Fotonikas zinātnēm un tehnoloģiju jomām vajadzīgi kristāli ar jaunu īpašību kopumu un tam ir vajadzīgas aizvien izsmalcinātākas iegūšanas metodes

Arnolds Ūbelis, Jānis Sniķeris
NZP FOTONIKA-LV, Latvijas Universitāte

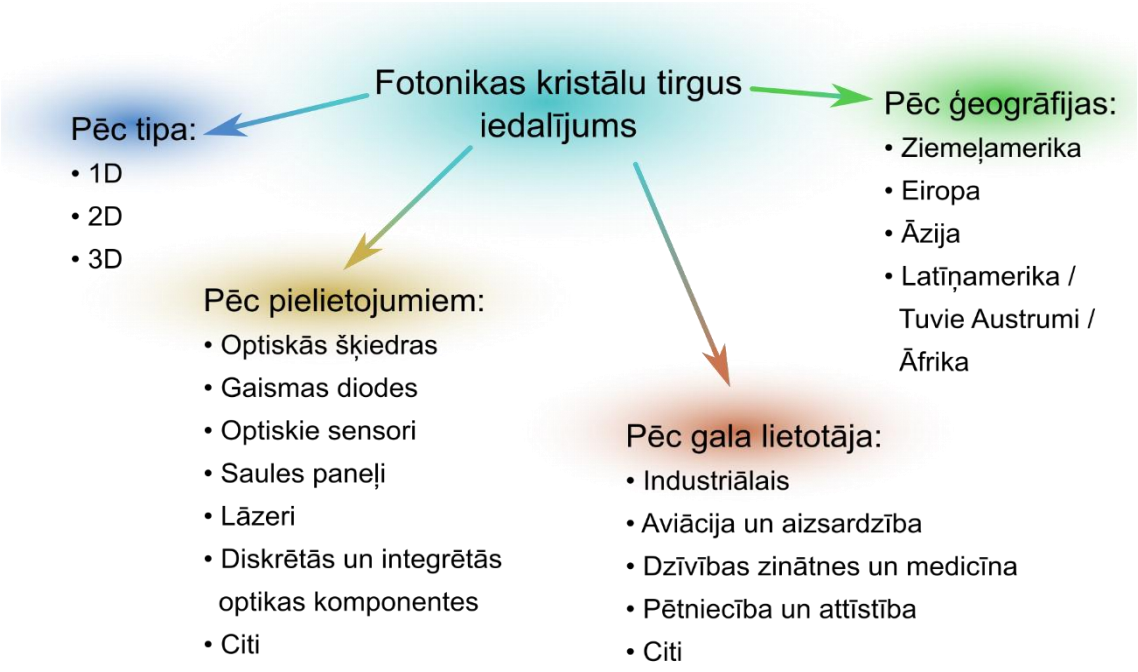
Kopsavilkums

Šī stāsta mērķis - piedāvāt fizikas un dažādu tehnoloģiju jomu studentiem, kā arī jaunajiem zinātniekiem un viņu pieredzējušiem kolēģiem Latvijā, dažās lappuses garu ieskatu problēmas aktualitātē, ātru ceļakarti uz pirmavotiem nopietnākam darbam, iespējas pieprasītā pētniecības darbā un vajadzību pēc augstākās raudzes speciālistiem uzņēmumos Latvijā un ES vienotā darba tirgū.

Īsi par vēsturi un aktualitāti

Jaunākie tirgus izpētes dati par laika sprīdi 2014. – 2022. gads *(Photonic Crystals Market Overview)*[1] rāda, ka fotonikas kristālu tirgus pasaulē 2015. gadā bija 34,199 miljardus USD, bet 2022. gadā tas sasniedza 60,230 miljardus USD, uzrādot pieaugumu 8.0% gadā.

Fotonikas kristāli ir vajadzīgi akadēmiskiem un rūpnieciskiem pētījumiem, nodrošina aizvien jaunus veidus, kā darboties ar gaismas fotoniem un likt tiem strādāt informācijas un telecommunikāciju jomās, veselības aprūpē, optikas ierīcēs un optoelektronikā, un enerģētikā. Citētais tirgus ziņojums strukturāli aptver viendimensiju (1D), divdimensiju (2D) un trīsdimensiju (3D) fotonikas kristālu tirgu, kuru pielietojumi ietver optisko šķiedru lauku, lāzerus un gaismas diodes (LED), optisko sensoru jomu, fotoefekta pielietojumus saules paneļos un dažādus pielietojumus nelineārā optikā. Pašsaprotami *(skat 1.attēlu)*, ka lielākais pieprasījums ir uzņēmējdarbībā privātā sektorā. Vienlaicīgi publisko sektoru pārstāv izglītība, zinātne un aizvien augošās aizsardzības vajadzības.



Attēls 1.: Fotonikas kristālu tirgus iedalījums (adaptēts no [1])

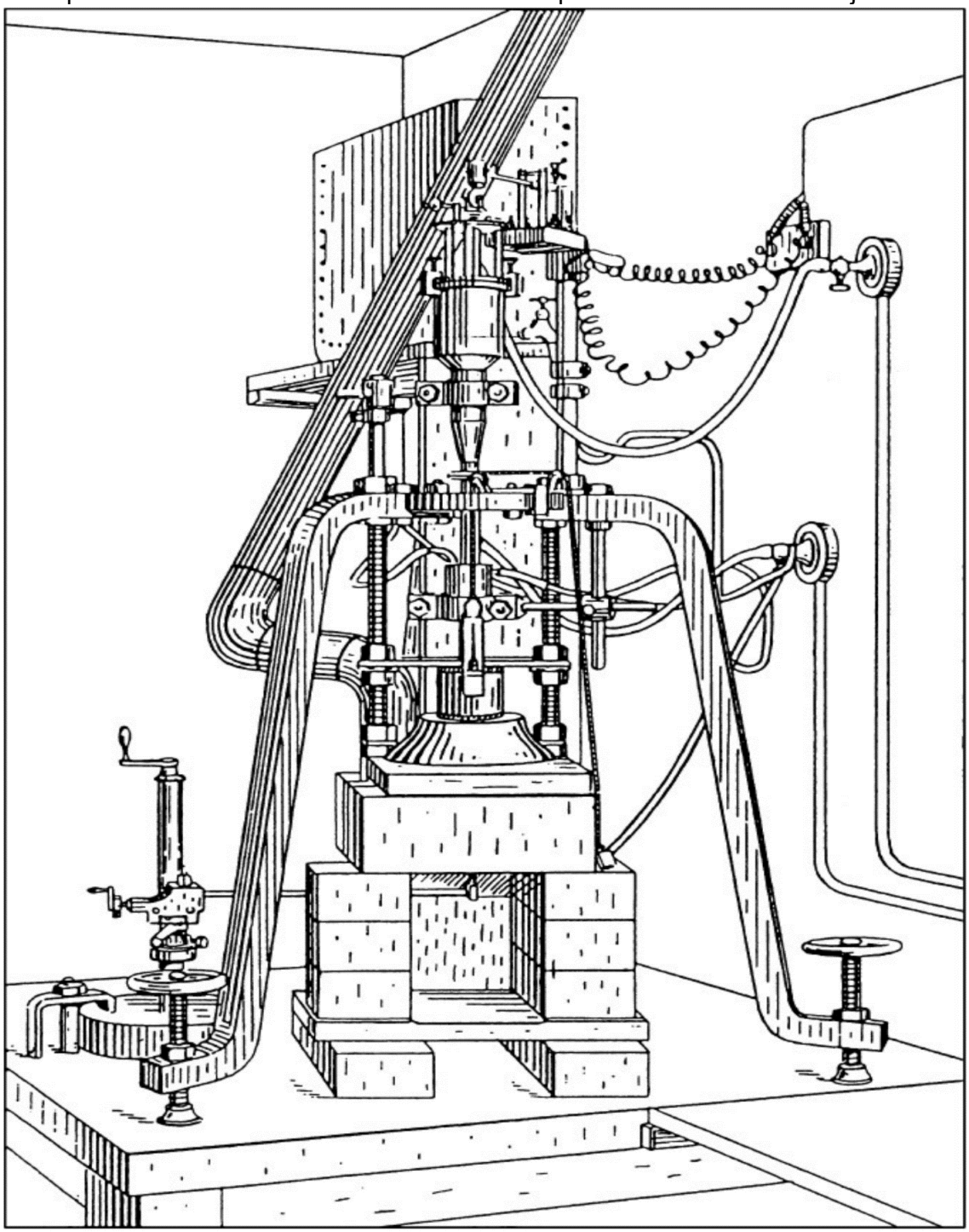
Labu ieskatu kristālu audzēšanas vēsturē, kopš pagājušā gadsimta sākuma, sniedz *"Schneel Consultanting"* kopskata raksts, kurš publicēts 2002. gadā [2]. Autori to pabeidz ar sekojošu atziņu, kura ir savlaicīga, un svarīga arī Latvijas izaugsmei ES vienotā ekonomiskā telpā un vienotā ES zinātnes telpā ar neierobežotām ideju un zināšanu plūsmām. Zināšanām

---

[1] *https://www.alliedmarketresearch.com/photonic-crystals-market*
[2] *HANS J. SCHEEL. The Development of Crystal Growth, Technology SCHEEL CONSULTING, CH-8808 Pfaeffikon SZ, Switzerland*

par kristālu audzēšanas fiziku, procesiem un tehnoloģijām, skatoties plašākā nākotnes kontekstā, ir jābūt dabas zinātņu, inženieru un tehnoloģijas augstskolu programmu sastāvdaļām, lai labākie no šīs multidisciplinārās studentu saimes gūtu motivāciju un spējas strādāt augstākās raudzes tehnoloģiju jomās un dotu ieguldījumu planētai vitāli svarīgu enerģētikas problēmu risinājumos.

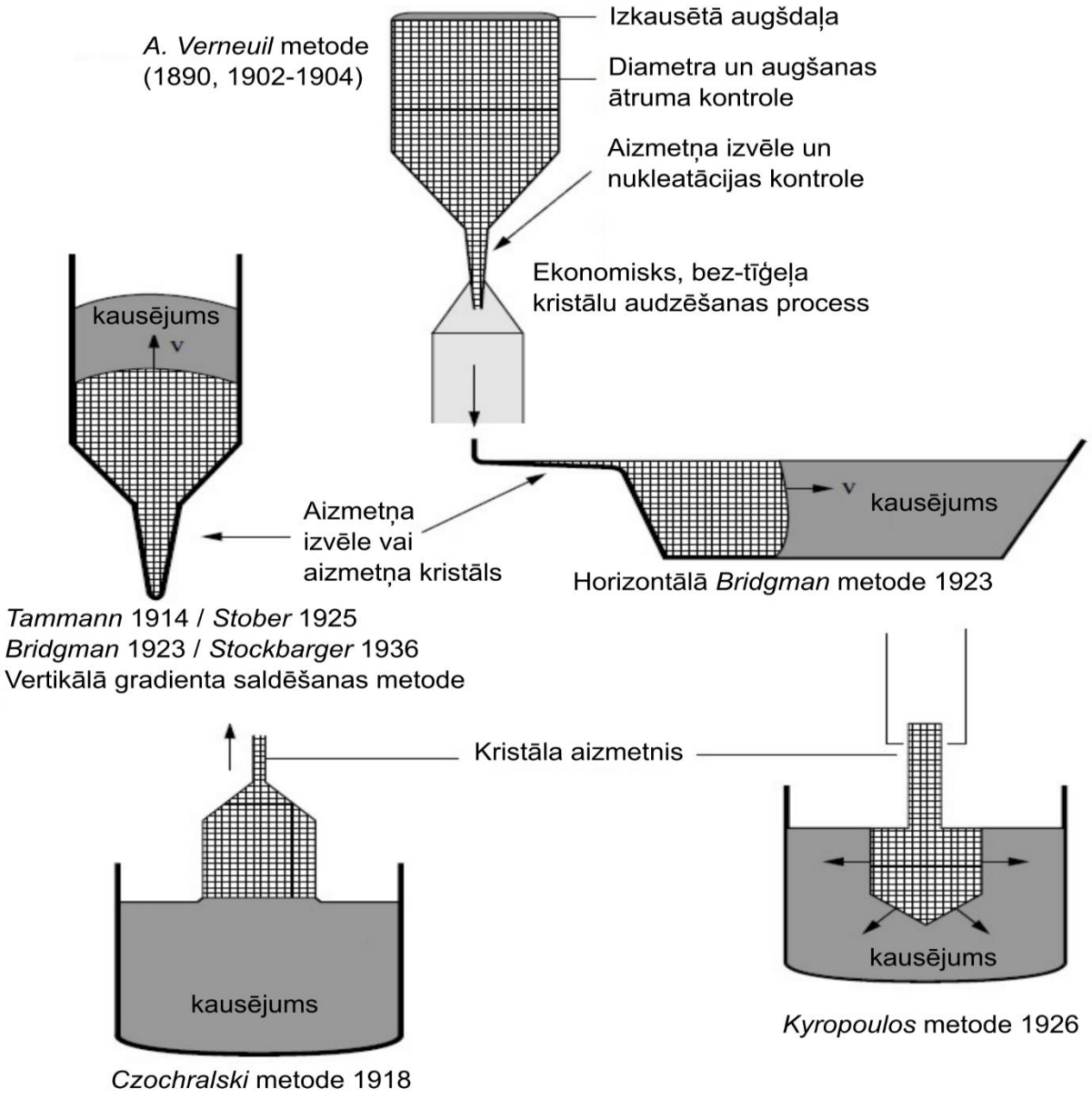
Vēsturiskā ievadā raksta autori piemin virkni zinātnieku un, tai skaitā Rīgā dzimušo Rīgas Polittehnikuma profesoru Vilhelmu Ostvaldu *(The Nobel Prize in Chemistry 1909, Wilhelm Ostwald [3])*, kuru pētījumu radīja zināšanu bāzi, lai Vernuli *(Verneuil)* varētu 1902. gadā uzbūvēt pasaule pirmo kristālu audzēšanas iekārtu! Rakstā ir publicēts šīs iekārtas zīmējums.



Attēls 2.: Pasaulē pirmās kristālu audzēšanas iekārtas zīmējums [2].

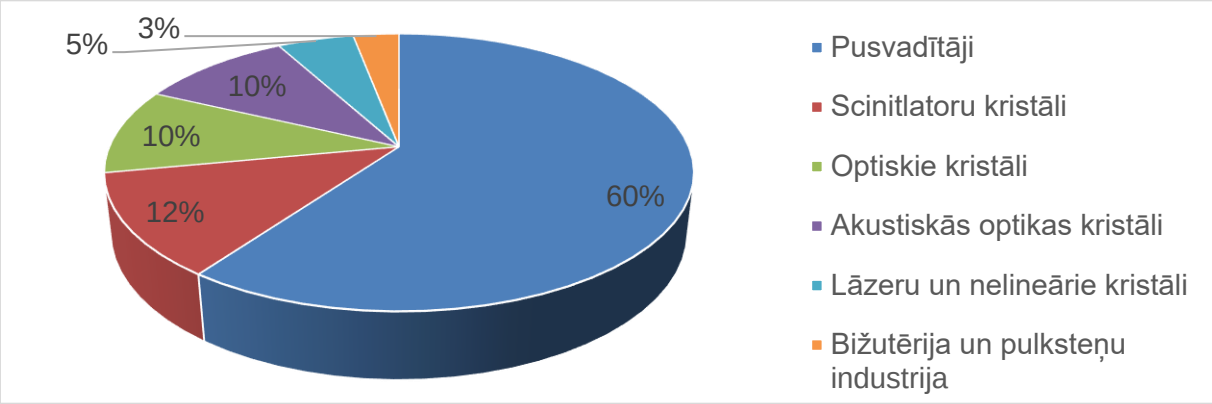
[3] *https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1909/ostwald/biographical/*

Šī iekārta izrādījās ļoti produktīva un līdz Pirmā Pasaules kara sākumam 1914. gadā, tā tika tiražēta visā pasaulē gandrīz 2000 reizes dažādās laboratorijās. Vienlaicīgi notika darbs pie uzlabojumiem un jauniem risinājumiem un radās jaunas iekārtas, kuru autoru vārdi aizvien ir apritē rakstos par kristālu audzēšanas tehnoloģijām. Nākošais zimējums rakstā piedāvātā šo jauninājumu skices, kuras parāda jaunas koncepcijas.



Attēls 3.: Uz Vernuli kristālu audzēšanas iekārtas bāzes veidotās jaunās kristālu audzēšanas koncepcijas. Adaptēts no [2].

Citētā vēstures raksta autori raksta, ka 1999 gadā tika saražotas 20 000 tonnas visdažādāko kristālu. Kā redzams no darbā publicētās diagrammas lielākā daļa saražoto kristālu tiek izgatavoti atsaucoties uz fotonikas kristālu tirgus pieprasījumu (skatīt 4. attēlu).



Attēls 4.: Pasaulē saražoto kristālu estimētais sadalījums 1999. gadā. Adaptēts no [2].

Citētais vēstures raksts labā profesionālā līmenī parāda nepārtrauktu progresu kristālu audzēšanas tehnoloģijās un ar pasniegšanas veidu rada interesi tālākām studijām. Šim mērķim vispiemērotākās būs 2003. un 2011. gadā publicētās kristālu audzēšanas monogrāfijas [4],[5], kuru redaktoru vidū ir citētā vēstures raksta autors, un Indijas zinātnieku 2010. gadā publicētā kristālu audzēšanas monogrāfija [6].

Radikāli jaunu risinājumu meklējumi

Mūsdienās, balstoties uz sasniegto un atsaucoties uz pieprasījumu, zinātnieki meklē aizvien jaunas tehnoloģijas un jaunus efektus kristālu audzēšanā, lai celtu izaudzēto kristālu struktūras nevainojamību, kuru nedrīkst deformēt neviens konkrētam elementam vai savienojumam, no kura izaudzēts kistāls, nepiederīgs atoms. Šī brīža rekords germānija kristāliem ir viens piemaisījuma atoms uz 10^{10} germānija atomu kristāla kubikcentimetrā, saskaņā ar 2020. gadā publicēta raksta ziņojumu [7]. Raksta autori nāk no Leibnica Kristālu audzēšanas institūta Berlīnē. Šī institūta ziņas vēsta, ka 2022. gada jūlijā ir sasniegts jauns Ge kristālu tīrības rekords [8].

Viens no perspektīviem virzieniem jauno tehnoloģiju meklējumos – atteikties no šķidra elementa, vai tā savienojuma vannas, kuru izgatavošanai jau tagad izmanto ķīmiski inertus materiālus ar maksimāli maziem piesātināto tvaiku spiedieniem. Bieži lieto oglekļa vannas, kuram, pie 1000 ^{O}C, tā atomu skaits piesātināto tvaiku koncentrācija aizvien pārsniedz 1000 atomus kubikcentimetrā. Tātad kristālu audzēšanas procesā tie nonāk šķidrajā vannas saturā un parādīsies arī kristālā.

Ir vispārzināma metālu levitācija elektromagnētiskā laukā. Labs kopsavilkums par šīm tehnoloģijām dots monogrāfijā, kura publicēta 2020.gadā [9].

Mūsdienās, Ķīnas zinātnieki, mēģinot pārvarēt atpalicību, neatlaidīgi un mērķtiecīgi seko līdzi norisēm pasaulē visās zinātņu un tehnoloģiju jomās un kristālu audzēšana nav

---

[4] *Crystal Growth Technology 1st Edition, by Hans J. Scheel (Author), Tsuguo Fukuda (Author). Willey*

[5] *Crystal Growth Technology: Semiconductors and Dielectrics. Ed. Hans J. Scheel, Peter Capper, Peter Rudolph, Willedy, pages*

[6] *Handbook of Crystal Growth. Govindhan Dhanaraj, Kullaiah Byrappa, Vishwanath Prasad, Michael Dudley (Eds.) Springer 2010, pages 1820.*

[7] *N. Abrosimov, M. Czupalla, N. Dropka, J. Fischer, A. Gybin, K. Irmscher, J. Janicskó-Csáthy, U. Juda, S. Kayser, W. Miller, M. Pietsch, F.M. Kießling Technology development of high purity germanium crystals for radiation detectors. Journal of Crystal Growth. Volume 532, 15 February 2020, 125396*

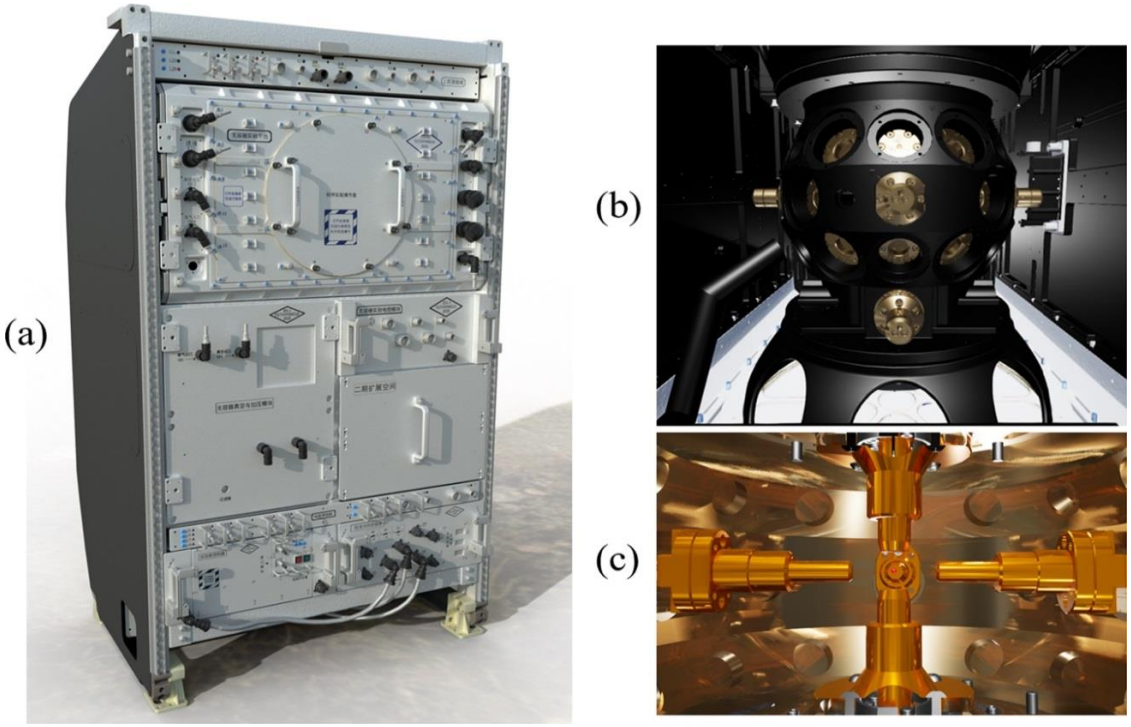
[8] *IKZ researchers achieved ultra-high purity in germanium crystals for aiding to solve one of the biggest puzzles - the origin of Universe: https://www.ikz-berlin.de/en/public-relations/news/article/breakthrough-in-the-purity-of-germanium-crystals*

[9] *Vadim Glebovsky, (2020). Chapter 8. Electromagnetic Levitation of Metal Melts DOI: 10.5772/intechopen.92230. In the book: Magnetic Materials and Magnetic Levitation Edited by Dipti Ranjan Sahu and Vasilios N. Stavrou*

izņēmums. 2015. gadā ir publicēts raksts [10], kurā ir parādītas norises kristālu audzēšanas jomā Ķīnā izmantojot radiofrekvences (RF) elektromagnētiskās levitācijas efektu no 1981. gada līdz 2012. gadam. Raksta autori apskata šķidra metāla *(darba vielas)* levitācijas tehnoloģijas, aprīkojuma attīstību un sasniegto fundamentālo un pielietojamo progresu zinātņu laukos. Autori atzīmē, ka kopš 2010. gada ir panākts straujš progress eksperimentu tehnoloģijās un nodrošinātas iespējas strādāt pie temperatūrām, kuras nodrošina grūti kūstošu metālu, vai to savienojumu izkušanu.

Ir acīmredzami, ka sākot ar 2012. gadu, Ķīnā ir daudz sasniegumu šajā jomā, piemēram:

- ✓ Jaunākos sasniegumu elektromagnētiskās levitācijas komerciālo tehnoloģiju jomā labi parāda sekojošā mājaslapā: https://www.made-in-china.com/showroom/summitsz/
- ✓ Pavisam svaigas 2022. gada ziņas no Ķīnas [11] - metālu levitācijas iekārta Ķīnas kosmosa stacijā (skat. 5. attēlu).
- ✓ Elektromagnētiskās levitācijas ferrosilikātu solidifikācijas pētījumi 2023. gadā [12].



*Attēls 5.: **a)** Bez-konteinera materiālu zinātnes eksperimentālā iekārta; **b)** Eksperimentu kamera ar 36 optiskajiem logiem; **c)** Elektrodu konfigurācija*

Ar gandarījumu ir atzīmējams, ka Latvijas zinātnes saime ir devusi vērā ņemamu ieguldījumu elektromagnētiskās levitācijas fizikalo procesu pētījumos gan modeļeksperimentos, gan rēālos eksperimentos. Tam labs apliecinājums ir 2023. gada publikācija, kur starp autoriem ir Latvijā izaudzis zinātnieks [13] un kura spēju un varēšanas apliecinājums bija 2015. gadā Latvijas Universitātē aizstāvētā disertācija [14].

---

[10] *Bei Li, Sen Zhang, Jie-Ping Xu, Wei Zhang. (2015) . Development of Vacuum Levitation Melting Technology in ChinaAdvanced Materials Research . Vol. 1101, pp 406-411. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1101.406, 2015 Trans Tech Publications, Switzerland*

[11] *Zhang, P., Zhang, Y., Wang, Z. et al. 1D and 3D co-simulation and self-adaptive position control of electrostatic levitation in China's Space Station. npj Microgravity **8**, 29 (2022). https://doi.org/10.1038/s41526-022-00215-6*

[12] Peng Yan, Guifang Zhang, Bing Yi, Mansoor Barati, (2023) Electromagnetic levitation and solidification of ferrosilicon alloy and resulting microstructural evolution mechanisms. Journal of Materials Research and Technology, Volume 24, 2023, Pages 8296-8306, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.

[13] *S. Spitans, C. Bauer1, H. Franz B. Sehring and E. Baake.. INVESTMENT CASTING WITH UNIQUE LEVITATION MELTING TECHNOLOGY – FASTCAST. Proceedings of the Liquid Metal Processing & Casting Conference 2022. Edited by: Matthew Krane, Abdellah Kharicha, and Mark Ward.*

[14] *Sergejs Spitāns PhD Thesis (2015) ŠĶIDRĀ METĀLA AR BRĪVO VIRSMU TURBULENTĀS PLŪSMAS IZPĒTE ELEKTROMAGNĒTISKAJĀ LAUKĀ. Latvijas Universitēte: 298-50884-Spitans_Sergejs_ss07036.pdf*

Ir vērts atzīmēt, ka Sergejs Spitāns, kopā ar citiem kolēģiem no Latvijas ir starp visvarāk citētiem autoriem [15],[16],[17],[18],[19] iepriekš minētās grāmatas 8.nodaļā [9]. Ir patīkami atzīmēt, ka šīs nodaļas autors atsaucas arī uz fizkas doktoru Kirko [20], kuram bija tas gods, likt pamatus magnētiskai hidrodinamikai Latvijā, gan Latvijas Universitātē, gan Fizikas institūtā.

Neskatoties uz šī raksta ierobežoto apjomu, dažas raksturīgas atsauces hronoloģiskā kārtībā ilustrē Latvijas zinātnieku veikumu [21],[22],[23],[24],[25],[26],[27],[28].

Līdzās jau minētai Sergeja Spitāna disertācijai, ir vēl tikai dažās disertācijas, kuras ir veltītas EM levitācijai, vai ar to ļoti tuvām tēmām [29],[30],[31],[32],[33],[34]. Maģistra un doktora līmeņa disertācijas, papildus monogrāfijām, ir labi avoti, kur var gūt labu priekšstatu par konkrētā virzienā paveikto un aktuālo uz darba izstrādes brīdi un rāda konkrētās zinātnieku grupas motivāciju ilgtermiņa darbam gatavojot augstākās raudzes profesionāļus.

Autori cer, ka šis nelielais ieskats kristālu audzēšanas jomā radīs interesi dažādām lasītāju grupām un veicinās tālākus sasniegumus Latvijā fotonikas kristālu tehnoloģijās.

---

[15] *Spitans S, Jakovics A, Baake E, Nacke B. Development, verification and application of numerical model for coupled free surface and liquid metal flow calculation in EM field. In: 7th International Conference on Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow: MPF 2013: 3-5 July, 2013. A Coruna, Spain: Elsevier B.V. WIT Transactions on Engineering Sciences. Vol. 79. 2013. pp. 49-61*
Spitans S. Investigation of turbulent free surface flow of liquid metal in electromagnetic field [PhD thesis]. Riga: University of Latvia; 2015.

[16] *. Spitans S et al. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part II: Conventional electromagnetic levitation. Metallurgical and Materials Transactions B. 2015;47:522-536*

[17] *Spitans S et al. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part I: Implementation and verification of model. Metallurgical and Materials Transactions B. 2013;44:593-605*

[18] *Spitans S et al. New technology for large scale electromagnetic levitation melting of metals. Magnetohydrodynamics. 2015;51:121-132*

[19] *Spitans S, Franz H, Baake E. Numerical modelling and optimization of the electrode induction melting for inert gas atomization (EIGA). In: Proceedings of 11th PAMIR International Conference. "Fundamental and Applied MHD", (Reims, France). 2019. pp. 327-331*

[20] *Kirko I.M. Liquid Metal in the Electromagnetic Field. Moscow: Energy Publishing; 1964. p. 160*

[21] *V Bojarevics, AI Chaikovskij, EV Gorbachev, H Kalis Physical and mathematical modeling of MHD-processes in aluminium reduction cell. Liquid Metal Magnetohydrodynamics, 1989, p205-211*

[22] *Yu.M.Gelfgat, Janis Priede. (1995) MHD flows in a rotating magnetic field (a review), January 1995. Magnetohydrodynamics 1995(1).*

[23] *K Pericleous, V Bojarevics, M Cross, G Tinios. (1997) The development of dynamic CFD model of the magnetic semi-levitation of liquid metals*

[24] *Jānis Priede, Gunter Gerbeth. Spin-up instability of electromagnetically levitated spherical bodies. February 2000. IEEE Transactions on Magnetics 36(1):349 – 353. DOI: 10.1109/20.822545*

[25] *V Bojarevics, K Pericleous. (2003) AC & DC magnetic levitation and semi-levitation modelling*
Dual frequency AC and DC magnetic field levitation melting of metals
V Bojarevics, K Pericleous. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 44 (2), 147-153

[26] *V. Bojarevics, K. Pericleous, M. Cross (2000) Modeling the dynamics of magnetic semilevitation melting. Metall. Mater. Trans. B, vol. 31B, pp. 179-189.*

[27] *G. Ratnieks, A. Muiznieks and A. Mühlbauer. Modelling of phase boundaries for large industrial FZ silicon crystal growth with the needle-eye technique. Journal of Crystal Growth **255**, 227 – 240 (2003).*

[28] *K. Pericleous, V. Bojarevics, A. Roy (2013) Modeling of EML in Combined AC/DC Magnetic Fields as the Basis for Microgravity Experiments. Int. J. Microgravity Sci. Appl., vol. 30, pp. 56-63*

[29] *Gundars Ratnieks. Modelling of the Floating Zone Growth of Silicon Single Crystals with Diameter up to 8 Inch. PhD thesis, Univerity of Latvia, 2007.*

[30] Michael Wünscher, PhD Thesis (2011). Crucible-free Crystal Growth of Germanium – Experiments and Simulations Technischen Universität Berlin

[31] *Zachary Royer (2012) PhD Thesis. Optimizing electromagnetic levitation design to enhance thermodynamic measurement. Iowa State University.*

[32] *Tackes, Carl, "Thermal analysis of undercooled metallic liquids by electromagnetic levitation drop calorimetry" (2013). Graduate Theses and Dissertations. 13316. Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/etd/13316*

[33] *Juan Sebastián Lafuente Larrañaga. (2019). MsC Thesis. Design and Development of a Digitally Controlled Magnetic Levitation System. Kaizerslautern University*

[34] *J.P.Witteveen. Phd.Thesis (2021) Twente University. Containerless Metal Single-Crystal Growth via Electromagnetic Levitation*