

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Napelemkészítésre alkalmazott Si hordozók ppb
szintű felületi szennyeződésének vizsgálata**

Soha Márton

Témavezető: **Dr. Vad Kálmán**
Társ-témavezető: **Dr. Szabó István**



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2021

Bevezetés és célkitűzés

A szilícium alapú napelemek technológiai fejlesztése az 1940-es években történt felfedezése óta folyamatos. 2015-ben, 90 %-os piaci részesedéssel a PV piacon a szilícium alapú napelemek voltak a piacvezetők, ami napjainkban is így van.

A félvezető szilícium cellák szennyeződése nagymértékben befolyásolja azok működési tulajdonságait, továbbá a kisebbségi töltéshordozók élettartamát. A gyártás során el kell kerülni a fémszennyeződéseknek (a szilícium tömb fűrészelésével okozott szennyeződéseknek) a szilíciumba történő beépülését, mivel csökkentik a napelemek teljesítményét.

A fotovoltaikus szilícium napelemek, különösen a nagy hatékonyságú *n*-típusú napelemek, fejlett koncepciója megfelelő nedves tisztítási eljárást igényel a magas hőmérsékletű folyamatok, például diffúzió és passziválás előtti fémszennyezés eltávolítása érdekében. A tisztítási folyamat költségének a lehető legalacsonyabbnak kell lenni, ami megköveteli a vegyi anyagok optimalizált felhasználását az üzemtartály élettartamának meghosszabbításával.

Szabályozott szennyezéseket végeztem úgy, hogy a szilícium-lemezeket híg HCl-alapú (pH = 1.3) oldatba merítettem,

amelyek pontosan meghatározott, ppb-szintű fémkoncentrációt tartalmaztak. A szennyeződések lerakódási viselkedése matematikailag egy adszorpciós izoterma elmélettel írható le. A szabályozott szennyezés szimulálja a fémszennyezéseket a szilícium felületén és a tömbi anyagban.

A dolgozat célja az általam kifejlesztett szennyezési eljárással megvizsgálni, hogy a különböző átmenetifémek (Fe, Cu, Co, Zn, Ti, és a Cr) milyen hatással vannak a szilícium felületére, hol helyezkednek el rajta, a kisebbségi töltéshordozók élettartama mennyivel változik, és hogy ezeket a szennyezéseket milyen módszerrel lehet hatékonyan eltávolítani. Egy gyakorlati tisztítási alkalmazás bemutatása is célom az értekezés során.

.

Rövidítés jegyzék

Cz-Si: Czochralski-szilícium

DIW: Ionmentes víz

TXRF: Teljes visszaverődés röntgen fluoreszcencia

VPD-DC: Gőzfázisú bomlás – cseppgyűjtés

LA-ICP-MS: Lézer abláció induktív csatolt plazma
tömegspektrometria

DIW/O₃/HF/HCl: Ionmentes víz / Ózon / Hidrogén-fluorid /
Hidrogén-klorid

Új tudományos eredmények

1. Tézispont: Kifejlesztettem egy új szennyezési eljárást, ami indirekt módon savas közegben viszi fel a fémszennyezést az *n*-típusú Cz-Si-ra.

A szennyező kísérleteket Fe, Cu, Co, Zn, Ti, és a Cr átmenetifémekkel végeztem el, 30, 100, 300, 1000 és 3000 ppb koncentrációban. A tisztító oldat DIW/HCl, pH=1,3. A lemezeket 5 percre belemerítettem az oldatba, majd DIW túlfolyó mosással mostam ugyancsak 5 percre. Ez az elrendezés szimulálta a valós körülményeket, azokat, amelyek a vegyipari tartályokban jelen vannak a napelem gyártása során. A pontosan meghatározott mennyiségű fémszennyeződést a folyadékokba injektáltam a kereskedelembe beszerezhető standard fémoldatok hozzáadásával.

2. Tézispont: TXRF-el megvizsgáltam a szilícium felületi fémszennyeződésének adszorpciós viselkedését savas folyadékban, és a kapott adatokból meghatároztam a Si felület tisztításához, azaz a fémszennyezés 10^{10} atom/cm²-re való csökkentéséhez, szükséges tisztító oldat mennyiségét.

A módszer kimutatási határa a vizsgált fémekre $5 \cdot 10^8$ - $1 \cdot 10^9$ atom/cm² között van. Ilyen alacsony detektálási határértéket elérhetünk VPD-DC és TXRF kombinációjával. A szilícium lemez felületén adszorpciós folyamat miatt az oldat fémkoncentrációjával arányosan növekszik a szennyeződés mértéke. A fémszennyeződés lerakódási sebessége az adott folyadék minden fémionjára jellemző, és a tisztító oldat pH-jától függ. Az oldatbeli és felületi fémkoncentrációk közti összefüggést a Langmuir izoterma elmélettel lehet leírni. A mért felületi fémkoncentráció pontoknak az adszorpciós izoterma elmélettel történő illesztésével három illesztési paraméter határozható meg.

Továbbá, megállapítottam olyan mennyiségeket, amelyek meghatározzák a szilícium felület megtisztításához szükséges minimális mennyiségű nedves kémiai tisztító oldatot.

3. Tézispont: Egységes, 975°C-os 40 perces oxigén közegű hőkezelési és egyúttal felület passziválási eljárást alkalmazva a felületre leválasztott átmeneti fémek tömbi diffúziójához meghatároztam a kisebbségi töltéshordozó élettartamát, a felületi szennyezés koncentráció függvényében.

WCT-120 típusú fotovezető mérési rendszert alkalmaztam fotolumineszcencia mérésekhez. Ezt a rendszert a kisebbségi töltéshordozó élettartamának mérésére használtam. A tartály szennyezettségnek a kisebbségi töltéshordozó tényleges élettartamára gyakorolt hatása a fémszennyeződéstől függően nagyon különbözik. Megfigyeltem, hogy a Co, Fe és Cu erős hatással van a kisebbségi hordozó tényleges élettartam romlására, pl. $2 \cdot 10^{10}/\text{cm}^2$ Fe felületkoncentráció 75 %-kal csökkentheti a kisebbségi hordozó tényleges élettartamát, míg a Ti, Zn és Cr mérsékelte, és csak az $10^{12}/\text{cm}^2$ feletti magas felületi koncentrációk eredményezhetik a kisebbségi hordozó élettartamának csökkenését.

Megvizsgáltam az intersticiális Fe-szennyeződés hatását az *n*-típusú Cz-szilícium tömbi anyag hatékony kisebbségi hordozó élettartamára a nagy hatékonyságú napelemeknél. Megállapítottam, hogy eredetileg a felületen jelen lévő összes Fe-atom bekerül a tömbi anyagba és elektromosan aktívvá válik intersticiális Fe-ként, miután 975 °C-on 1 órán keresztül hőkezelés alatt állt.

4. Tézispont: Bebizonyítottam, hogy az új, a DIW/O₃/HF/HCl alapú tisztítási eljárás hatékony a veszélyes átmenetifém szennyezők eltávolítására, kiemelkedően hatékony a Co eltávolítására és emellett gazdaságosabb a korábbi módszereknél.

Minden átmenetifémnél a legszennyezettebb mintáimat (3000 ppb) vegyi tisztítási eljárásnak vettem alá. Négy különböző oldatot alkalmaztam. Az első a HF/HCl volt, ami olcsó és viszonylag hatékony tisztítási forma. A második a H₂SO₄/O₃ + HF/HCl egy 30 éve publikált tisztítási forma, a harmadik DIW/O₃ + HF/HCl az IMEC által kifejlesztett tisztítási eljárás. Végül kifejlesztettem egy eljárást, ami hatékonyabbnak bizonyult az első 3 módszernél és a legtöbb fémszennyezést a legjobb hatékonysággal távolította el és javította a kisebbségi töltéshordozók élettartamát.

5. Tézispont: Meghatároztam a szilícium lemezek felületi szennyezőinek laterális eloszlását és megállapítottam, hogy az érdesített felületen a Cu szennyezés eloszlása nem egyenletes.

Si lemezekre felvitt Cu és Fe fémszennyezőket különböző szennyezettségi szinteken vizsgáltam, LA-ICP-MS-el. A

mintavételezést a felület szkennelésével végeztem, az adatokat szomszédos, kör alakú felületekből gyűjtöttem. Egy kör átmérője $100\text{ }\mu\text{m}$, a lézer fény energiasűrűsége 5 J/cm^2 volt. Az LA-ICP-MS módszer a ppb-szintű felületi szennyeződések mérésének hatékonyságát bizonyította. A mért koncentrációkat összehasonlítottam a TXRF módszerrel meghatározott koncentrációkkal. A jelenség tanulmányozása mind elméleti, mind a napelemipar szempontjából fontos.

Az LA-ICP-MS módszer jó lehetőséget nyújtott a felületi szennyezés kémiai elemei laterális eloszlásának feltérképezésére annak megállapítása érdekében, hogy a megfigyelt szennyezés homogén vagy mintázattal rendelkezik. Az eredményeket a Cu szennyező felületi eloszlásával mutatom be. Lézersugárral $500\cdot 500\text{ }\mu\text{m}^2$ területet pásztáztam. A háttérintenzitásokat közvetlenül a szkennelés megkezdése előtt rögzített adatok alapján számítottam ki. Az eredménymátrixból meghatároztam az elemek eloszlását.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék nyilvánítani témavezetőmnek Dr. Vad Kálmánnak, hogy segítette a munkámat mindenben, mindig fordulhattam hozzá tanácsokért a munkám során.

A társ-témavetőnek Dr. Szabó Istvánnak is szeretném megköszönni az öregítési mérésnél nyújtott segítségét.

Hálás vagyok Michael Haslinger-nek és Joachim Johnnak valamint PV csoportnak akik leuveni IMEC kutató intézetben segítettek a munkámat az irányított szennyezés során.

Az ATOMKI-ből (Atommagkutató Intézet) szeretném megköszönni a kollégáknak név szerint Dr. Takáts Viktor, Dr. Hakl József, Dr. Csík Attila, Dr. Fodor Tamás és Dr. Braun Mihály segítségét.

A Debreceni Egyetem fizika intézetéből szeretném megköszönni a segítséget Dr. Daróczi Lajosnak.

Végezetül a családomnak, a barátnőmnek és barátaimnak is szeretném megköszönni a támogatásukat, hogy a disszertációm írása közben felmerült nehézségen átsegítettek.

Tudományos publikációk

Értekezés témájához kapcsolódó angol nyelvű közlemények:

1. Hajjiah, Ali; Soha, Márton; Gordon, Ivan; Poortmans, Jozef; John, Joachim.: The impact of interstitial Fe contamination on n-type Cz-Silicon for high efficiency solar cells. SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 211 Paper: 110550 **(2020)**
2. Soha, Márton; Braun, Mihály; Viktor, Takáts; Hakl, József; Fodor, Tamás; Braun, Ádám; Szabó, István; Haslinger, Michael; John, Joachim; Vad, Kálmán.: Investigation of ppb-level surface contamination of n-type silicon solar cells. APPLIED SURFACE SCIENCE 520 p. 146299 Paper: 146299 **(2020)**
3. John, J. ; Hajjiah, A. ; Haslinger, M. ; Soha, Márton ; Urueña, A. ; Cornagliotti, E. ; Tous, L.; Mertens, P.; Poortmans, J.: Deposition behaviour of metal impurities in acidic cleaning solutions and their impact on effective minority carrier lifetime in n-type silicon solar cells. SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 194 pp. 83-88., 6 p. **(2019)**

4. M, Haslinger; M, Soha; S, Jambaldinni; A, Hajjiah; J, Szlufcik; J, Poortmans; J, John.: Novel wet chemical cleaning concepts for high efficiency silicon solar cells. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Brussels, Belgium: WIP - Edizioni Scietifiche, **(2017)** pp. 628-630., 3 p.
5. Haslinger, M; Soha, M; Robert, S; Claes, M; Mertens, PW; John, J.: ‘Just-clean-enough’: Optimization of wet chemical cleaning processes for crystalline silicon solar cells.SOLID STATE PHENOMENA 255 pp. 344-347., 4 p. **(2016)**

Egyéb angol nyelvű közlemények:

1. Paul, W Mertens; Michael, Haslinger; Marton, Soha; Joachim, John.: Study of Mass Transport for Efficient Fluid Processing. ECS TRANSACTIONS 80: 2 pp. 73-79., 7 p. **(2017)**
2. Kuzma-Filipek, I; Recaman-Payo, M; Aleman, M; John, J; Haslinger, M; Cornagliotti, E; Duerinckx, F; Hajjiah, A; Soha, M; Russel, R et al.: Simplified cleaning for 22.5% nPERT solar cells with rear epitaxial emitters. SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 158 pp. 19-23., 5 p. **(2016)**

Konferencia részvétel, poszter

A PhD értekezés anyagához kapcsolódó előadások

1. Marton Soha, Mihaly Braun, Viktor Takats, Attila Csik, Jozsef Hakl, Tamas Fodor, Michael Haslinger, Mateusz Gocyla, Joachim John, Kalman Vad.: N-típusú szilícium cellák vizsgálata különböző átmeneti fémek szabályozott ppb-szintű szennyeződésével. Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Sopron **2019**. augusztus 21-24.
2. M. Soha, M. Braun, V. Takáts, J. Hakl, T. Fodor, A. Braun, I. Szabó, M. Haslinger, M. Gocyla, J. John, K. Vad.: Investigation of ppb-level surface contamination of n-type silicon solar cells. Conference on Solid State Analysis 20th Jubilee! Wien 1-3 July **2019**.
3. Soha, Márton; Mihaly, Braun; Adam, Braun; Viktor, Takats; Csík, Attila; Jozsef, Hakl; Tamas, Fodor; Michael, Haslinger; Mateusz, Gocyla; Joachim, John et al.: Investigation of n-type silicon cells with controlled ppb level contaminations of different transition metals. Olomouc, Csehország: Czech Vacuum Society (**2018**), 1 p

Egyéb előadás, poszter

1. Bodnár Eszter, Soha Márton, Fodor Tamás, Vad Kálmán, Hakl József, Takáts Viktor.: Szemcsehatár-diffúzió vizsgálata LEIS-szel. Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Sopron **2019.** augusztus 21-24.

Soha Márton: Doktori (PhD) értekezés tézisei



**DEBRECENI
EGYETEM**

**DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR**

H-4002 Debrecen, Egyetem tér 1, Pf.: 400

Tel.: 52/410-443, e-mail: publikaciok@lib.unideb.hu

Nyilvántartási szám: DEENK/222/2021.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Soha Márton

Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10062459

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

1. **Soha, M.**, Braun, M., Takáts, V., Hakl, J., Fodor, T., Braun, Á., Szabó, I. A., Haslinger, M., John, J., Vad, K.: Investigation of ppb-level surface contamination of n-type silicon solar cells.
Appl. Surf. Sci. 520, 1-7, 2020. ISSN: 0169-4332.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146299>
IF: 6.182 (2019)
2. Hajjiah, A., **Soha, M.**, Gordon, I., Poortmans, J., John, J.: The impact of interstitial Fe contamination on n-type Cz-Silicon for high efficiency solar cells.
Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 211, 1-7, 2020. ISSN: 0927-0248.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110550>
IF: 6.984 (2019)
3. John, J., Hajjiah, A., Haslinger, M., **Soha, M.**, Urueña, A., Cornagliotti, E., Tous, L., Mertens, P. W., Poortmans, J.: Deposition behaviour of metal impurities in acidic cleaning solutions and their impact on effective minority carrier lifetime in n-type silicon solar cells.
Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 194, 83-88, 2019. ISSN: 0927-0248.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.001>
IF: 6.984
4. Haslinger, M., **Soha, M.**, Robert, S., Claes, M., Mertens, P. W., John, J.: 'Just-Clean-Enough': Optimization of Wet Chemical Cleaning Processes for Crystalline Silicon Solar Cells.
Solid State Phenomena. 255, 344-347, 2016. ISSN: 1012-0394.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.255.344>

Idegen nyelvű konferencia közlemények (1)

5. Haslinger, M., **Soha, M.**, Jambaldinni, S., Hajjiah, A., Szlufcik, J., Poortmans, J., John, J.: Novel wet chemical cleaning concepts for high efficiency silicon solar cells.
In: 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, WIP - Edition Scientifique, Brussels, 628-630, 2017.





**DEBRECENI
EGYETEM**

**DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR**

H-4002 Debrecen, Egyetem tér 1, Pf.: 400

Tel.: 52/410-443, e-mail: publikaciok@lib.unideb.hu

Idégen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

6. **Soha, M.**, Braun, M., Braun, Á., Takáts, V., Csik, A., Haki, J., Fodor, T., Haslinger, M., Gocyla, M., John, J., Szabó, I. A., Vad, K.: Investigation of n-type silicon cells with controlled ppb level contaminations of different transition metals.
In: 17th Joint Vacuum Conference : Book of absrtacts, [s.n.], Olomouc, 112-112, 2018.

További közlemények

Idégen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

7. Mertens, P. W., Haslinger, M., **Soha, M.**, John, J.: Study of Mass Transport for Efficient Fluid Processing.
ECS Trans. 80 (2), 73-79, 2017. ISSN: 1938-6737.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1149/08002.0073ecst>
8. Kuzma-Filipek, I., Recaman-Payo, M., Aleman, M., John, J., Haslinger, M., Cornagliotti, E., Duerinckx, F., Hajjiah, A., **Soha, M.**, Russel, R., Sharma, A., Urueña, A., Szlufcik, J., Gordon, I.: Simplified cleaning for 22.5% nPERT solar cells with rear epitaxial emitters.
Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 158, 19-23, 2016. ISSN: 0927-0248.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.06.036>
IF: 4.784

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 24,934

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
20,15

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudánymetriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2021.04.27.



Short Thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

**Investigation of ppb level surface contamination of Si
substrates used for solar cell fabrication**

Soha Márton

Supervisor: **Dr. Vad Kálmán**
Co-supervisor: **Dr. Szabó István**



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Physics

Debrecen, 2021

Introduction and objectives

For a long time, solar energy was more expensive than fossil materials, but thanks to unwavering large-scale growth and technological development, its price has become comparable to conventional energy sources. Since the discovery of silicon-based solar devices in Bell's laboratory in the U.S. in the 1940s, their development has not stopped. With a market share of 90 % in 2015, silicon-based solar cells remained the market leader in the PV market, which is still the case today.

Contamination of semiconductor silicon cells greatly affects their performance properties, such as the service life of minority charge carriers. During fabrication, the incorporation of metal contaminants into the silicon (removal of damage after sawing the silicon casting) should be avoided as they reduce the performance of the solar cells.

The advanced concept of photovoltaic silicon solar cells, especially high efficiency *n*-type solar cells, requires a suitable wet cleaning process to remove metal contaminations prior to high temperature processes such as diffusion and passivation. The cost of the cleaning process should be as low as possible,

which requires the optimized use of chemicals by extending the life of the tank.

Controlled contaminations were performed by immersing the silicon wafers in dilute HCl-based ($\text{pH}=1.3$) solutions containing well-defined ppb-range metal concentrations. The deposition behavior of impurities can be described mathematically by an adsorption isotherm theory. Controlled contamination simulates metal pollution on the surface of silicon and in bulk in the solar cell industry.

The aim of the dissertation is to investigate the effect of different transition metals (Fe, Cu, Co, Zn, Ti, and Cr) on the surface of silicon, their location on it, how much the service life of minority charge carriers changes, and how these contaminants can be removed effectively. I also aim to present a practical cleaning application during the dissertation.

Abbreviations

Cz-Si: Czochralski-Silicon

DIW: De-Ionized Water

TXRF: Total Reflection X-ray Fluorescence

VPD-DC: Vapor Phase Decomposition - Droplet Collection

LA-ICP-MS: Laser Ablation Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry

DIW/O₃/HF/HCl: De-Ionized Water / Ozone / Hydrogen-Fluoride / Hydrogen-Chloride

New scientific results

Thesis Point 1: I have developed a new contamination process that indirectly applies metal contamination to *n*-type Cz-Si in an acidic medium.

Contamination experiments were performed with Fe, Cu, Co, Zn, Ti, and Cr transition metals at concentrations of 30, 100, 300, 1000, and 3000 ppb. The cleaning solution is DIW/HCl, pH 1.3. The plates were immersed in the solution for 5 min and then washed with DIW overflow for 5 min as well. This arrangement simulated real conditions, those present in chemical tanks during solar cell fabrication. A well-defined amount of metal contaminant was injected into the liquids by the addition of commercially available standard metal solutions.

Thesis Point 2: I investigated the adsorption behavior of the surface metal contamination of silicon in acidic liquid with TXRF, and from the obtained data I determined the amount of cleaning solution needed to clean the Si surface, i.e. to reduce the metal contamination to 10^{10} atoms/cm².

The detection limit of the method for the tested metals is between $5 \cdot 10^8$ - $1 \cdot 10^9$ atoms/cm². Such a low detection limit can be achieved with a combination of VPD-DC and TXRF. Due to the adsorption process on the surface of the silicon plate, the degree of contamination increases in proportion to the metal concentration of the solution. The deposition rate of the metal contaminant is specific to each metal ion in a given fluid and depends on the pH of the cleaning solution. The relationship between solution and surface metal concentrations can be described by Langmuir isotherm theory. By fitting the measured surface metal concentration points with the adsorption isotherm theory, three fitting parameters can be determined.

Furthermore, I obtained values that determine the minimum amount of wet chemical cleaning solution required to clean the silicon surface.

Thesis Point 3: Using a uniform 40 minute oxygen treatment heat treatment at 975 °C and at the same time surface passivation for the bulk diffusion of transition metals deposited on the surface, I determined the lifetime of the

minority charge carrier as a function of the surface contaminant concentration.

I used WCT-120 type photoconductive measurement system for photoluminescence measurements. I used this system to measure the lifetime of the minority charge carrier. The effect of tank contamination on the actual life of a minority carrier varies greatly depending on the metal contamination. I observed that Co, Fe and Cu have a strong effect on the deterioration of the actual life of the minority carrier, e.g. $2 \cdot 10^{10}/\text{cm}^2$ Fe surface concentration can reduce the actual life of the minority carrier by 75 %, while Ti, Zn and Cr are moderate and only high surface concentrations above $10^{12}/\text{cm}^2$ result in a decrease in the life of the minority carrier.

I investigated the effect of interstitial Fe contamination on the effective minority carrier life of *n*-type Cz-silicon bulk material in high-efficiency solar cells. I found that initially all the Fe atoms present on the surface enter the bulk material and become electrically active as interstitial Fe after being heat treated at 975 °C for 1 hour.

Thesis Point 4: I have demonstrated that the new cleaning process based on DIW/O₃/HF/HCl is effective in removing hazardous transition metal contaminants, highly effective in removing Co, and also more economical than previous methods.

For each transition metal, my most contaminated samples (3000 ppb) were subjected to a chemical cleaning process. I used four different solutions. The first was HF/HCl, which is a cheap and relatively effective form of purification. The second is H₂SO₄/O₃+HF/HCl, a purification form published 30 years ago, and the third, DIW/O₃+HF/HCl, is a purification process developed by IMEC. Finally, I developed a process that proved to be more effective than the first 3 methods and removed most metal contaminants with the best efficiency and improved the life of minority charge carriers.

Thesis Point 5: I determined the lateral distribution of surface contaminants in silicon wafers and found that the distribution of Cu contamination on the roughened surface is not uniform.

Cu and Fe metal contaminants applied to Si plates were tested at different impurity levels by LA-ICP-MS. Sampling was performed by scanning the surface, and data were collected from adjacent circular surfaces. The diameter of a circle was 100 μm and the energy density of the laser light was 5 J/cm². The LA-ICP-MS method demonstrated the efficiency of measuring ppb-level surface impurities. I compared the measured concentrations with the TXRF results of the IMEC research institute in Belgium. The study of this phenomenon is important both for theory and for the solar industry.

The LA-ICP-MS method provided a good opportunity to map the lateral distribution of the chemical elements of the surface contaminant to determine whether the observed contaminant has a homogeneous or patterned structure. I present the results with the surface distribution of the Cu impurity. I scanned an area of 500·500 μm^2 with the laser beam. Background intensities were calculated based on data recorded immediately before the start of scanning. The distribution of the elements can be created from the result matrix.

Acknowledgments

I would like to thank my supervisor, Dr. Kálmán Vad, for helping me with everything, I was always able to turn to him for advice during my work.

I would also like to thank the co-supervisor, Dr. István Szabó, for his help with the aging measurement.

I am grateful to Michael Haslinger and Joachim John and the PV group who helped me with my work at the IMEC research institute in Leuven on controlled contamination.

From ATOMKI (Nuclear Research Institute) I would like to thank my colleagues Dr. Viktor Takáts, Dr. József Hakl, Dr. Attila Csík, Dr. Tamás Fodor and Dr. Mihály Braun for their help.

I would like to thank Dr. Lajos Daróczi from the Institute of Physics of the University of Debrecen for their help.

Finally, I would also like to thank my family, girlfriend, and friends for their support in helping me write my dissertation through difficulty.

Publications

List of publications related to the dissertation

1. Hajjiah, Ali; Soha, Márton; Gordon, Ivan; Poortmans, Jozef; John, Joachim.: The impact of interstitial Fe contamination on n-type Cz-Silicon for high efficiency solar cells. SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 211 Paper: 110550 **(2020)**
2. Soha, Márton; Braun, Mihály; Viktor, Takás; Hakl, József; Fodor, Tamás; Braun, Ádám; Szabó, István; Haslinger, Michael; John, Joachim; Vad, Kálmán.: Investigation of ppb-level surface contamination of n-type silicon solar cells. APPLIED SURFACE SCIENCE 520 p. 146299 Paper: 146299 **(2020)**
3. John, J. ; Hajjiah, A. ; Haslinger, M. ; Soha, Márton ; Urueña, A. ; Cornagliotti, E. ; Tous, L.; Mertens, P.; Poortmans, J.: Deposition behaviour of metal impurities in acidic cleaning solutions and their impact on effective minority carrier lifetime in n-type silicon solar cells. SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 194 pp. 83-88., 6 p. **(2019)**

4. M, Haslinger; M, Soha; S, Jambaldinni; A, Hajjiah; J, Szlufcik; J, Poortmans; J, John.: Novel wet chemical cleaning concepts for high efficiency silicon solar cells. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Brussels, Belgium: WIP - Edizioni Scietifiche, **(2017)** pp. 628-630., 3 p.
5. Haslinger, M; Soha, M; Robert, S; Claes, M; Mertens, PW; John, J.: ‘Just-clean-enough’: Optimization of wet chemical cleaning processes for crystalline silicon solar cells.SOLID STATE PHENOMENA 255 pp. 344-347., 4 p. **(2016)**

List of other publications

1. Paul, W Mertens; Michael, Haslinger; Marton, Soha; Joachim, John.: Study of Mass Transport for Efficient Fluid Processing. ECS TRANSACTIONS 80: 2 pp. 73-79., 7 p. **(2017)**
2. Kuzma-Filipek, I; Recaman-Payo, M; Aleman, M; John, J; Haslinger, M; Cornagliotti, E; Duerinckx, F; Hajjiah, A; Soha, M; Russel, R et al.: Simplified cleaning for 22.5% nPERT solar cells with rear epitaxial emitters. SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 158 pp. 19-23., 5 p. **(2016)**

Conference participation

Presentations related to the PhD dissertation

1. Marton Soha, Mihaly Braun, Viktor Takats, Attila Csik, Jozsef Hakl, Tamas Fodor, Michael Haslinger, Mateusz Gocyla, Joachim John, Kalman Vad.: N-típusú szilícium cellák vizsgálata különböző átmeneti fémek szabályozott ppb-szintű szennyeződésével. MAGYAR FIZIKUS VÁNDORGYULÉS, Sopron **2019**. augusztus 21-24.
2. M. Soha, M. Braun, V. Takáts, J. Hakl, T. Fodor, A. Braun, I. Szabó, M. Haslinger, M. Gocyla, J. John, K. Vad.: Investigation of ppb-level surface contamination of n-type silicon solar cells. Conference on Solid State Analysis 20th Jubilee! Wien 1-3 July **2019**.
3. Soha, Márton; Mihaly, Braun; Adam, Braun; Viktor, Takats; Csík, Attila; Jozsef, Hakl; Tamas, Fodor; Michael, Haslinger; Mateusz, Gocyla; Joachim, John et al.: Investigation of n-type silicon cells with controlled ppb level contaminations of different transition metals. Olomouc, Csehország: Czech Vacuum Society (**2018**), 1 p

Other presentations, posters

1. Bodnár Eszter, Soha Márton, Fodor Tamás, Vad Kálmán, Hakl József, Takáts Viktor.: Szemcsehatár-diffúzió vizsgálata LEIS-szel. Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Sopron **2019.** augusztus 21-24.



Registry number: DEENK/222/2021.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Márton Soha

Doctoral School: Doctoral School of Physics

MTMT ID: 10062459

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (4)

1. **Soha, M.**, Braun, M., Takáts, V., Hakl, J., Fodor, T., Braun, Á., Szabó, I. A., Haslinger, M., John, J., Vad, K.: Investigation of ppb-level surface contamination of n-type silicon solar cells.
Appl. Surf. Sci. 520, 1-7, 2020. ISSN: 0169-4332.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146299>
IF: 6.182 (2019)
2. Hajjiah, A., **Soha, M.**, Gordon, I., Poortmans, J., John, J.: The impact of interstitial Fe contamination on n-type Cz-Silicon for high efficiency solar cells.
Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 211, 1-7, 2020. ISSN: 0927-0248.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110550>
IF: 6.984 (2019)
3. John, J., Hajjiah, A., Haslinger, M., **Soha, M.**, Urueña, A., Cornagliotti, E., Tous, L., Mertens, P. W., Poortmans, J.: Deposition behaviour of metal impurities in acidic cleaning solutions and their impact on effective minority carrier lifetime in n-type silicon solar cells.
Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 194, 83-88, 2019. ISSN: 0927-0248.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.001>
IF: 6.984
4. Haslinger, M., **Soha, M.**, Robert, S., Claes, M., Mertens, P. W., John, J.: 'Just-Clean-Enough': Optimization of Wet Chemical Cleaning Processes for Crystalline Silicon Solar Cells.
Solid State Phenomena. 255, 344-347, 2016. ISSN: 1012-0394.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.255.344>

Foreign language conference proceedings (1)

5. Haslinger, M., **Soha, M.**, Jambaldinni, S., Hajjiah, A., Szlufcik, J., Poortmans, J., John, J.: Novel wet chemical cleaning concepts for high efficiency silicon solar cells.
In: 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, WIP - Edition Scientifique, Brussels, 628-630, 2017.





Foreign language abstracts (1)

6. **Soha, M.**, Braun, M., Braun, Á., Takáts, V., Csik, A., Haki, J., Fodor, T., Haslinger, M., Gocyla, M., John, J., Szabó, I. A., Vad, K.: Investigation of n-type silicon cells with controlled ppb level contaminations of different transition metals.
In: 17th Joint Vacuum Conference : Book of abstracts, [s.n.], Olomouc, 112-112, 2018.

List of other publications

Foreign language scientific articles in international journals (2)

7. Mertens, P. W., Haslinger, M., **Soha, M.**, John, J.: Study of Mass Transport for Efficient Fluid Processing.
ECS Trans. 80 (2), 73-79, 2017. ISSN: 1938-6737.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1149/08002.0073ecst>
8. Kuzma-Filipek, I., Recaman-Payo, M., Aleman, M., John, J., Haslinger, M., Cornagliotti, E., Duerinckx, F., Hajjiah, A., **Soha, M.**, Russel, R., Sharma, A., Urueña, A., Szlufcik, J., Gordon, I.: Simplified cleaning for 22.5% nPERT solar cells with rear epitaxial emitters.
Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 158, 19-23, 2016. ISSN: 0927-0248.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.06.036>
IF: 4.784

Total IF of journals (all publications): 24,934

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 20,15

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóster have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

27 April, 2021

