



Ph.D. Tézisfüzet

# **A fotoindukált töltéshordozók komplex fizikája újszerű anyagokban**

**Bojtor András**

Témavezető:

**Simon Ferenc**

Fizika Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vállalati Szakértő:

**Paráda Gábor**

Semilab Félvezető Fizikai Laboratórium Zrt.

Budapest  
2024



# Előzmények

A félvezető- és napelemipar folyamatosan keresi azokat az új anyagokat és módszereket, amelyek nagyobb hatásfokú, alacsonyabb előállítási költségű és könnyebben gyártható tranzisztorokhoz és napelemekhez vezetnek. Az emberiség csillapíthatatlan energiaéhségének kielégítése hajtja az új napelemanyagok kutatását. A félvezetőipar olyan eszközöket keres a teljesítményelekttronika, a vékonyréteg-tranzisztorok és az átlátszó elektronika területén, amelyek megbízhatóbbak, könnyebben gyárthatók és olcsóbbak, mint a jelenlegi eszközök.

Olcsó és könnyű gyártásuk és kiemelkedő fotovoltai tulajdonságaik miatt [1–3] a fémhalogenid-perovszkitok potenciális alapanyagok a felhasználási területek széles skáláján. A perovszkit vékonyrétegek és egykristályok optikai tulajdonságai hangolhatók a halogének arányának segítségével[4, 5]. Ezen tulajdonságaik vezetnek a fényforrásként[3, 5–7], valamint napelem [1, 8–11], gázérzékelő[12], fotodetektor[13, 14], röntgen[15], gamma[16] és neutron[17] detektor alapanyagaként történő felhasználásukhoz. A fémhalogenid-perovszkitokon alapuló napelemek jelenleg meghaladják a 26%-os hatásfokot[18], és a kutatások szerint az anyagok olyan zord környezetben is alkalmazhatók, mint például a világűr[19, 20].

A széles tiltott sávú félvezetők intenzíven kutatottak, mivel olyan eszközökben alkalmazhatók, ahol a hagyományos félvezetők nem ideálisak, például magas hőmérsékleti körülmények között, átlátszó elektronikában és nagy teljesítményű elektronikában. Míg a fémoxid félvezetők, mint például az indium-gallium-cink-oxid[21, 22] és a gallium-oxid[23, 24] ígéretes jelöltek a lapos kijelzők[25–27], rugalmas kijelzők [28–30], teljesítmény elektronika [31], és szenzoros alkalmazások [32–39] számára, a perzisztens fotovezetés jelenségét mutatják[40–48]. A perzisztens fotovezetés jelensége megnehezíti a különböző módszerekkel előállított minták megfelelő összehasonlítását.

## Célkitűzések

Míg az új anyagok növesztése és napelemként, vagy tranzisztorkomponensként való tanulmányozása egy prototípus eszköz gyártásával megvalósítható, addig az ilyen eszköz vizsgálata csak az adott körülmények közötti használhatóságról ad információt. Ha az érdeklődéssel övezett anyagok tulajdonságait különböző körülmények között vizsgáljuk, akkor megismerhetjük azokat a fizikai folyamatokat, amelyek az anyag megfigyelt tulajdonságait okozzák. A töltéshordozók rekombinációs dinamikájának hőmérsékletfüggő vizsgálatával a rekombinációs mechanizmusban résztvevő folyamatok megismerhetőek. Ha a kutatások feltárják a kívánt tulajdonságok okát, a tudományos

közösség és az ipar egy adott irányba összpontosíthatja a kutatást, így létrehozhatja azokat a napelem és tranzisztor alapanyagokat, amelyek az emberiség által a jövőben használt eszközök kutatását és fejlesztését előmozdítják. A széles tiltott sávú félvezetőkön alapuló eszközök fejlesztését megnehezíti a perzisztens fotovezetés jelensége, mivel az anyagtulajdonságok szignifikánsan változhatnak optikai gerjesztés hatására a hosszú relaxációs idő miatt. Az ilyen anyagok megbízható összehasonlítását lehetővé tevő mérési módszerek rendkívül fontosak a széles tiltott sávú félvezetőkön alapuló eszközök fejlesztésének szempontjából.

Kutatásom során a fényrel gerjesztett töltéshordozók hőmérsékletfüggő rekombinációs dinamikáját és fotovezetését vizsgáltam szerves-szerveetlen hibrid fémhalogenid-perovszkitekben és szerveetlen fémhalogenid-perovszkitekben. Ezekhez a mérésekhez két eszközt fejlesztettem, egy üreggel és egy koplánáris hullámvezetővel ellátott mérőrendszert. Az üreg alapú rendszer nagy jó-sági tényezőjű üreggel és automatikus frekvenciaszabályozással rendelkezik a rekombinációs dinamika nagy érzékenységu méréséhez, valamint lehetővé teszi a vizsgált minta gyors hűtését. A koplánáris hullámvezetőt tartalmazó mérőrendszer tetszőleges geometriájú minták vizsgálatára alkalmas, a minták az antenna felületére helyezhetők. A koplánáris hullámvezető alapú rendszer esetében a szondázó elektromágneses sugárzás frekvenciája széles tartományban állítható. Mindkét mérési elrendezés a minta által visszavert mikrohullámú jel változásán alapul, amely a töltéshordozó sűrűséggel arányos a felületi impedancia változásán keresztül. Ezekkel a mérésekkel a töltéshordozók rekombinációs dinamikája megfigyelhető a hőmérséklet függvényében. Vizsgáltam a fázisátalakulásoknak, a hűtés sebességének és az előállítás módszerének hatását metilammónium-ólom-halogenid perovszkitokban, ezzel vizsgálva a megfigyelt ultrahosszú töltéshordozó élettartam okát és a kapcsolatát az anyagban kialakuló doménekkel. A teljesítményfüggés és a rekombinációs dinamika szimulációjával megfigyeltem a rekombinációs dinamikát cézium-ólom-bromidban, ezzel vizsgálva az ultrahosszú rekombinációs időért felelős rekombinációs folyamatokat.

Vizsgáltam a perzisztens fotovezetés jelenségét mutató anyagokat. A perzisztens fotovezetés megfigyelhető széles tiltott sávú anyagokban, melynek hatására az optikai gerjesztés által okozott hosszan tartó változás miatt a minták összehasonlítása nehéz lehet. Kidolgoztam egy olyan mérési folyamatot, amely lehetővé teszi a minták töltéshordozó sűrűségének, töltéshordozó mobilitásának és fajlagos ellenállásának összehasonlítását annak ellenére, hogy a mérést megelőzően az optikai gerjesztés következtében ezek a paraméterek különböző mértékben megváltoznak. A mérési módszerrel nincs szükség a minták előkészítése és a mérési folyamat között megvárni a relaxációs folyamatot. A kidolgozott módszerrel különböző vastagságú, passzíválású, valamint

a leválasztás során változó oxigén koncentrációval előállított indium-gallium-cink-oxid vékonyrétegeket vizsgáltam, és az eredményt összehasonlítottam az irodalomban található tendenciákkal az említett paraméterek változására vonatkozóan.

## Új tudományos eredmények

1. Kifejlesztettem egy üregezen alapuló, mikrohullám fotovezetés lecsengést megfigyelő mérési elrendezést, mellyel a 4 – 300 K hőmérséklet tartományban megvalósítható a mérés. A fejlesztett eszköz segítségével vizsgáltam a metilammónium ólom halid perovszkitek fényrel gerjesztett töltéshordozóinak hőmérsékletfüggő rekombinációs idejét. A hőmérsékletfüggő méréseket egy olyan tartományban végeztem, ahol előzőleg megfigyeltek fázisátalakulásokat az anyagokban. Több mérést is végeztem, melyek során jelentős változást figyeltem meg a töltéshordozók rekombinációs dinamikájában és a fotoválásban az orthorombos-tetragonális fázisátalakulásnál, míg a tetragonális-köbös átalakulás nem járt hasonló változással. A változás megfigyelése a fázisátalakulás miatt lehetséges. Mindhárom perovskit minta esetén ultrahosszú rekombinációs időket prezentáltam az orthorombos fázisban, melyek közül a leghosszabb több mint  $68 \mu\text{s}$  az  $\text{MAPbBr}_3$  egykristályban[T1]
2. Megfigyeltem a töltéshordozók szemcsehatáron való szóródásának hatását  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  perovszkit kristályokban különböző morfológiák és quenchelési állapotok esetén. Ennek megvalósítása érdekében megfigyeltem a töltéshordozó dinamikát a hőmérséklet függvényében egy minta lassú és gyors hűtését követően, melyet a fejlesztett mérési elrendezés tett lehetővé, ezzel normál és quenchtelt fázist létrehozva a mintában. A hatás további vizsgálatának érdekében összehasonlítottam három különböző előállítási módszerrel készített, így különböző morfológiával rendelkező  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  minta hőmérsékletfüggő töltéshordozó rekombinációs dinamikáját. A megfigyelések demonstrálják, hogy a morfológia vagy quenchelés által okozott szemcsehatárok a töltéshordozó rekombinációs idő csökkenéséhez vezet a megnövekedett szóródási események és a rekombinációs centrumok számának lehetséges növekedése miatt.[T1]
3. Kifejlesztettem egy hőmérsékletfüggő mikrohullámú fotovezetés lecsengését mérő elrendezést egy koplanáris hullámvezető segítségével, mely képes gyors és szenzitív detektálásra. A mérési elrendezés a gyors és lassú rekombinációs folyamatok megfigyelését teszi lehetővé egy mérésen keresztül lefedve 3 nagyságrendnyi időbeli tartományt. A fejlesztett

elrendezéssel vizsgáltam a cézium ólom bromid egykristályok fényrel gerjesztett töltéshordozóinak hőmérsékletfüggő rekombinációs dinamikáját. Elvégeztem a fotovezetés lecsengésének mérését egy széles hőmérséklet tartományba és 1 ms fölötti rekombinációs időket figyeltem meg kriogén körülmények között. [T2] [T3]

4. Vizsgáltam a töltéshordozók rekombinációs dinamikáját a teljesítmény függvényében és készítettem egy szimulációt a töltéshordozók csapdázódásának bizonyítására, valamint vizsgáltam a mérési elrendezés hőmérsékletfüggő mikrohullámú reflexióját a fűtési effektus kizárásának érdekében. A bemutatott eredményeim arra utalnak, hogy a hosszú rekombinációs idő az egyik típusú töltéshordozó csapdázódása okozza sekély csapdáknban, mely ultrahosszú rekombinációs időhöz vezet. Egy szimulációt fejlesztettem a mért töltéshordozó rekombinációs dinamika reprodukálásához egy sekély és mély csapdákat tartalmazó rendszer esetén. [T2]
5. Egy mérési szekvenciát fejlesztettem a perzisztens fotovezetés jelenségével rendelkező vékonyrétegek karakterizálására és összehasonlítására. A mérési szekvenciával összehasonlítottam töltéshordozó koncentrációt, mobilitást és a rétegellenállást optikai gerjesztés alatt és azt követően egy öt mintából álló mintasor segítségével. A minták lehetővé tették a minta vastagság, az előállítás során alkalmazott oxigén koncentráció, és a felület passziválás hatásának megfigyelését. A mérés segítségével reprodukáltam az irodalomban található tendenciákat és prezentáltam egy módszert, melynek segítségével összehasonlíthatóak minták, melyeknek tulajdonságai nagy mértékben változnak a mérések közt a megfelelő elővigyázatosság hiányában. A méréseket a Semilab által készített PDL-1000 berendezés segítségével végeztem. A PhD tanulmányaim során részt vettem a PDL-1000 hardverének és szoftverének fejlesztésében. [T4]

## Tudományos közlemények

[T1] A. Bojtor, S. Kollarics, B. G. Márkus, A. Sienkiewicz, M. Kollár, L. Forró, and F. Simon, „Ultralong Charge Carrier Recombination Time in Methylammonium Lead Halide Perovskites,” *ACS Photonics*, vol. 9, no. 10, pp. 3341–3350, 2022.

[T2] A. Bojtor, D. Krisztián, F. Korsós, S. Kollarics, G. Paráda, T. Pinel, M. Kollár, E. Horváth, X. Mettan, H. Shiozawa, B. G. Márkus, L. Forró,

and F. Simon, „Millisecond-Scale Charge-Carrier Recombination Dynamics in the CsPbBr<sub>3</sub> Perovskite,” *Advanced Energy and Sustainability Research*, p. 2400043, 2024.

- [T3] A. Bojtor *et al.*, „Time-resolved Photoconductivity Decay Measurements with Broad-band Radiofrequency Detection and Excitation Energy,” *In preparation*, 2024.
- [T4] A. Bojtor, G. Paráda, P. Túttó, H. Korka, K. Szőke, and F. Korsós, „Investigation of Persistent Photoconductance and Related Electron Mobility in Thin IGZO Layers With the PDL Hall Technique,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 93, pp. 9–15, 2023, international Conferences & Exhibition on Nanotechnologies, Organic Electronics & Nanomedicine – Nanotextology (NANOTEX 2022).

## Tézisponthoz nem kötött publikációk

1. S. Kollarics, A. Bojtor, K. Koltai, B. G. Márkus, K. Holczer, J. Volk, G. Klujber, M. Szieberth, and F. Simon *Optical–Microwave Pump–Probe Studies of Electronic Properties in Novel Materials* Phys. Status Solidi B, vol. 257, no. 12, p. 2000298, 2020.
2. S. Kollarics, F. Simon, A. Bojtor, K. Koltai, G. Klujber, M. Szieberth, B. Márkus, D. Beke, K. Kamarás, A. Gali, D. Amirari, R. Berry, S. Boucher, D. Gavryushkin, G. Jeschke, J. Cleveland, S. Takahashi, P. Szirmai, L. Forró, E. Emmanouilidou, R. Singh, and K. Holczer *Ultrahigh nitrogen-vacancy center concentration in diamond* Carbon, vol. 188, pp. 393–400, 2022
3. G. Paráda, F. Korsós, A. Bojtor, J.-W. G. Bos, E. Don, J. W. Bowers, M. Togay *Exploiting bi-modulated magnetic field and drive current modulation to achieve high-sensitivity Hall measurements on thermoelectric samples* MRS Advances 7, 608–613 (2022)
4. B. Gyüre-Garami, B. Blum, O. Sági, A. Bojtor, S. Kollarics, G. Csősz, B. G. Márkus, J. Volk, F. Simon *Ultrafast sensing of photoconductivity decay using microwave resonators* J. Appl. Phys. 126, 235702 (2019)
5. J. Palotás, M. Negyedi, S. Kollarics, A. Bojtor, P. Rohringer, T. Pichler, F. Simon *Incidence of Quantum Confinement on Dark Triplet Excitons in Carbon Nanotubes* ACS Nano 14 (9), 11254–11261 (2020)

6. S. Kollarics, J. Palotás, A. Bojtor, B. G. Márkus, P. Rohringer, T. Pichler, F. Simon *Improved Laser Based Photoluminescence on Single-Walled Carbon Nanotubes* Phys. Status Solidi B 256, 1900235 (2019)

## Hivatkozások

- [1] J.-P. Correa-Baena, M. Saliba, T. Buonassisi, M. Graetzel, A. Abate, W. Tress, and A. Hagfeldt, „Promises and challenges of perovskite solar cells,” *Science*, vol. 358, no. 6364, pp. 739–744, 2017.
- [2] J. Huang, Y. Yuan, Y. Shao, and Y. Yan, „Understanding the physical properties of hybrid perovskites for photovoltaic applications,” *Nat. Rev. Mater.*, vol. 2, p. 17042, 2017.
- [3] K. Lin, J. Xing, L. N. Quan, F. P. G. de Arquer, X. Gong, J. Lu, L. Xie, W. Zhao, D. Zhang, C. Yan, W. Li, X. Liu, Y. Lu, J. Kirman, E. H. Sargent, Q. Xiong, and Z. Wei, „Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent,” *Nature*, vol. 562, no. 7726, pp. 245+, 2018.
- [4] F. Zhang, H. Zhong, C. Chen, X.-g. Wu, X. Hu, H. Huang, J. Han, B. Zou, and Y. Dong, „Brightly Luminescent and Color-Tunable Colloidal  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  ( $X = \text{Br}, \text{I}, \text{Cl}$ ) Quantum Dots: Potential Alternatives for Display Technology,” *ACS Nano*, vol. 9, no. 4, pp. 4533–4542, 2015.
- [5] L. Protesescu, S. Yakunin, M. I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C. H. Hendon, R. X. Yang, A. Walsh, and M. V. Kovalenko, „Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites ( $\text{CsPbX}_3$ ,  $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{and I}$ ): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut,” *Nano Lett.*, vol. 15, no. 6, pp. 3692–3696, 2015.
- [6] Y. Fu, H. Zhu, C. C. Stoumpos, Q. Ding, J. Wang, M. G. Kanatzidis, X. Zhu, and S. Jin, „Broad Wavelength Tunable Robust Lasing from Single-Crystal Nanowires of Cesium Lead Halide Perovskites ( $\text{CsPbX}_3$ ,  $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ),” *ACS Nano*, vol. 10, no. 8, pp. 7963–7972, 2016.
- [7] S. W. Eaton, M. Lai, N. A. Gibson, A. B. Wong, L. Dou, J. Ma, L.-W. Wang, S. R. Leone, and P. Yang, „Lasing in robust cesium lead halide perovskite nanowires,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 113, no. 8, pp. 1993–1998, 2016.
- [8] N.-G. Park and K. Zhu, „Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar cells and solar modules,” *Nat. Rev. Mater.*, vol. 5, pp. 333–350, 2020.
- [9] F. Fu, T. Feurer, T. Weiss, S. Pisoni, E. Avancini, C. Andres, S. Buecheler, and A. Tiwari, „High-efficiency inverted semi-transparent planar perovskite solar cells in substrate configuration,” *Nat. Energy*, vol. 2, p. 16190, 2016.



- [10] Y. Haruta, T. Ikenoue, M. Miyake, and T. Hirato, „One-Step Coating of Full-Coverage CsPbBr<sub>3</sub> Thin Films via Mist Deposition for All-Inorganic Perovskite Solar Cells,” *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 3, no. 12, pp. 11 523–11 528, 2020.
- [11] K. P. Bhandari and R. J. Ellingson, „An Overview of Hybrid Organic–Inorganic Metal Halide Perovskite Solar Cells,” in *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, T. M. Letcher and V. M. Fthenakis, Eds. Academic Press, 2018, pp. 233 – 254.
- [12] K. Mantulnikovs, A. Glushkova, P. Matus, L. Ćirić, M. Kollár, L. Forró, E. Horváth, and A. Sienkiewicz, „Morphology and Photoluminescence of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Deposits on Nonplanar, Strongly Curved Substrates,” *ACS Photonics*, vol. 5, no. 4, pp. 1476–1485, 2018.
- [13] J. Shamsi, P. Rastogi, V. Caligiuri, A. L. Abdelhady, D. Spirito, L. Manna, and R. Krahne, „Bright-Emitting Perovskite Films by Large-Scale Synthesis and Photo-induced Solid-State Transformation of CsPbBr<sub>3</sub> Nanoplatelets,” *ACS Nano*, vol. 11, no. 10, pp. 10 206–10 213, 2017.
- [14] J. Ding, S. Du, Z. Zuo, Y. Zhao, H. Cui, and X. Zhan, „High Detectivity and Rapid Response in Perovskite CsPbBr<sub>3</sub> Single-Crystal Photodetector,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 121, no. 9, pp. 4917–4923, 2017.
- [15] L. Clinckemalie, D. Valli, M. B. J. Roeffaers, J. Hofkens, B. Pradhan, and E. Debroye, „Challenges and Opportunities for CsPbBr<sub>3</sub> Perovskites in Low- and High-Energy Radiation Detection,” *ACS Energy Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 1290–1314, 2021.
- [16] S. Yakunin, D. N. Dirin, Y. Shynkarenko, V. Morad, I. Cherniukh, O. Nazarenko, D. Kreil, T. Nauser, and M. V. Kovalenko, „Detection of gamma photons using solution-grown single crystals of hybrid lead halide perovskites,” *Nat. Photon.*, vol. 10, no. 9, pp. 585–589, Sep 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.139>
- [17] P. Andričević, G. Náfrádi, M. Kollár, B. Náfrádi, S. Lilley, C. Kinane, P. Frajtag, A. Sienkiewicz, A. Pautz, E. Horváth, and L. Forró, „Hybrid halide perovskite neutron detectors,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 17159, Aug 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95586-3>
- [18] A. Singha, A. Paul, S. Koul, V. Sharma, S. Mallick, K. R. Balasubramaniam, and D. Kabra, „Stable and Efficient Large-Area 4T Si/perovskite Tandem Photovoltaics with Sputtered Transparent Contact,” *Sol. RRL*, vol. 7, no. 12, p. 2300117, 2023. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/solr.202300117>
- [19] A. W. Y. Ho-Baillie, H. G. J. Sullivan, T. A. Bannerman, H. P. Talathi, J. Bing, S. Tang, A. Xu, D. Bhattacharyya, I. H. Cairns, and D. R. McKenzie, „Deployment Opportunities for Space Photovoltaics and the Prospects for Perovskite Solar Cells,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 7, no. 3, p. 2101059, 2022.

- [20] D. Pérez-del Rey, C. Dreessen, A. M. Igual-Muñoz, L. van den Hengel, M. C. Gélvez-Rueda, T. J. Savenije, F. C. Grozema, C. Zimmermann, and H. J. Bolink, „Perovskite Solar Cells: Stable under Space Conditions,” *Sol. RRL*, vol. 4, no. 12, p. 2000447, 2020.
- [21] K. Nomura, H. Ohta, K. Ueda, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, „Thin-film transistor fabricated in single-crystalline transparent oxide semiconductor,” *Science*, vol. 300, no. 5623, pp. 1269–1272, 2003.
- [22] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, „Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors,” *Nature*, vol. 432, no. 7016, pp. 488–492, 2004.
- [23] R. Roy, V. G. Hill, and E. F. Osborn, „Polymorphism of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  and the System  $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{—H}_2\text{O}$ ,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 74, no. 3, pp. 719–722, 1952. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/ja01123a039>
- [24] M. Higashiwaki and S. Fujita, *Gallium Oxide: Materials Properties, Crystal Growth, and Devices*. Springer Nature, 2020, vol. 293.
- [25] H.-H. Hsieh, H.-H. Lu, H.-C. Ting, C.-S. Chuang, C.-Y. Chen, and Y. Lin, „Development of IGZO TFTs and their applications to next-generation flat-panel displays,” *J. Inf. Disp.*, vol. 11, no. 4, pp. 160–164, 2010.
- [26] J.-h. Lee, D.-h. Kim, D.-j. Yang, S.-y. Hong, K.-s. Yoon, P.-s. Hong, C.-o. Jeong, H.-S. Park, S. Y. Kim, S. K. Lim *et al.*, „42.2: World’s largest (15-inch) XGA AMLCD panel using IGZO oxide TFT,” in *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 39, no. 1. Wiley Online Library, 2008, pp. 625–628.
- [27] H.-N. Lee, J. Kyung, S. K. Kang, D. Y. Kim, M.-C. Sung, S.-J. Kim, C. N. Kim, H. G. Kim, and S.-t. Kim, „68.2: 3.5 inch QCIF+ AM-OLED panel based on oxide TFT backplane,” in *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 38, no. 1. Wiley Online Library, 2007, pp. 1826–1829.
- [28] K. Miura, T. Ueda, S. Nakano, N. Saito, Y. Hara, K. Sugi, T. Sakano, H. Yamaguchi, I. Amemiya, K. Akimoto *et al.*, „4.1: Low-Temperature-Processed IGZO TFTs for Flexible AMOLED with Integrated Gate Driver Circuits,” in *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 42, no. 1. Wiley Online Library, 2011, pp. 21–24.
- [29] S. Nakano, N. Saito, K. Miura, T. Sakano, T. Ueda, K. Sugi, H. Yamaguchi, I. Amemiya, M. Hiramatsu, and A. Ishida, „Highly reliable a-IGZO TFTs on a plastic substrate for flexible AMOLED displays,” *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 20, no. 9, pp. 493–498, 2012.
- [30] J.-S. Park, T.-W. Kim, D. Stryakhilev, J.-S. Lee, S.-G. An, Y.-S. Pyo, D.-B. Lee, Y. G. Mo, D.-U. Jin, and H. K. Chung, „Flexible full color organic light-emitting diode display on polyimide plastic substrate driven by amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, no. 1, 2009.

- [31] M. Higashiwaki, A. Kuramata, H. Murakami, and Y. Kumagai, „State-of-the-art technologies of gallium oxide power devices,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, no. 33, p. 333002, 2017.
- [32] Z. Liu, T. Yamazaki, Y. Shen, T. Kikuta, N. Nakatani, and Y. Li, „O<sub>2</sub> and CO sensing of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multiple nanowire gas sensors,” *Sens. Actuators, B*, vol. 129, no. 2, pp. 666–670, 2008.
- [33] J. Zhu, Z. Xu, S. Ha, D. Li, K. Zhang, H. Zhang, and J. Feng, „Gallium oxide for gas sensor applications: A comprehensive review,” *Materials*, vol. 15, no. 20, p. 7339, 2022.
- [34] X. Chen, F. Ren, S. Gu, and J. Ye, „Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors,” *Photonics Res.*, vol. 7, no. 4, pp. 381–415, 2019.
- [35] N. Kumar, J. Kumar, and S. Panda, „Low temperature annealed amorphous indium gallium zinc oxide (a-IGZO) as a pH sensitive layer for applications in field effect based sensors,” *AIP Adv.*, vol. 5, no. 6, 2015.
- [36] H. Tang, Y. Li, R. Sokolovskij, L. Sacco, H. Zheng, H. Ye, H. Yu, X. Fan, H. Tian, T.-L. Ren *et al.*, „Ultra-high sensitive NO<sub>2</sub> gas sensor based on tunable polarity transport in CVD-WS<sub>2</sub>/IGZO pN heterojunction,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 43, pp. 40 850–40 859, 2019.
- [37] Y.-H. Tai, H.-L. Chiu, and L.-S. Chou, „Active matrix touch sensor detecting time-constant change implemented by dual-gate IGZO TFTs,” *Solid-State Electron.*, vol. 72, pp. 67–72, 2012.
- [38] D. J. Yang, G. C. Whitfield, N. G. Cho, P.-S. Cho, I.-D. Kim, H. M. Saltsburg, and H. L. Tuller, „Amorphous InGaZnO<sub>4</sub> films: Gas sensor response and stability,” *Sens. Actuators, B*, vol. 171, pp. 1166–1171, 2012.
- [39] H. Jeong, C. S. Kong, S. W. Chang, K. S. Park, S. G. Lee, Y. M. Ha, and J. Jang, „Temperature sensor made of amorphous indium–gallium–zinc oxide TFTs,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 34, no. 12, pp. 1569–1571, 2013.
- [40] M. Lee, K.-T. Kim, M. Lee, S. K. Park, and Y.-H. Kim, „A study on the persistent photoconductance and transient photo-response characteristics of photochemically activated and thermally annealed indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistors,” *Thin Solid Films*, vol. 660, pp. 749–753, 2018.
- [41] S. Jeon, S.-E. Ahn, I. Song, C. J. Kim, U.-I. Chung, E. Lee, I. Yoo, A. Nathan, S. Lee, K. Ghaffarzadeh *et al.*, „Gated three-terminal device architecture to eliminate persistent photoconductivity in oxide semiconductor photosensor arrays,” *Nat. Mater.*, vol. 11, no. 4, pp. 301–305, 2012.
- [42] W.-J. Lee, B. Ryu, and K.-J. Chang, „Electronic structure of oxygen vacancy in crystalline InGaO<sub>3</sub>(ZnO)<sub>m</sub>,” *Phys. B*, vol. 404, no. 23-24, pp. 4794–4796, 2009.

- [43] S. Cui, Z. Mei, Y. Zhang, H. Liang, and X. Du, „Room-Temperature Fabricated Amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> High-Response-Speed Solar-Blind Photodetector on Rigid and Flexible Substrates,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 5, no. 19, p. 1700454, 2017. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adom.201700454>
- [44] H. Liang, S. Cui, R. Su, P. Guan, Y. He, L. Yang, L. Chen, Y. Zhang, Z. Mei, and X. Du, „Flexible X-ray Detectors Based on Amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin Films,” *ACS Photonics*, vol. 6, no. 2, pp. 351–359, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b00769>
- [45] H. Zhou, L. Cong, J. Ma, B. Li, M. Chen, H. Xu, and Y. Liu, „High gain broadband photoconductor based on amorphous Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and suppression of persistent photoconductivity,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 7, pp. 13 149–13 155, 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C9TC05159G>
- [46] R. Zhu, H. Liang, S. Hu, Y. Wang, and Z. Mei, „Amorphous-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Optoelectronic Synapses with Ultra-low Energy Consumption,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 8, no. 1, p. 2100741, 2022. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aelm.202100741>
- [47] S.-L. Gao, L.-P. Qiu, J. Zhang, W.-P. Han, S. Ramakrishna, and Y.-Z. Long, „Persistent Photoconductivity of Metal Oxide Semiconductors,” *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 6, no. 3, pp. 1542–1561, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c01549>
- [48] J. T. Jang, D. Ko, S. Choi, H. Kang, J.-Y. Kim, H. R. Yu, G. Ahn, H. Jung, J. Rhee, H. Lee *et al.*, „Effects of structure and oxygen flow rate on the photo-response of amorphous IGZO-based photodetector devices,” *Solid-State Electron.*, vol. 140, pp. 115–121, 2018.