser beam of a Bruker ICON atomic force microscope. The laser beam interference on the film surface occurred during its diffraction at the cantilever edge. The appearance of the resulting laser-induced surface relief is shown in Fig. 1a. The formed diffraction element on the $As_{25}Se_{75}$ film had an amplitude of 32 nm and a period of 1.7 μm at a laser wavelength of 650 nm. The dependences of the

parameters of the surface diffraction elements on the chemical composition and configuration of the experiment were studied.

The efficiency of the electron beam effect on chalcogenide films of the Ge-Se and As-Se systems in the context of their lithographic application was studied. Dose tests for films of some chemical compositions showed good contrast and amplitude of the formed surface relief (Fig. 1 c, Fig. 2 c) with a certain configuration of the lithographic process.

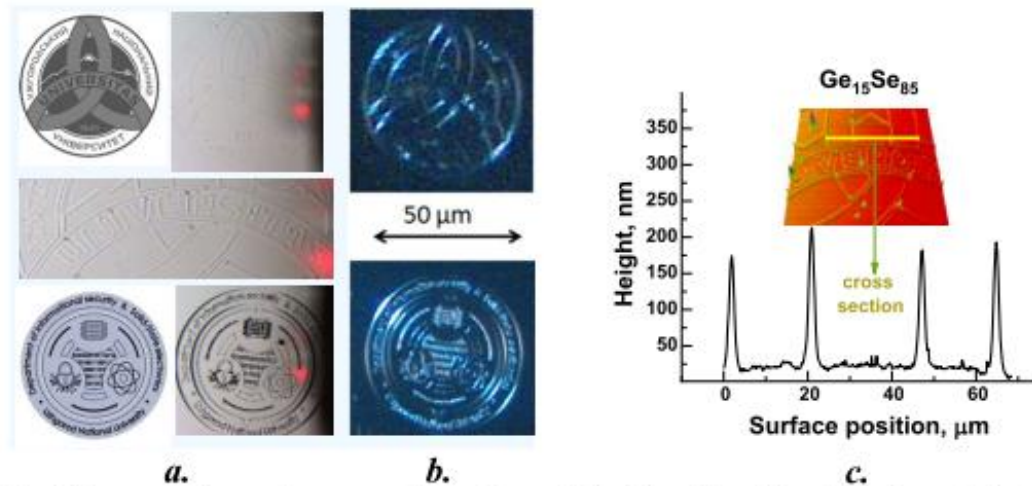


Fig. 2. Images of some logos on the surface of $\text{Ge}_{15}\text{Se}_{85}$ film (a) and their metallization (b), as well as the profile of some of their elements (c).

A process for creating originals of security elements on chalcogenide films by dry electron lithography was developed. Logos of some images were made on the surface of chalcogenide films (Fig. 2). "In-Flight Beam Tracing" technology was used for the lithographic process, which allows tracking the characteristics of the electron beam in real time. An analysis of the density of image elements was carried out, the proximity element was taken into account, and various electron beam parameters were selected for the production of image elements. The change in the quality of the surface elements image was studied depending on the electron beam parameters, exposure time, and the structure of the electron resist. As a result, good quality emblem images were obtained on chalcogenide films of a certain chemical composition (Fig. 2). They were coated with metal coatings, which ensured the removal of a replica of the image. Such replicas can be used to manufacture corresponding protective elements by stamping onto a polymer base.



ЛАЗЕР ІНДУКОВАНА КРИСТАЛІЗАЦІЯ ІОННО- (C^+ , B^+) ІМПЛАНТОВАНИХ GeSn ПЛІВОК

Н.В. Мазур¹, В.О. Юхимчук¹, О.Й. Гудименко¹, О.А. Капуш¹, В.С. Єфанов¹, В.М. Джаган¹, П.М. Литвин¹, А.М. Дмитрук², О.В. Косуля¹, О.В. Дубіковський¹

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

²Інститут фізики НАН України

На сьогодні більше ніж 90% електронних приладів, що виробляються в світі базуються на добре розвинутій та дешевій Si технології і, як свідчать прогнози щодо подальшого розвитку електроніки [1], така тенденція буде зберігатися ще тривалий час. Водночас для Si притаманний суттєвий недолік – він є непрямозонним напівпровідником, що не дозволяє його використовувати в ролі ефективних випромінювачів. Тому йде пошук фундаментальних та технологічних рішень, які б дозволили реалізувати на основі Si прямозонні структури. В останні роки інтенсивно досліджуються $Ge_{1-x}Sn_x$ плівки, електронна структура яких при певному значенні x ($\geq 6,5\%$) [2] трансформується в прямозонну. Ge як і Si є непрямозонним напівпровідником, однак Ge набагато легше трансформувати в прямозонний, що зумовлено невеликою (~ 136 меВ) різницею енергії між вершинами долин L та Γ зони провідності, які визначають непрямозонні та прямозонні переходи, відповідно. Для реалізації останнього в плівках GeSn/Si з наявними в них напруженнями стиску доля Sn повинна бути більшою. Зазначимо, що за нормальних умов в Ge розчиняються не більше 0,5% атомів Sn, що зумовлено значно більшим (162 пм) їх ковалентним радіусом в порівнянні з Ge (137 пм). Отримати $Ge_{1-x}Sn_x$ плівки з високою долею Sn можна нерівноважними методами, зокрема МПЕ, однак останній не є промисловим методом. Тому йде пошук їх отримання іншими методами, зокрема за допомогою магнетронного та термічного розпилення мішеней. Сформовані такими методами плівки є аморфними, тому важливу роль у їх кристалізації відіграють відпали. Термічні відпали, як правило, призводять до значної сегрегації атомів Sn та дифузії їх до поверхні та інтерфейсу плівка/підкладка. Щоб зменшити ці процеси можна використати фотонні та лазерні відпали. Інша ідея, реалізація якої дозволяє зменшити сегрегацію атомів Sn в процесі відпалів, – це додаткова інкорпорація в GeSn плівку атомів, що мають значно менший ковалентний радіус в порівнянні з атомами Ge. Незначний відсоток вбудованих в Ge ґратку таких атомів дозволяє компенсувати локальні напруження, які створюють атоми Sn. Тому метою цієї роботи було дослідження впливу імпульсних лазерних відпалів на властивості GeSn, GeSn:C і GeSn:B

плівки, сформованих термічним розпиленням відповідних мішеней. Методом термічного розпилення Ge та Sn мішеней на попередньо сформований 100 нм Ge буферний шар на Si підкладці осаджувалися Sn та Ge шари, з товщинами ~ 2 та ~ 17 нм, відповідно. Пластина з плівкою розрізалася на 3 частини, в одну з яких імпантувалися іони C^+ ($E=50$ кеВ, $D=6,2 \cdot 10^{15}$ іон/см²), а в іншу іони B^+ ($E=50$ кеВ, $D=1,6 \cdot 10^{15}$ іон/см²), остання частина залишалася неімпантованою і використовувалася для порівняння.

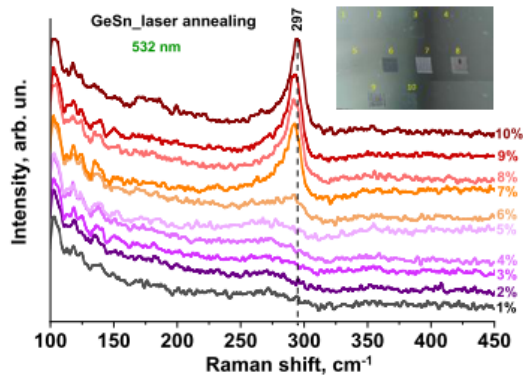


Рис. 1. Раманівські спектри 10 шарової Ge/Sn структури відпаленої імпульсним лазером при варіюванні потужності у відсотках до повної потужності лазера.

спектроскопії, XRD, XPS, SEM та АСМ. На рис. 1 наведено раманівські спектри не імпантованої GeSn плівки, відпаленою наносекундним імпульсним лазером з різною потужністю. Видно, що при потужностях лазера 7 -10 % від повної в спектрах домінує Ge-Ge смуга, що відповідає кристалічній фазі GeSn плівки. З частотного положення цієї смуги оцінено вміст вбудованих атомів Sn в плівці, що складає 5 ат. %. Згідно частотних положень Ge-Ge смуг в раманівських спектрах плівок GeSn:C і GeSn:B вміст атомів Sn на 1% більше. Останнє свідчить, що імпантација іонів C^+ або B^+ в плівку сприяє більш ефективному вбудовуванню атомів Sn в Ge ґратку. Відпал GeSn плівок за допомогою фемтосекундного лазера показав, що в процесі взаємодії лазерного випромінювання з плівкою, можуть реалізуватися декілька сценаріїв: абляція плівки; відривання її від підкладки та скручування в мікротрубку та формування, так званих ЛПС (лазер індукованих плазмонних структур) [3].

1. N. Margalit, C. Xiang, S.M. Bowers, et al. Perspective on the future of silicon photonics and electronics. *Appl. Phys. Lett.* 118, 220501 (2021).
2. S. Gupta, B. Magyari-Köpe, Yo. Nishi, K.C. Saraswat Achieving direct band gap in germanium through integration of Sn alloying and external strain. *J. Appl. Phys.* 2013. 113. P. 073707. <https://doi.org/10.1063/1.4792649>.
3. S. Shangguan, J. Zhang, W. Wang, et al. Study on the periodic structure of polycrystalline GeSn prepared by femtosecond pulse laser direct writing. *Optics & Laser Technology.* 167, 2023, 109606. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109606>.

Робота підтримана НФДУ проєкт № 2023.03/0186 «Деформаційна інженерія електронної структури тонких плівок GeSn для ІЧ оптоелектроніки нового покоління».



Структурне і спектроскопічне дослідження фотоіндукованих перетворень у склах системи Ag–As–S

Ю. М. Ажнюк¹, В. О. Юхимчук², А. І. Погодін³, М. Й. Філеп⁴,
В. В. Лопушанський¹, В. Ю. Ізай⁵, В. М. Кришеник¹,
І. М. Войнарович¹, О. В. Гомоннай¹

¹ Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

² Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
Київ, Україна

³ Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

⁴ Закарпатський угорський інститут ім. Ферена Ракоці II, Берегово, Україна

⁵ Університет ім. Яна Коменського у Братиславі, Відокремлене відділення 03853
Турані, Словаччина

Напівпровідникові скла на основі As_2S_3 відомі насамперед завдяки фотоіндукованим структурним змінам, що спостерігаються в них під дією світла, і пов'язаним з ними можливостям для застосувань у ряді галузей оптики й оптоелектроніки. Серед склоподібних матеріалів на основі сульфиду арсену, модифікованих металами, найбільш вивчені системи Ag–As–S. Науковий інтерес до аморфних матеріалів Ag–As–S обумовлений їх іонною провідністю й можливістю застосування їх як твердих електролітів, а також їхніми термоелектричними властивостями.

Нами досліджено структурні та оптичні властивості склоподібних матеріалів $(As_2S_3)_{1-x}Ag_x$ з вмістом срібла x до 0.4, які отримано сплавленням попередньо синтезованого As_2S_3 та колоїдного срібла при 600 °C у вакуумованих кварцових ампулах при постійному помішуванні, витримкою при цій температурі впродовж 4 год та швидким гартуванням на повітрі. Аморфну структуру зразків та відсутність кристалічних фаз підтверджено рентгенодифрактометричними вимірюваннями (дифрактометр AXRD Benchtop, Cu K_α випромінювання).

Вимірювання енергодисперсійних рентгенівських спектрів (ЕДС) для зразків $Ag_x(As_2S_3)_{1-x}$ з $x \leq 0.2$ підтвердили однорідність хімічного складу зразків та його відповідність заданому співвідношенню елементів у шихті. Водночас для зразків $Ag_x(As_2S_3)_{1-x}$ з $x > 0.2$ встановлено неоднорідність хімічного складу з існуванням областей з підвищеним і пониженим вмістом срібла.

Дослідження спектрів раманівського розсіювання, проведені при кімнатній температурі на спектрометрі XPloRa Plus (Horiba) при збудженні твердотільним лазером ($\lambda_{exc}=532$ нм) з густиною потужності P_{exc} від 0.4 до 100 кВт/см² та на спектрометрі МДР-23 при збудженні лазером з $\lambda_{exc}=671$ нм з $P_{exc}=1$ кВт/см², підтвердили аморфний характер усіх зразків. Для зразків $Ag_x(As_2S_3)_{1-x}$ з $x \leq 0.2$ у спектрах, отриманих при $\lambda_{exc}=671$ нм, спостерігається характерна для аморфного As_2S_3 широка домінантна смуга з максимумом біля 340 см⁻¹ (пов'язана насамперед з коливаннями зв'язків As–S пірамідальних груп AsS_3 , а також з менш помітним

внеском коливань інших структурних груп) та значно менш інтенсивні смуги в області $130\text{--}230\text{ см}^{-1}$, що відповідають коливанням інших структурних груп. У спектрах, отриманих при $\lambda_{\text{exc}}=532\text{ нм}$, структура низькочастотної групи раманівських смуг більш розмита з максимумами поблизу 180 і 230 см^{-1} , які пов'язують з коливаннями гомополярних зв'язків As–As у групах As_4S_4 та As_4S_3 .

Зазначимо, що в отриманих нами спектрах $\text{Ag}_x(\text{As}_2\text{S}_3)_{1-x}$ з $0.1 < x \leq 0.2$ не спостерігається очікуваної появи відомого для склоподібних матеріалів Ag–As–S максимуму в області $360\text{--}375\text{ см}^{-1}$, який пов'язують з коливаннями зв'язків As–S пірамідальних груп AsS_3 , з'єднаних містковими атомами срібла. Однак зі збільшенням вмісту срібла x спостерігається трансформація домінантної раманівської смуги, збільшення її ширини та зміщення максимуму в область вищих частот. Виділення внеску в раманівський спектр $\text{Ag}_x(\text{As}_2\text{S}_3)_{1-x}$, обумовленого наявністю в його складі атомів Ag, чітко вказує на зростання інтенсивності раманівського розсіювання в області з максимумом біля $360\text{--}375\text{ см}^{-1}$ та відповідне зменшення в області $330\text{--}340\text{ см}^{-1}$. Таку поведінку можна пояснити зростанням кількості пірамідальних груп AsS_3 , з'єднаних містковими атомами Ag.

Зазначимо, що для зразків $\text{Ag}_x(\text{As}_2\text{S}_3)_{1-x}$ з $x > 0.2$ спектри, отримані від різних точок зразка, відрізняються, зокрема у деяких з них максимум в області $360\text{--}375\text{ см}^{-1}$ проявляється в явному вигляді або у вигляді добре помітного плеча. Це свідчить про неоднорідність розподілу срібла в цих зразках і узгоджується з даними ЕДС.

Для всіх зразків при $\lambda_{\text{exc}}=532\text{ нм}$ зі зростанням P_{exc} від 4 кВт/см^2 до 40 кВт/см^2 спостерігається перерозподіл інтенсивності раманівських смуг на користь максимумів біля 180 і 230 см^{-1} . Це свідчить про фотоіндуковану перебудову структурної сітки скла зі зростанням числа структурних груп As_4S_4 та As_4S_3 з гомополярними зв'язками As–As.

Збільшення P_{exc} до 40 кВт/см^2 ($\lambda_{\text{exc}}=532\text{ нм}$) для зразків з $x \geq 0.06$ веде до появи нового вузького пік біля 270 см^{-1} , пов'язаного з фотоіндукованим утворенням кристалічного As_2O_3 (арсеноліту) на поверхні скла $\text{Ag}_x(\text{As}_2\text{S}_3)_{1-x}$. На відміну від нелегованого As_2S_3 , де лінії, пов'язані з As_2O_3 , з'являються під дією ультрафіолетового випромінювання, для $\text{Ag}_x(\text{As}_2\text{S}_3)_{1-x}$ цей процес відбувається при опроміненні світлом набагато нижчої енергії з зеленої області спектру, що вказує на ключову роль срібла для перебігу реакції фотоокислення.

Дослідження виконано за підтримки гранту № 2023.03/0013 програми "Передова наука в Україні" Національного фонду досліджень України.



Оптичні та фотоелектричні елементи на основі In_4Se_3 , модифіковані в області лазерного впливу

М.О. Сорокатиї, В.М. Стребезев, І.М. Юрійчук, Ю.Б. Халавка, Д.А. Бурченко
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
м. Чернівці, вул. Коцюбинського 2, Україна

Особливості шаруватої структури та енергетичної будови напівпровідникових кристалів In_4Se_3 (ширина забороненої зони $E_g=0,65$ eV) зумовлюють їх використання для створення елементної бази оптичної техніки ближнього та середнього ІЧ-діапазону [1]. Атомарно гладка поверхня площини спайності (100) оптимальна як для нарощування епітаксійних шарів і гетеропереходів, так і для напилювання тонкоплівкових моно- чи багат шарових оптичних покриттів для просвітлення або фільтрації випромінювання. В зв'язку з інтенсивним розвитком наноелектроніки досліджуються технологічні та фізичні основи мікро- та наноструктурування цих шаруватих кристалів, в тому числі методи лазерної обробки (ЛО) та модифікації поверхні і перехідних областей.

Структурно досконалі, нелеговані монокристали In_4Se_3 мають високий коефіцієнт пропускання, до 60-63% в області прозорості без просвітлення. Тому нами були теоретично розраховані та виготовлені інтерференційно-абсорбційні фільтри у вигляді мультишарів з плівок Ge – MgF_2 та Ge-SiO, які напилювали на чисті сколи (100) кристалів In_4Se_3 . Гранична довжина хвилі таких відрізнних фільтрів складала $\lambda_{\text{гр}} = 2,0$ мкм та $\lambda_{\text{гр}} = 3,5$ мкм. Корекція параметрів фільтрів, таких як максимальне пропускання в робочому діапазоні, спектральне положення $\lambda_{\text{гр}}$, міжшарова адгезія та адгезія до підкладки проводилася методом лазерної обробки і відпалу в режимі малої густини енергії пучка $E=0,3-0,8$ Дж/см². Для заданої зміни спектральної характеристики інтерференційного фільтра достатньо корегувати оптичні товщини кількох плівок на межі із оточуючим середовищем, при цьому основний пакет чвертьхвильових плівок залишається незмінним. Застосовувалася розфокусована дія мілісекундного YAG-лазера з $\lambda_0 = 1,06$ мкм на верхні плівки фільтра, в яких енергія імпульсу значним чином поглинається в шарах Ge. При такому лазерному відпалі відбувається зміна показників заломлення верхніх плівок, що дозволяло підібрати такий режим ЛО, при якому на 7-10% зростало максимальне пропускання багат шарового фільтру.

Також було проведено створення фоточутливих елементів на кристалах In_4Se_3 з допомогою лазерних технологій. В першому випадку проводилася проплавка лазером поверхні кристалу n- In_4Se_3 . В області лазерного впливу при цьому не змінюється склад In_4Se_3 , на що вказують

дослідження в РЕМ (рис. 1), але інвертується провідність рекристалізованого шару в р-тип.



Рис. 1. Однорідність складу поверхні кристалу In_4Se_3 в областях лазерної проплавки.

В другому випадку на поверхні кристалу $n\text{-In}_4\text{Se}_3$ методом рідинної епітаксії (РЕ) нарощувався шар $p\text{-In}_4\text{Te}_3$, який модифікувався лазерним опроміненням з використанням мілісекундних лазерів на рубіні ($\lambda = 0,694$ мкм) та на YAG ($\lambda = 1,06$ мкм). Гетероструктури $\text{In}_4\text{Te}_3\text{-In}_4\text{Se}_3$, отримані методом РЕ, та структури $p\text{-In}_4\text{Se}_3\text{-}n\text{-In}_4\text{Se}_3$, отримані методом лазерної проплавки, характеризуються значною фоточутливістю в області $1,0 - 2,5$ мкм без охолодження (рис. 2).

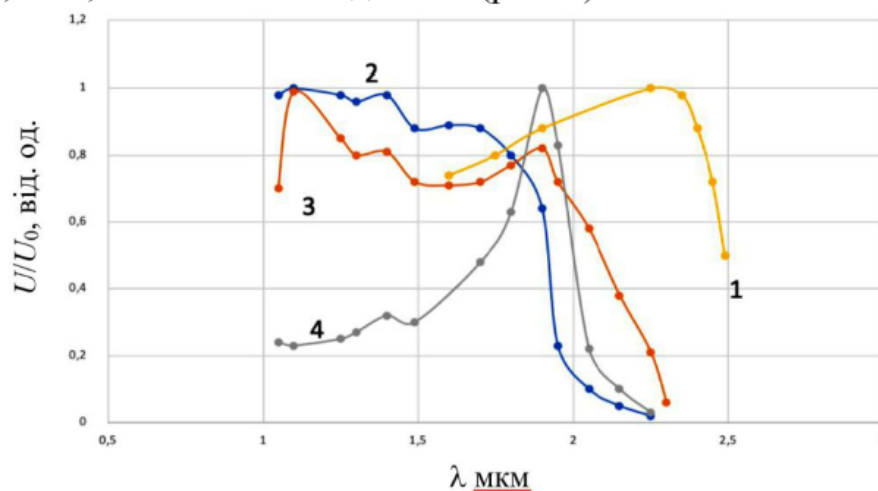


Рис. 2. Спектральна фоточутливість після ЛО: 1 – епітаксійна (РЕ) гетероструктура $\text{In}_4\text{Se}_3\text{-In}_4\text{Te}_3$; 2 – проплавлений лазером шар на кристалі $n\text{-In}_4\text{Se}_3$ при $E = 8$ Дж/см²; 3 – проплавлений лазером шар при $E = 12$ Дж/см²; 4 – при освітленні зразка (3) зі сторони підкладки.

Створення таких фоточутливих елементів може бути перспективним для застосування в телекомунікаційних системах, для біологічних та медичних областей.

[1] Хархаліс Л.Ю., Глухов К.Є., Бабука Т.Я. Електронна структура та оптичні властивості гетероструктур на основі кристалів In_4Se_3 і In_4Te_3 // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія “Фізика”, Вип. 40. – 2016. – С.80-91.



Practical Aspects of Single-, Multi-Pulse, and Continuous Wave Laser Micro-/Nano-Structuring of Materials

*P. Lytvyn, A. Korchovyii, A. Rusavsky, A. Vasin, K. Svezhentsova, V. Dzhagan
V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, prospect
Nauky, 41, Kyiv-03028, Ukraine.*

Laser micro- and nano-structuring represents a transformative approach in advanced manufacturing, offering exceptional precision and adaptability for material processing. Its relevance spans a broad range of industries, with prominence in the semiconductor sector, where laser technologies enable the fabrication of intricate device architectures essential for next-generation electronic systems. Laser-based processing supports key operations such as photolithography, annealing, and direct-write circuit patterning, thus driving innovation in high-performance, miniaturized semiconductor components for modern computing and communication technologies.

The interaction between laser radiation and materials is fundamentally governed by their optical properties and electronic structure. In metal films, laser energy is primarily absorbed by free electrons through inverse bremsstrahlung, leading to rapid electron gas heating. This interaction is effectively described by the two-temperature model, wherein the electron and lattice subsystems evolve separately before reaching thermal equilibrium, thereby influencing the ablation dynamics and surface structuring. In semiconductors, incident photons with energies exceeding the bandgap can excite electrons from the valence to the conduction band, potentially inducing ultrafast melting or phase transformations. These processes are critically dependent on the material's band structure and thermal conductivity, parameters that are vital for accurately predicting and controlling the structuring outcomes.

This study investigates the practical application of three laser processing modalities—single-pulse, multi-pulse, and continuous wave (CW)—for the micro- and nano-structuring of metal films and semiconductor materials. Single-pulse irradiation involving nanosecond pulses, enables high-resolution structuring by minimizing heat-affected zones, making it ideal for precision ablation with well-defined boundaries. The ablation threshold, determined experimentally, defines the onset of material removal; it is measured at a high-resolution using an atomic force microscopy. Phase transformation control is achieved through complementary methods including micro-Raman spectroscopy and grazing incidence X-ray diffraction. Multi-pulse irradiation exploits incubation effects, wherein repeated pulses reduce the effective ablation threshold, enhancing process efficiency for applications such as micro-drilling or patterning. In contrast, CW lasers provide sustained energy

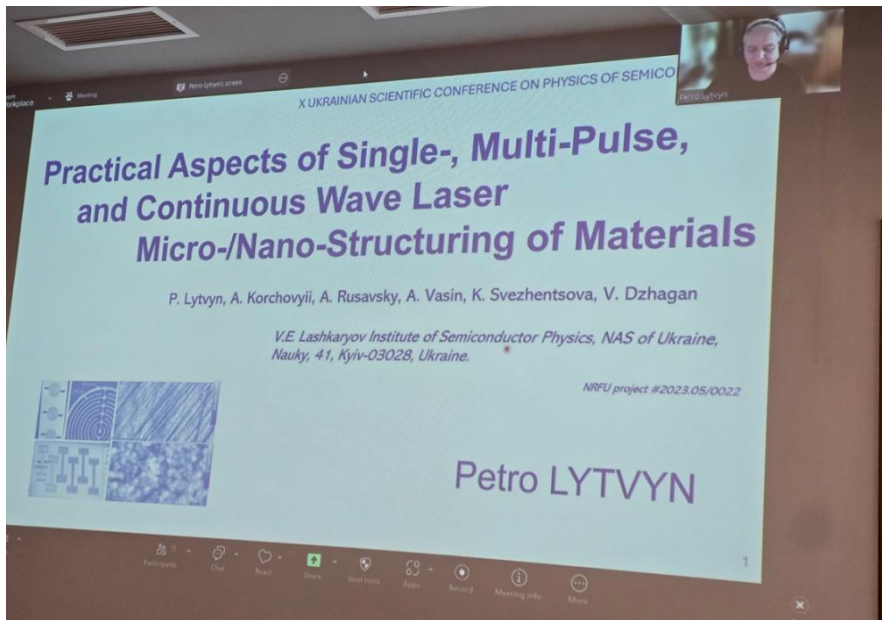
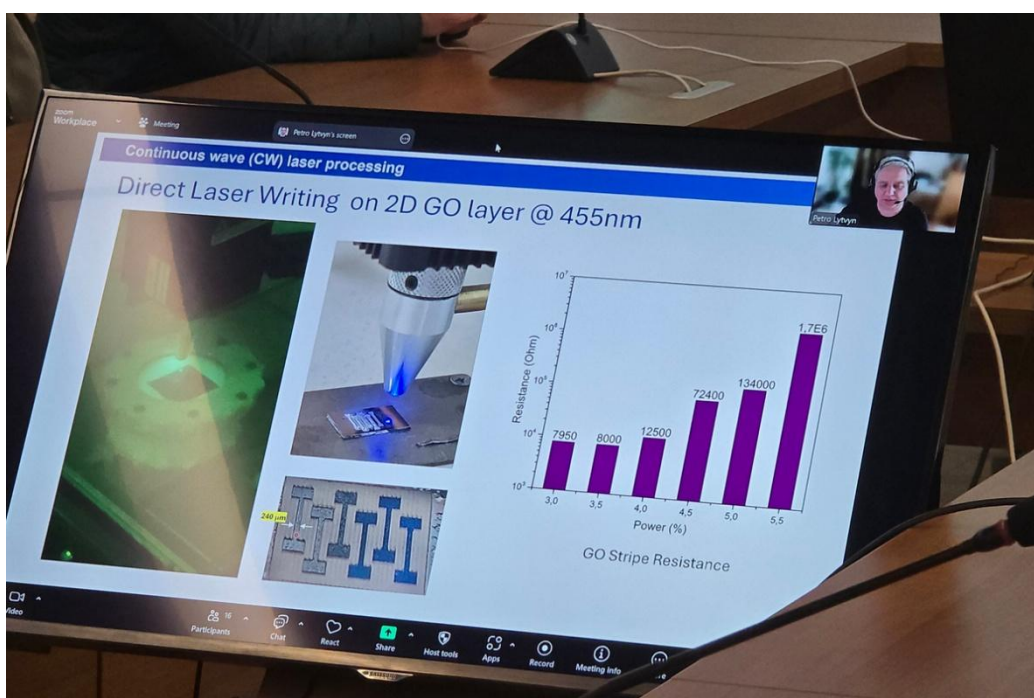
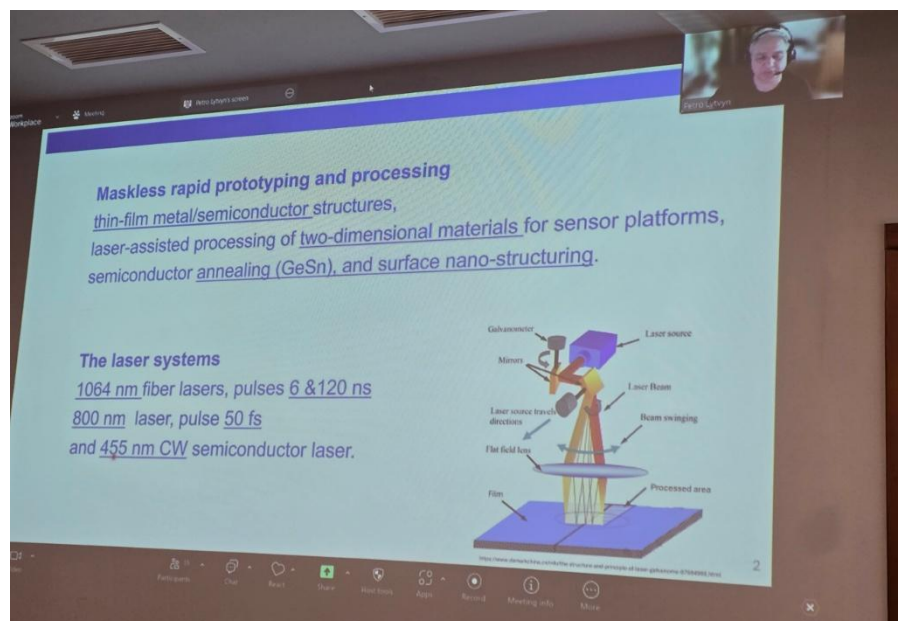


Фото онлайн-презентації Петра Литвина



input, facilitating thermal modifications like annealing or melting without material removal.

The laser systems utilized in this work include a 1064 nm infrared fiber laser operating in a pulsed regime (120 ns pulse duration, 0.75 mJ pulse energy) and a 455 nm, 10 W CW semiconductor laser. The 1064 nm pulsed laser induces significant thermal effects, which, enable efficient ablation of metals and semiconductors. The 455 nm CW laser, due to its shorter wavelength, offers improved absorption in semiconductors, thereby enhancing thermal energy coupling—especially valuable for annealing processes aimed at modifying dopant profiles or crystallinity. Environmental parameters such as preheating of the sample and the control of ambient atmosphere were also systematically adjusted to optimize the structuring process.

Representative applications demonstrated in this work include maskless rapid prototyping of thin-film metal/semiconductor structures, laser-assisted processing of two-dimensional materials for sensor platforms, micro-polishing, semiconductor annealing, and surface nano-structuring.

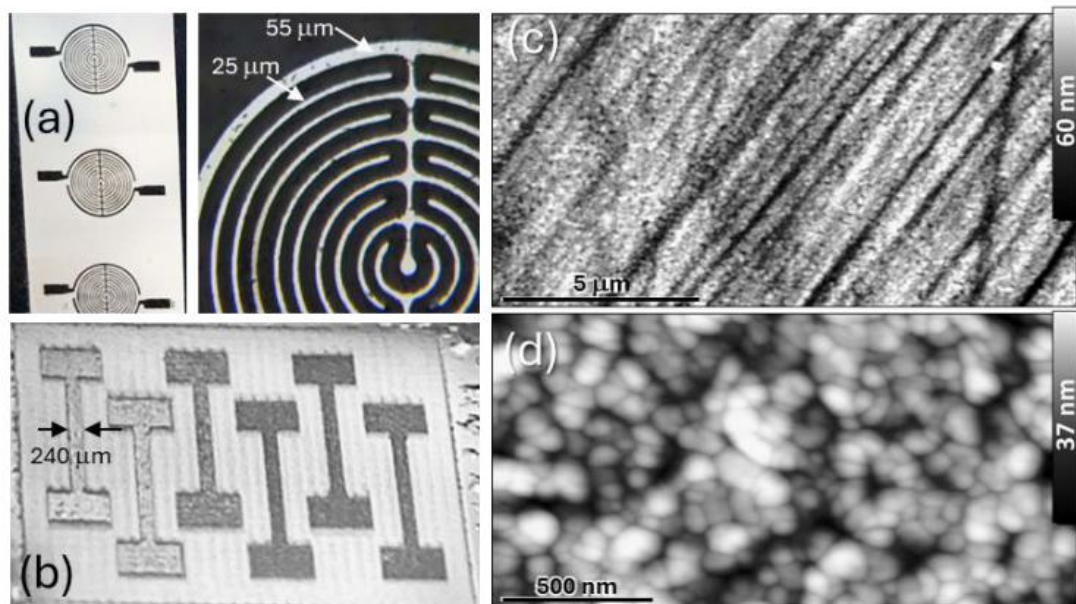


Fig.1. IR laser engraved Al on glass pressure sensor structure (a), CW laser produced graphene oxide-based sensor test structure (b), AFM images of the CW laser annealed VO_x thin film (c,d).

A comprehensive understanding of laser–material interactions is essential for advancing micro- and nano-structuring technologies. By tailoring laser parameters and employing state-of-the-art characterization techniques, this study aims to enhance material processing strategies, particularly within the semiconductor domain, thereby enabling novel device architectures and facilitating technological innovation.

This study was supported by NRFU project #2023.05/0022

Інформація про проект

Національного фонду досліджень України на 2024-2026 рр

“Створення Державної ключової лабораторії

«Центр критичних оптоелектронних мікро-/нано-технологій та експертиз»”

Назва конкурсу: Дослідницькі інфраструктури для проведення передових наукових досліджень. Бюджет: 30 млн. грн.

Грантоотримувач: Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України

Автори проекту:

[Володимир Джаган](#)
(керівник)



[Олексій Назаров](#)



[Андрій Васін](#)



[Сергій Кухтарук](#)



Консультативна рада проекту:

[Prof. Dietrich R.T. Zahn](#) – зав. каф. фізики напівпровідників TU Chemnitz, Germany, заст. дир. з наукової роботи міжуніверситетського наукового центру Матеріалів, Архітектур та Інтеграції Наномембран (MAIN, Chemnitz).



[Prof. Svetlana Vitusevich](#) – керівник відділу біоелектроніки Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany.

[Prof. Jean Pierre Raskin](#) – керівник лабораторії сенсорів, мікросистем та актуаторів, Louvain School of Engineering, Université catholique de Louvain, Belgium.



[Prof. Max Lemme](#) – очолює кафедру електронних пристроїв Aachen university, Germany.

[Prof. Wojciech Knap](#) – керівник Центру CENTERA (Center for Terahertz Research and Applications), Poland.



[Prof. Andriy Romanyuk](#) – керівник відділу R&D компанії Glas Trösch AG, та професор фізики Базельського університету, Basel, Switzerland.

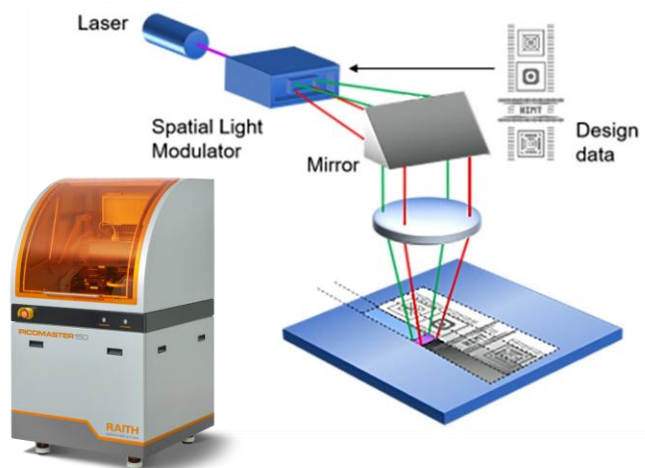
Мета проекту: поєднати експертизу колективу виконавців з різних галузей фізики та технології напівпровідникових мікро- та наноструктур наявну у виконавців матеріально-технічну базу з виготовлення та всебічної характеристикації мікро- та наноструктур можливості нового технологічного обладнання що планується до придбання в рамках проекту в науково-освітній центр напівпровідникових мікро-/ нано-технологій та експертиз

Обладнання задіяних у проекті відділів Інституту та Центру колективного користування:

- Синтез тонких плівок
- Зондова нанолітографія та характеристика поверхні
- Мікронна безмаскова лазерна літографія
- Оптична спектроскопія та мікроскопія
- Структурний та елементний аналіз
- Електрична характеристика



Планується придбання та опанування обладнання для субмікронної безмаскової лазерної літографії, яка є оптимальним варіантом для виготовлення елементів мікроелектроніки на етапі дослідження і розробки новітніх матеріалів та приладових структур, а також навчально-освітньої роботи з підготовки молодих спеціалістів



Додаткова інформація про проект та про можливості співпраці:

На сайті Інституту та сторінці проекту: <http://isp.kiev.ua/>

За тел. +380937352206 (Володимир Джаган)

Для нотаток

