



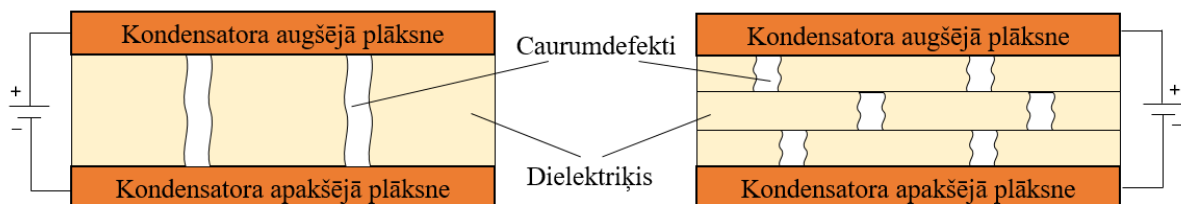
I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Informatīvais ziņojums par ERAF projektā No. 1.1.1.1/16/A/203, “Daudzslāņu silīcija nanokondensators ar uzlabotiem dielektriskiem slāņiem” paveikto laika posmā 01.11.2019.-29.02.2020. un projekta galvenie rezultāti

Pēc projekta vidusposma (28.12.2018) un līdz projekta īstenošanas beigām darbs koncentrējās uz nanokondensatora (NC) ar daudzslāņa Si_3N_4 dielektriķi izgatavošanas tehnoloģijas atkārtojamības pārbaudi un izgatavošanas tehnoloģijas prototipa izstrādi laboratorijas vidē. Projekta īstenošana tika pabeigta 2020.gada 29.februārī.

Projekta rezultātā tika izstrādāta daudzslāņu Si_3N_4 dielektriķa iegūšanas metode pielietojumiem nanokondensatoros. Saskaņā ar šo metodi, vairākus Si_3N_4 nanoslāņus nogulsnē cits uz cita, izmantojot ķīmiskās tvaiku nogulsnešanas paņēmieni, saskaņā ar ķīmisko reakciju starp silāna (SiH_4) un amonjaka (NH_3) gāzēm: $3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$. Pēc katra nanoslāņa nogulsnešanas apstādina SiH_4 gāzes padevi uz nogulsnešanas reaktoru un veic nogulsnētā Si_3N_4 virsmas atkvēlināšanu 700–800 °C temperatūrā NH_3 gāzes plūsmā. Tad atkal ieslēdz SiH_4 gāzes padevi un nogulsnē nākamo Si_3N_4 nanoslāni. Nanoslāņu nogulsnešanu un to virsmas atvēlināšanu NH_3 gāzes plūsmā atkārti, līdz tiek sasniegts vēlamais dielektrisko Si_3N_4 nanoslāņu skaits.

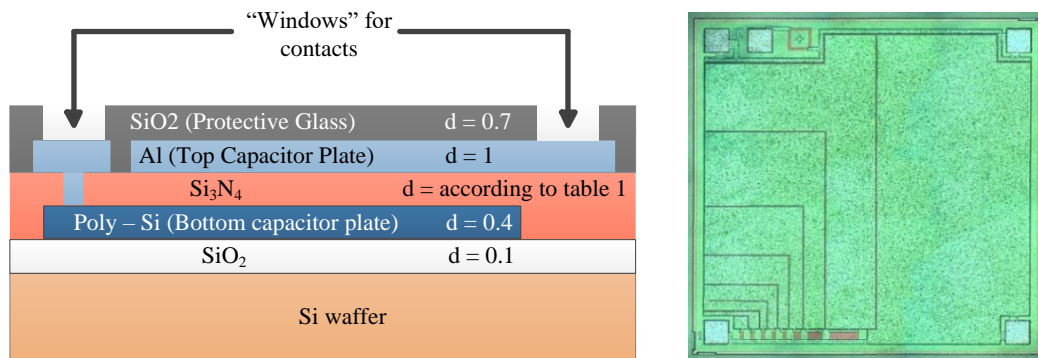
Izmantojot šādu dielektriķa izgatavošanas metodi, novērš caurumdefektu veidošanos plānā dielektriskajā slānī. Caurumdefekti ir tipiskais defektu veids plānos dielektriskajos slāņos, kura iegūšanas varbūtība palielinās, samazinoties dielektriskā slāņa biezumam līdz nanometriem. Caurumdefekti var izraisīt elektrisko īssavienojumu starp kondensatora augšējo un apakšējo elektrodu, kā arī caurumdefekti samazina kondensatora caursites spriegumu. Caurumdefektus ir iespējams novērst, izgatavojot dielektriķi no vairākiem viens uz otra uzklātiem vienāda materiāla nanoslāņiem. Šajā gadījumā katrs nākamais slānis aizklāj iepriekšējā slāņa caurumdefektus, kā tas ir shematiski parādīts 1. attēlā.



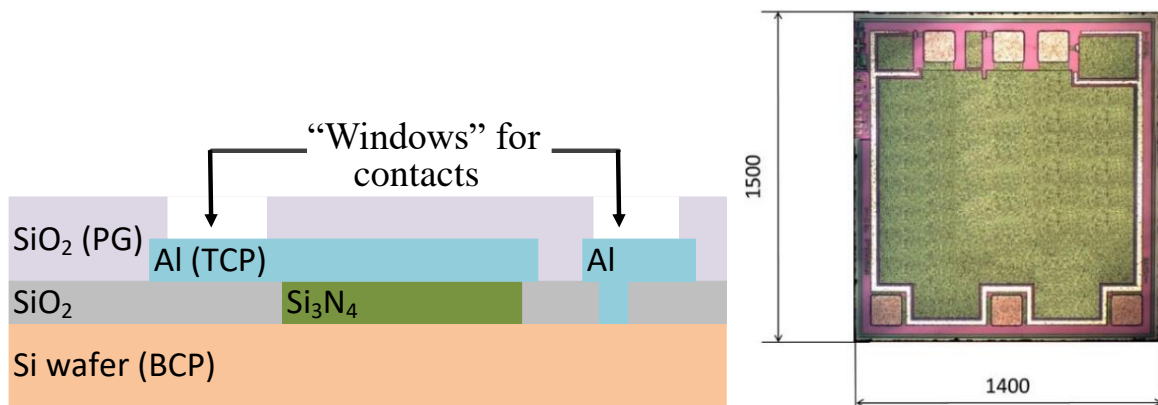
1.attēls. Caurumdefektu novēršana daudzslāņa dielektriķī: pa kreisi – vienslāņa dielektriķis, kurā caurumdefekti iziet caur pilnu dielektriķa biezumu; pa labi – daudzslāņa dielektriķis, kurā katrs nākamais dielektriskais nanoslānis aizklāj iepriekšējā nanoslāņa caurumdefektus.

Par izstrādāto metodi 2019. gadā 23. decembrī Latvijas Patentu valdē (PV) *tika iesniegts patenta pieteikums* Nr. P-19-17 "Plāna daudzslāņu dielektriķa nogulsnešanas paņēmieni". Patenta pieteikuma A publikācija (LV15492A) ir publicēta PV Oficiālā izdevumā 2020. gada 20. martā (305.lpp.): <https://www.lrpv.gov.lv/sites/default/files/20200320.pdf#page=305>

Pamatojoties uz izstrādāto daudzslāņu Si_3N_4 dielektriķa nogulsnešanas metodi, projekta rezultātā tika izstrādāti divi nanokondensatoru izgatavošanas tehnoloģijas prototipi. **Pirmajā prototipā** (2.attēls) nanokondensatora apakšējo elektrodu izgatavo no polikristāliskā silīcija (Poly-Si). Polikristāliskais silīcijs ir mikroelektronikā izplatīts materiāls, ko izmanto elektrodu izgatavošanai mikroelektroniskās komponentēs. Vidusposma rezultāti parādīja¹, ka Poly-Si elektrodam ir graudaina struktūra un tā virsmas raupjums varētu būt salīdzināms ar Si_3N_4 nanoslāņa biezumu, ja Si_3N_4 nanoslāņa biezums ir daži desmiti nanometru. Šajā gadījumā Si_3N_4 nanoslāņa raupjums atkārtoto Poly-Si raupjumu. Paaugstināts dielektriķa raupjums nanokondensatora gadījumā ir nevēlams, jo palielinās nanokondensatora dielektriskās caursītes varbūtība un pieaug noplūdes strāva.



2. attēls. Prototips Nr. 1 – nanokondensators ar daudzslāņu Si_3N_4 dielektriķi, kurā apakšējo elektrodu izgatavo no Poly-Si: pa kreisi – slāņu struktūra; pa labi – kondensatora topoloģija (viena kondensatora laukums ir $2,95 \text{ mm}^2$); d – slāņu biezumi (μm). Si_3N_4 dielektriķa parametri ir parādīti Tabulā 1.



3. attēls. Prototips Nr. 2 – nanokondensators ar daudzslāņu Si_3N_4 dielektriķi, kurā par apakšējo elektrodu izmanto Si plāksni: pa kreisi – slāņu struktūra; pa labi – kondensatora topoloģija (viena kondensatora laukums ir $2,1 \text{ mm}^2$). Si_3N_4 dielektriķa parametri ir uzrādīti Tabulā 1.

¹ Avotina, L., Pajuste, E., Romanova, M., Enichek, G., Zaslavskis, A., Kinerte, V., Avotins, J., Dekhtyar, Yu., Kizane, G. Surface morphology of single and multilayer silicon nitride dielectric nano-coatings. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 2020, 26(1), pp.25-29. <http://matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/21479>

Lai novērstu minēto trūkumu, tika izstrādāts *otrais tehnoloģijas prototips* (3.attēls), kurā Poli-Si elektroda vietā izmanto zemās pretestības Si plāksni, jo tās raupjums sastāda ~0.1 nm, kas neietekmē Si₃N₄ slāņa raupjumu¹.

Tabula 1

Daudzslāņa Si₃N₄ dielektriķa parametri – biezums un nanoslāņu skaits

Daudzslāņu Si ₃ N ₄ dielektriķa biezums (<i>d</i>), nm	Si ₃ N ₄ nanoslāņu skaits dielektriķī
40	5
60	5

Tabulā 2 ir salīdzinātas izstrādāto prototipu parametri ar publiski pieejamajiem jaunākajiem analogiem (*state-of-the-art*).

Tabula 2

Izstrādāto prototipu parametru salīdzinājums ar publiski pieejamajiem jaunākajiem analogiem (*state-of-the-art*)

Parametrs		Prototips 1 (izmanto Poly-Si elektrodu)		Prototips 2 (izmanto zemās pretestības Si plāksni)		
		Daudzslāņa Si ₃ N ₄ dielektriķa biezums, nm				
		40	60	40	60	
Nanokondensatora dielektriskā slāņa dielektriskā izturība ² , MV/cm	Izstrādāts projektā	0.45 * 10 ¹	0.47 * 10 ¹	0.50 * 10 ¹	0.45 * 10 ¹	
	Mūsdienu attīstības līmenis ^{3,4}	1 * 10 ¹				
C, pF/mm ²	Izstrādāts projektā	pie 10 kHz	1700	1300	2200	2200
		pie 1 MHz	1700	1300	2200	2200
	Mūsdienu attīstības līmenis ⁵	480				
Noplūdes strāvas I _{LEAK} blīvums DC režīmā ⁶ , A/m ²	Izstrādāts projektā	<1,7*10 ⁻⁵	<1,7*10 ⁻⁵	<1,7*10 ⁻⁵	<1,7*10 ⁻⁵	
	Mūsdienu attīstības līmenis ⁵	5*10 ⁻²	1*10 ⁻³	5*10 ⁻²	1*10 ⁻³	
Noturība pret jonizējošo starojumu						
Noplūdes strāva DC režīmā, I _{LEAK}	Izstrādāts projektā	Nav ietekmes	Nav ietekmes	Nav ietekmes	Nav ietekmes	
	Mūsdienu attīstības līmenis ⁵	Nav ietekmes	Nav ietekmes	Nav ietekmes	Nav ietekmes	

² Attiecība: (Causrites spriegums)/(daudzslāņa Si₃N₄ dielektriķa biezums).

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_nitride, skatīts 26.02.2020.

⁴ Yota, J. (2011). Effects of deposition method of PECVD silicon nitride as MIM capacitor dielectric for GaAs HBT technology. *ECS Transactions*, 35(4), 229

⁵ S. T. Patton, A. J. Frasca, J. W. Talnagi, D. J. Hyman, B.S. Phillips, J.G. Jones, R. A. Vaia, A. A. Voevodin. (2013). Effect of space radiation on the leakage current of MEMS insulators. *IEEE transactions on nuclear science*, 60(4), 3074-3083.

⁶ Parametra noteikšanai 40 nm un 60 nm biežam dielektriķim izmantoja darba spriegumu 5 V un 10 V attiecīgi.

Dzeltenajā krāsā iezīmētās šūnas parāda parametrus, kas ir ievērojami labāki nekā mūsdienu analogiem. Ar pelēko krāsu iezīmētie parametri ir tādā pašā līmenī kā mūsdienu analogiem. Kopumā salīdzinājums liecina, ka projektā izstrādāto nanokondensatoru parametri pārsniedz vai atrodas tādā pašā līmenī kā to mūsdienu analogi.

Projekta rezultātu izplatīšana zinātniskajās publikācijās un konferencēs

Nopublicēti 5 zinātniski raksti SCOPUS datubāzē iekļautajā žurnālā vai konferenču rakstu krājumā:

1. M. Romanova, L. Avotina, M. Andrulevicius, Yu. Dekhtyar, G. Enichek, G. Kizane, M. Novotný, E. Pajuste, P. Pokorný, T. Yager, A. Zaslavski. Radiation resistance of nanolayered silicon nitride capacitors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2020, 471, pp.17-23. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.03.010>
2. Dekhtyar, Yu., Enichek, G., Romanova, M., Schmidt, B., Vilken, A., Yager, T., Zaslavski, A. Charge Trap Analysis of nanolayer Si_3N_4 and SiO_2 by electron irradiation assisted photoelectron emission. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 2020, 586, 412123. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412123>
3. Avotina, L., Pajuste, E., Romanova, M., Enichek, G., Zaslavskis, A., Kinerte, V., Avotins, J., Dekhtyar, Yu., Kizane, G. Surface morphology of single and multilayer silicon nitride dielectric nano-coatings. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 2020, 26(1), pp.25-29. <http://matssc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/21479>
4. Dekhtyar, Yu., Avotiņa, L., Enichek, G., Romanova, M., Schmidt, B., Shulzinger, E., Sorokins, H., Vilken, A., Zaslavskis, A. Interface of Silicon Nitride Nanolayers with Oxygen Deficiency. *2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference*, Estonia, Tallinn, 8-10 October, 2018. Tallinn University of Technology: 2018, pp.1-4. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8600964>
5. Avotiņa, L., Pajuste, E., Romanova, M., Zaslavskis, A., Enichek, G., Kinerte, V., Zariņš, A., Lescinskis, B., Dekhtyar, Yu., Kizane, G. FTIR Analysis of Electron Irradiated Single and Multilayer Si_3N_4 Coatings. *Key Engineering Materials*, 2018, 788, pp.96-101. www.scientific.net/KEM.788.96

Projekta rezultāti prezentēti starptautiskās zinātniskās konferencēs:

A) Prezentācijas konferencēs ar publikācijām konferenču rakstu krājumā vai tēžu grāmatinā:

1. Avotina, L., Dekhtyar, Yu., Jenichek, G., Kizane, G., Pajuste, E., Romanova, M., Yager, T., Zaslavskis, A. Radiation stability of multilayer silicon nitride nanocapacitors. *20th International Conference on Radiation Effects in Insulators: Book of Abstracts*, Kazakhstan, Nur-Sultan, 19-23 August, 2019.
2. Avotina, L., Romanova, M., Pajuste, E., Enichek, G., Zaslavskis, A., Dekhtyar, Yu., Kizane, G. Electrical properties of single and multilayer silicon nitride dielectric for applications in nanocapacitors. *21st International Conference-School "Advanced Materials and Technologies 2019": Book of Abstracts*, Lithuania, Palanga, 19-23 August, 2019.

3. Andrulevičius, M., Avotiņa, L., Dekhtyar, Yu., Enichek, G., Romanova, M., Shulzinger, E., Sorokins, H., Tamulevičius, S., Vilken, A., Zaslavski, A. XPS, FTIR and photoelectron emission spectroscopies to analyze nanocapacitor silicon nitride nano layered structures. *2nd International Conference on Nanomaterials Science and Mechanical Engineering: Book of Abstracts*, Portugal, Aveiro, 9-12 July, 2019.
4. Yu. Dekhtyar, L. Avotiņa, G. Enichek, M. Romanova, B. Schmidt, E. Shulzinger, H. Sorokins, A. Viļķens, A. Zaslavskis. Interface of Silicon Nitride Nanolayers with Oxygen Deficiency. *2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference*, Estonia, Tallinn, 8-10 October, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8600964>
5. L. Avotina, E. Pajuste, M. Romanova, A. Zaslavskis, G. Enichek, V. Kinerte, Yu. Dekhtyar, G. Kizane. Modifications of Silicon Nitride Bonds under Action of Accelerated Electrons. *RACIRI 2018 Summer School*, Germany, Rügen, 25 Aug-1 Sep., 2018.
6. E. Pajuste, M. Romanova, L. Avotina, G. Enichek, A. Zaslavskis, V. Kinerte, Yu. Dekhtyar, G. Kizane. Surface Morphology of Single and Multilayered Silicon Nitride Dielectric Nanocoatings. *20th International Conference-School "Advanced Materials and Technologies"*, Lithuania, Palanga, 27-31 August, 2018
7. L. Avotina, E. Pajuste, M. Romanova, A. Zaslavskis, V. Kinerte, B. Lescinskis, Yu. Dekhtyar, G. Kizane. FT-IR Analysis of Electron Irradiated Single and Multilayer Si₃N₄ Coatings. *8th International Conference on Silicate Materials "BaltSilica 2018"*, Latvia, Riga, 30 May-1 Jun., 2018. <https://www.scientific.net/KEM.788.96>
8. L. Avotina, Yu. Dekhtyar, M. Romanova, E. Shulzinger, B. Schmidt, A. Viļķens, A. Zaslavski, G. Enichek. Silicon Nitride Multi Nanolayer System Fabricated in One Reactor. *6th International Conference "Telecommunications, Electronics and Informatics (ICTEI 2018)"*, Moldova, Chisinau, 24-27 May, 2018.
9. M. Romanova, L. Avotiņa, R. Zariņš, A. Zariņš, J. Bitenieks, A. Vilimans, A. Zaslavskis, G. Kizane, Yu. Dekhtyar. Electrical properties of single layer and multilayer Si₃N₄ dielectric on Si substrate. *3rd International Conference "Innovative Materials, Structures and Technologies" (IMST2017)*, 27-29 September, 2017, Riga, Latvia.
10. L. Avotina, R. Zarins, E. Pajuste, M. Romanova, J. Bitenieks, J. Zicāns, A. Zaslavskis, Yu. Dekhtyar, G. Kizane. Influence of ionizing radiation on the Si₃N₄ coatings on Si substrate. *19th International Conference-School "Advanced Materials and Technologies 2017"*, 27-31 August, 2017, Palanga, Lithuania.
11. L. Avotina, R. Zarins, M. Romanova, E. Pajuste, A. Zaslavskis, Yu. Dekhtyar, G. Kizane. Characterisation of silicon nitride coatings irradiated with accelerated electrons and bremsstrahlung radiation. *International Conference "Functional Materials and Nanotechnologies 2017" (FMNT-2017)*, 24-27 April, 2017, Tartu, Estonia.

B) Mutiskās prezentācijas konferencēs bez publikācijas:

12. L. Avotiņa, E. Pajuste, M. Romanova, A. Zaslavskis, Yu. Dekhtyar, G. Kizane. FTIR studies of radiation stability of multilayered silicon nitride thin films for nanocapacitors. *78th International Scientific Conference of the University of Latvia*, Riga, Latvia, February 21, 2020.
13. T. Yager, A. Viļķens, E. Shulzinger, Yu. Dekhtyar, G. Jeņičeks, A. Zaslavskis. Investigation of electrical defects of dielectric layers of Si₃N₄. *60th International Scientific Conference of Riga Technical University*, Riga, Latvia, October 17, 2019.
14. E. Pajuste, M. Romanova, L. Avotina, A. Zaslavskis, G. Enichek, G. Kizane, Yu. Dekhtyar. Influence of fabrication parameters on morphology of Si₃N₄ dielectric of nanocapacitor. *77th International Scientific Conference of the University of Latvia*, Riga, Latvia, February 1, 2019.

15. T. Yager, M. Romanova, Yu. Dekhtyar, A. Zaslavskis, G. Enichek, G. Kizane. Influence of manufacturing technology and ionizing radiation on electron emission properties of Si₃N₄ dielectric nanolayers. *59th International Scientific Conference of Riga Technical University*, October 11, 2018, Riga, Latvia
16. L. Avotiņa, E. Pajuste, M. Romanova, A. Zaslavskis, J. Dehtjars, G. Kizane. Characterization of chemical bonds in nanolayers of silicon nitride with FT-IR. *76th International Scientific Conference of the University of Latvia*, Riga, Latvia, February 2, 2018.
17. M. Romanova, Yu. Dekhtyar, A. Vilimans, A. Zaslavskis, G. Kizane. Study of electrical defects in Si₃N₄ dielectric layer. *58th International Scientific Conference of Riga Technical University*, October 13, 2017, Riga, Latvia.

Projekta fotogalerija tiešsaistes medijos

- 2020. gada 21.februārī organizētais seminārs uzņēmējiem “Nanokondensatori Latvijā”:
<https://www.facebook.com/biedribaLETERA/posts/204933940884315>
<https://www.letera.lv/letera-biedri-iepazistas-ar-inovativu-nanokondensatoru-razosanas-tehnologiju>
- Fotogalerija “Tiecamies uz pasaules nanokondensatoru tirgu!”:
https://www.facebook.com/pg/rigastehniskauniversitate/photos/?tab=album&album_id=3643198279053551
- Informācija medijiem RTU mājas lapā:
<https://www.rtu.lv/lv/universitate/masu-medijiem/zinas/atvert/rada-tehnologiju-kas-var-palidzet-latvijas-uznemumiem-ieklut-pasaules-nanokondensatoru-tirgu>

Publicēts 13.03.2020.