TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja Tehnoloogiateaduskond

Keemia Instituut

Friedrich Kaasik

Süsinik-ioonvedelik-polümeer komposiitmaterjalist täiturite valmistamine

Bakalaureusetöö materjalitehnoloogias

Juhendajad: teadur Urmas Johanson?

 doktorant Janno Torop

Tartu 2009

# Sisukord

1. Sisukord**………………………………………………………………………………2**
2. **Sissejuhatus…………………………………………………………………………..**

# 2. Sissejuhatus

Elektroaktiivsed polümeerid on polümeersed komposiitsed materjalid, mis muudavad oma kuju neile rakendaud elektrpinge/voolu/välja toimel. Nad kas painduvad või paisuvad miingis suunas. Taolulis materjale on väga erinavaid [viide Maddeni atiklile]. Ilukirjanduses nimetatakse neid materjale kunstlihasteks, sest mõnedes aspektides meenutab nende võimakus inimlihaseid. Teaduslikus ja popularteaduslikus kirjanduses kutsutakse neid materjale ka arukateks materjalideks ( *smart materals).*  Juhul kui materjaliteadlased on edukad ootaks neid materjale mitmed rakendused robootikas pehmate manipulaatorite alal, mikrotäiturite valdkonnas, seda nii *lab.in-chip* täituritena, optiliste mikroseadmete juhtmine, meditsiini seadnmed. [viited iga valdkonna taha] Käesolev töö baseerub uudsele materjalile, mis võimaldab teha nii painduvaid kui lineaarseid täituried. Tegemist on karbiidse süsiniku, ioonivedeliku ning polümeeri elektroaktiivse komposiidiga (CDC-IL-EAP)[viited kahele patendile]. Materjalid on keskkonnasõbralikud ja tuntakse nii õhus kui vees töötavaid elektroaktiivseid polümeere. Materjalid teeb eriti atraktiivseks asjaolu, et töötamisel on nad täiesti müravabad. Suurt läbimurret oodatakse täituritelt, mille valmistamine põhineks printimise tehnoloogai sarnasel meetodil [[1]](#endnote-3). See võimaldaks oluliselt alandada valmistamiskulusid masstootmises. ja tagaks parema kontrolli sünteesiparameetrite üle. Elektromehaanilist täiturit võib vaadelda mitmest kihist koosneva kilena (paksus 0,1-0,3 mm), mille keskel paikneb poorne polümeermaatriks. See polümeer on määrav materjali elastsusomaduste kujunemisel ning samal ajal on ta mahutiks ioonvedelikule. Ioonsed polümeer-metall komposiit (*Ionic polymer-metal composite* IPMC) materjalidel katavad ioonvedelikuga täidetud (1) polümeerkile vastaskülgi väärismetalli kihid, mis tagavad täituri töötamisel ühtlase potentsiaalijaotuse elektroodi pinnal ning samas kaitsevad metalli kihid täituri sisemust väliskeskkonna mõjude eest. Lisaks on metallelektroodidel ülesanne takistada täituri töötamisel ioonvedeliku emissiooni polümeermaatriksist. Teaduskirjanduses on mitmeid publikatsioone, kus on valmistatud polümeertäitureid, millel pinda kattev väärismetalli kiht on asendatud näiteks süsiniknanotorusid sisaldava ioonvedelik/polümeer õhukese kilega. Taolised täiturid valmistati kiht-kihilisel valamise meetodil, mis on taaskord samm lähemale printimismeetodile[[2]](#endnote-4) . Käesolevas töös on samuti tegemist süsinik elektroodidega ja ei kasutada väärismetalliga katmist.

# Kirjanduse ülevaade

## 3.1 Kunstlihase ehitus

Viimasel ajal on põhiliselt uuritud ioonseid polümeer-metall komposiitide, mille ehitus on üldjuhul kolmekihiline, keskmise osa moodustub ioon-vahetavast membraanist ning see on kaetud kahelt poolt juhtivate metalli kihtidega [[3]](#endnote-5). Välise elektrivälja toimel hakkavad membraanis olevad katioonid koos oma hüdraatmantliga liikuma negatiivse laengu poole, mille tulemusena paindub lihas anoodi suunas.



Joonis 1. Katioonselektiivse ioonjuhtiva polümeeri läbilõige tavaolekus ja voolu rakendamisel [[4]](#endnote-6)

Ioonvedelikuga täidetud lihas töötab põhimõtteliselt samamoodi, kus ioonvedelik dissotseerub voolu toimel katiooniks ja aniooniks. Enamikel ioonvedelikel on kation tunduvalt suurem kui anion ja see tekitab olukorra kus üks pool lihasest venib pikemaks ja teine tõmbab kokku.



Joonis 2. Ioonvedelikuga täidetud lihas, tavaolekus ja voolu rakendamisel 3.

## 3.2 kasutatavad polümeerid

Põhiliselt kasutatakse ioonvahetavaid polümeere, mis on stüreeni ja divinüülbenseeni kopolümeerid. Oluline parameeter on stürreeni ja divinüülbenseeni suhe, mis määrab vee sidustumise ja võimekuse ioone vahetada. Katioone vahetavate materjalide puhul on tihti kasutatavaks rühmaks sulfonaatrühm. Teised tuntud ioonvahetavad materjalid baseeruvad perfluoreeritud alkaanidel, kus fikseeritud anioonseteks rühmadeks on SO3- ja COO- või fikseeritud katioonseteks rühmadeks vastavalt ammoonimkatioonid. Tuntumatuks ioonjuhtivad polümeerid on Nafion, Neosepta, Aciplex, ja FlemionTM[[5]](#endnote-7). Antud töös kasutati polümeeriks PVdF(HFP)-d, mis ei ole ioonjuhtiv polümeer. Kuid vahekihi membraaniks kasutati EMIBF4-ja PVdF(HFP) segu kus ioonjuhtivuse tekitas ioonvedelik.

## 3.3 Kasutatavad materjalid elektroodidel

Elektroodidel on teatud omadused, millele ta peab vastama, see teeb ka nende leidmise suhteliselt tülikaks. Elektroodid 1) ei tohi puruneda paindumisel; 2) olema hästi deformeeritav; 3) materjal peab polümeeri pinnaga sobima, st “nakkuma”; 4) peab juhtima hästi elektrit; 5) olema vastupidav keskkonnatingimustele 5.

Paljusid IPMC-sid on kaetud kullaga, mis on keemiliselt suhteliselt inertne ning hea elektrijuhtivusega. Kullaga katmisel on põhilime probleem et tegemist on väga väikeste kulla osakestega ja need võivad hakata lahustuma lihasesse. Samuti on kulla kiht niivõrd õhuke et ta paindub hästi, kuid kipub rebenema ning tekivad nn saarekesed ja siis ei ole elektroodi pind enam nii hea elektrijuht. Lihase kullaga katmisele võimalused võib suures plaanis jagada kaheks: elektrokeemiline sadestamine elektroodi pinnale, või liimides üliõhukese kullakihi lihasele peale. Liimimise vaieldamatuks eeliseks on lihase kullaga katmise kiirus, kuid samas kui kasutatakse liimi vahekihis võib juhtuda et lihase ristijuhtivus halveneb ning lihase töö ei parane.

Olulisel kohal elektroodide materjalides on ka plaatina, mida kasutatakse tema keemilise inertsuse, hea juhtivuse ja suhteliselt suure eripinna tõttu. Plaatina oon suhteliselt kallis metall. Plaatina kantakse põhisilselt lihasele keemilise redutseerimise teel.

Uuem uurimisvaldkond on kasutada süsinik nanotorusid või mikropoorset sütt. Nende suureks eeliseks on suhteliselt mõistlik hind ning kättesaadavus. Süsiniknanotorudel on suhteliselt hea elektrijuhtivus kuid nende hind on suurem kui mikropoorsel söel. Mikroboorse söe kasutamisel on puuduseks ka suhteliselt aeglane liigutus, mille põhjustajaks võib olla madal juhtivus eletroodi kihis.

Electroactive polymers (EAP) are polymer materials which change their shape (bend or have a linear motion) when voltage is applied. They can be used as actuators, sensors or energy harvesting devices. Actuators can undergo a significant amount of deformation while sustaining large forces. These materials are also called as artificial muscles.

Several polymer artificial muscle technologies are being developed that produce similar strains and higher stresses using electrostatic forces, electrostriction, ion insertion, and molecular conformational changes. Materials used include elastomers, conducting and ion conducting polymers, and carbon nanotubes [[[6]](#endnote-8)]. Initial applications are being developed, but further work is necessary to these technologies applicable in a wide range of devices like micro-actuators [[[7]](#endnote-9)], bio-mimetic flexible manipulators in robotics[[[8]](#endnote-10),[[9]](#endnote-11)] and space applications[[[10]](#endnote-12),[[11]](#endnote-13),[[12]](#endnote-14),[[13]](#endnote-15)] as they can be extremely light-weight, have high weight to force ratio, simple mechanics and the possibility to miniaturize.

### Classical Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) actuators

IPMC type of materials has been extensively researched during the last two decades, first reported by Oguro [[[14]](#endnote-16)]. They offer several advantages [[[15]](#endnote-17)]. The IPMC materials consist of a thin ionomeric membrane typically Nafion® *etc* [[[16]](#endnote-18)]. The membrane is coated with a thin layer of noble metal electrodes, such as platinum or gold. Typical cations are Na+, K+, Li+ and Cs+ in water solution. The water-free form of IPMCs, where ionic liquids (IL) are used, has also been studied. Numerous researches have studied electromechanical properties of IPMC-s [[[17]](#endnote-19),[[18]](#endnote-20)]. Several electromechanical [[[19]](#endnote-21),[[20]](#endnote-22)] and physical models [[[21]](#endnote-23),[[22]](#endnote-24)] have been developed. There is a major problem with IPMC materials: maximum force.

### Actuators with high surface area

One promising way to enhance the performance of the actuating system is by increasing the contact-surface area between the electrolyte and the solid framework. Electronically conducting framework materials are shown to form a high-charge capacitance layer [[[23]](#endnote-25)], thereby achieving higher strain of the membrane. Typical approaches include using single-wall carbon nanotubes [[[24]](#endnote-26),[[25]](#endnote-27),[[26]](#endnote-28),[[27]](#endnote-29)], or complex bucky carbon gels [[[28]](#endnote-30),[[29]](#endnote-31),[[30]](#endnote-32)] as candidates for such high surface-area structures.

### Carbide Derived Carbon (CDC) for surface material

CDC is a nanoporous material produced by extraction of metals from metal carbides. The described method [[[31]](#endnote-33)] of CDC synthesis offers unique control over carbon microstructure and allows to fine-tune the porosity at the sub-nanometer scale. There are recent experimental results [[[32]](#endnote-34)] which describe the technology, how to prepare very thin, up to 500nm CDC carbon layers. Several model studies have been done to understand the supercapacitance effects at the microscopic level. Gogotsi and co-workers[[[33]](#endnote-35),[[34]](#endnote-36)] have studied the surface area of CDC by the nonlinear density functional theory (NLDFT) method together with the measurement by the Brunauer–Emmet–Teller (BET) method. A new 3 level cavity model was described [[[35]](#endnote-37),[[36]](#endnote-38)]. Pore/ion size and solvent effects on capacitance were recently studied [[[37]](#endnote-39)] using high-resolution transmission electron microscopy, porosity analyses, NLDFT and BET method.

### Motivation of research

We have recently proposed a novel bending actuator design based on CDC electrodes swelled with IL (Emi-Tf) [[[38]](#endnote-40)], and have compared their electrochemical properties to conventional IPMC candidates with RuO2 based electrodes [[[39]](#endnote-41),[[40]](#endnote-42)]. Even though the dilatometric properties of such kind of systems have been known for some time [[[41]](#endnote-43)], it was only recently when the usage of CDC based materials as actuators was proposed by our group [[[42]](#endnote-44),[[43]](#endnote-45)]. We also proposed a linear actuator based on CDC-IL (EMI-BF4)-polytetrafluoroethylene composite materials [[[44]](#endnote-46)]. This actuator is very similar to supercapacitor. We were not able to explain actuation properties based on current charging theories. For further develop materials for practical applications, the better understanding of the mechanisms governing the actuation in such materials is needed.

# Eksperimentaalne osa

Siin peab olema jutt esellest mida tahetakse teha... j amillest...

## 4.1 Seadmed ja materjalid

Kuumpress: HillsBorough (B 70175), US

Analüütiline kaal: Mettler Toledo, AB 204-S/PH

Pliit ja magnetsegaja: Arex, Velp Scientifica (49130), EU

Ultrahelivann: Sonarex Digital, DK 102 P.

Deioniseeritud vee valmistamise aparaat: Alpha-Q, Millipore

4.2 Kasutatavad kemikaalid, materjalid ja laborinõud

Kasutatud kemikaalid olid kõik analüütiliselt puhtad ning neid kasutati ilma täiendava puhastamiseta.

Kasutatavad kemikaalid:

* polü(-vinülideenfluoriid-heksapropüleen) (PVdF(HFP)) Sigma Aldrich (81433)
* 1-Etüül-3-metüül-imidasoolium tetraflouroboraat EMIBF4
* TiC 800 põhinev süsinikpulber Carbon Nanotec (4026)
* Dimetüülatsetamiid DMAc Fluka (38839)
* Tehniline piiritus

Kasutatavad materjalid:

* Polütetrafluoroetüleen

Kasutatud laborinõud:

* Magnetsegajapulk
* Mõõtpipetid 10ml
* Minigripkotid
* Statiivid, käpad
* Klaasviaalid – 13 ml
* Klaaspulgad

## 4.3 PolümeerMaterjali valmistamine nb pealkirjadele ei käi punkti

4.3.1 Elektroodi valmistamine.

Elektrood koosneb 35 wt% PVdF(HFP), 35 wt% EMIBF4 ja 30 wt% CDC süsinikust. Kaaluti ca 0,1 g (kaks tera) PVdF(HFP)-d 13 ml klaasviaali. Seejärel lisati 1,5 ml DMAc-d ning viaal asetati tõmbekappi ööpäevaks, et polümeer lahustuks täielikult. Järgmisel päeval kaaluti uude klaasviaali polümeerile vastav kogus sütt ja ioonvedelikku. Nendele lisati 0,5 ml DMAc-d ning asetati ultrahelivanni 25 minutiks, maksimaalsel võimsusel. Seejärel lisati söe ja ioonvedelikule eelneval päeval valmistatud polümeeri lahus, kus loputati polümeeri lahuse viaali 5 ml DMAc-ga kvantitatiivseks üleviimiseks. Saadud segu segati järgnevalt magnetsegajaga ca 5 minutit ning asetati uuesti ultrahelivanni 20 minutiks maksimaalsel võimsusel. Kui lahus ultrahelivannist välja võeti, siis oli süsi põhja settinud. Seejäelr segati segu uuesti magnetsegajaga ja valati kuivama selleks tehtud teflon vannile tõmbekappi. Enne valamist eemaldati magnetsegajapulk.

4.3.2 Membraani valmistamine

Kaaluti ca 0,15 g (kolm tera) PVdF(HFP)-d klaasviaali. Seejärel lisati 1,5 ml DMAc-d ning viaal pandi tõmbekappi seisma ööpäevaks, et polümeer ära lahustuks. Järgneval päeval kaaluti uude klaasviaali polümeerile vastav kogus ioonvedelikku ning asetati viaal 30 minutiks ultraheli vanni. Pärast seda valati saadud segu kuivama teflon vannile tõmbekappi.

4.3.3 Lihase valmistamine

Võeti tavaline A 4 paberileht, murti keskelt pooleks

Jõuarvutus 0,035N/0,0595g= 0,588 N/g lihas mis tõstis mutrit.

Teinud 500 tsüklit painutamist ühele, ja teisele poole ning pärast seda liigutus säilis koos jõuga. Lihase ainuke mure on tema aeglus, liigutus võtab aega ca 1 minut. See tuleneb ilmselt CDC süsiniku halvast juhtivusomadustest, kuid ei ole siiani õnnestunud elektroodi juhtivust parndada.

# Viited

# Bibliography

1. **Kati, Karu.** *Kuidas teha pehmeit katisi.* Karulaane : Karu kirjastus, 2009.

1. [↑](#endnote-ref-3)
2. K. Mukai, K. Asaka, K. Kiyohara, T. Sugino, I. Takeuchi, High performance fully plastic actuator based on ionic-liquid-based bucky gel. Elsvier 2008 [↑](#endnote-ref-4)
3. Akle, B. J., Characterization and Modeling of the Ionomer-Conductor Interface in Ionic Polymer Transducers. Ph.D dissertation, Virginia Polytechnic Institute and Sate University, 2005. [↑](#endnote-ref-5)
4. Palmre, V., Vee elektrolüüs ioonsetel polümeer-metall materjalidel põhinevate kunstlihaste töös. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, 2006. [↑](#endnote-ref-6)
5. Kim, K. J, Shahinpoor, M. Ionic polymer-metal composite: II. Manufacturing techniques. In Proceedings of SPIE: *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuator and Devices (EAPAD)*, 18-21 March 2002, San Diego, USA. Washington 2002. SPIE Vol. 4695. [↑](#endnote-ref-7)
6. Tissaphern Mirfakhraia, John D.W. Maddena, and Ray H. Baughman; Polymer Artificial Muscles; *Materials Today*,**10 (**2007),4,30-38. [↑](#endnote-ref-8)
7. E. Smela, *Advanced Materials*, **15** (2003), 6, 481-491. [↑](#endnote-ref-9)
8. Bar-Cohen, Yoseph, *Journal of Advanced Materials*, **38** (2006), 4, 3-9. [↑](#endnote-ref-10)
9. Yamakita, M. Kamamichi, N.; Kozuki, T.; Asaka, K.; Zhi-Wei Luo, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*,(2005), 2035-40. [↑](#endnote-ref-11)
10. Yoseph Bar-Cohen, *Proceedings of the 2004 NASA/DoD Conference on Evolution Hardware (EH’04)*, (2004). [↑](#endnote-ref-12)
11. Tung, Steve; Witherspoon, Scott, *Journal of Spacecraft and Rockets*, **42** (2005), 4, 607-612. [↑](#endnote-ref-13)
12. Carpi, F.; Tralli, A.; De Rossi, D.; Gaudenzi, P. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **43** (2007), 1, 79-92. [↑](#endnote-ref-14)
13. Rosset, S.; Niklaus, M.; Dubois, P.; Shea, H.R.; *Sensors and Actuators*, A: Physical,  **144** (2008), 1, 185-193. [↑](#endnote-ref-15)
14. Oguro, K., Kawami, Y., and Takenaka, H. *Journal of Micromachine Society*, **5** (1992). 27-30. [↑](#endnote-ref-16)
15. Shahinpoor, M., and Kim, K. J., 2001, *Smart Materials and Structures*, **10** (2001), 4, 819-833. [↑](#endnote-ref-17)
16. Nemat-Nasser, S., and Wu, Y., *Journal of Applied Physics*, 93 (2003), 9, 5255-5267 [↑](#endnote-ref-18)
17. de Gennes, P. G., Okumura, K., Shahinpoor, M., *Europhysics Letters*, 50(4) pp. 513-518. [↑](#endnote-ref-19)
18. Li, J. Y., and Nemat-Nasser, S., *Mechanics of Materials*, 32(2000), 5, 303-314. [↑](#endnote-ref-20)
19. Tadokoro, S. et al. 2004. “Modeling IPMC for Design of Actuation Mechanism” in: Bar-Cohen, Y. (ed.), “Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artifical Muscles. Reality, Potential, and Challenges,” SPIE Press, Washington. [↑](#endnote-ref-21)
20. Nemat-Nasser, S. and Thomas, C.W. 2004. “Ionomeric polymer–metal composites”, in: Bar-Cohen, Y. (ed.), “Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artifical Muscles. Reality, Potential, and Challenges,” SPIE Press, Washington. [↑](#endnote-ref-22)
21. Chen, Zheng; Tan, Xiaobo, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13 (2008), 5, 519-529. [↑](#endnote-ref-23)
22. Chen, Zheng; Tan, Xiaobo; Will, Alexander; Ziel, Christopher, *Smart Materials and Structures*, 16 (2007), 4, 1477-1488. [↑](#endnote-ref-24)
23. B.J. Akle, M.D. Bennett, D.J. Leo, K.B. Wiles and J.E. McGrath, J. Mater. Sci., 42 (2007) 7031-7041. [↑](#endnote-ref-25)
24. B. Akle, S. Nawshin and D. Leo, Smart Mater. Struct. 16 (2007) S256-S261. [↑](#endnote-ref-26)
25. .J. Akle and D.J. Leo, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.,* **19** (2008), 905-915. [↑](#endnote-ref-27)
26. B.J. Akle, M.D. Bennett and D.J. Leo, *Proc. SPIE*, **5759** (2005), 153-64. [↑](#endnote-ref-28)
27. T. Fukushima and T. Aida, *Chem. Eur. J.*, **13** (2007) 5048-5058. [↑](#endnote-ref-29)
28. K. Mukai, K. Asaka, K. Kiyohara, T. Sugino, I. Takeuchi, T. Fukushima and T. Aida, *Electrochim. Acta,* **53** (2008), 5555-5562. [↑](#endnote-ref-30)
29. T. Fukushima, K. Asaka, A. Kosaka and T. Aida, *Ang. Chem. Int. Ed.*, **44** (2005), 2410-2413. [↑](#endnote-ref-31)
30. K. Asaka, K. Mukai, I. Takeuchi, K. Kiyohara, T. Sugino, N. Terasawa, K. Hata, T. Fukushima and T. Aida, *Proc. SPIE*, **7037** (2008), 703710. [↑](#endnote-ref-32)
31. Gogotsi, Y., Nikitin, A., Ye, H., Zhou, W., Fischer, J. E., Yi, B., Foley, H. C., Barsoum, M. W., *Nature Materials*, **2** (2003), 591-594. [↑](#endnote-ref-33)
32. Elizabeth N. Hoffman, Gleb Yushin, Bogdan G.Wendler, Michel W. Barsoum, Yury Gogotsi; *Materials Chemistry and Physics* **112** (2008) 587–591 [↑](#endnote-ref-34)
33. J . Chmiola, G. Yushin, Y. Gogotsi, C. Portet, P. Simon, P. L. Taberna, *Science*, **313** (2006), 1760. [↑](#endnote-ref-35)
34. P . I. Ravikovitch, A. Neimark, *Colloids Surf. A*, **11**( 2001), 187–188. [↑](#endnote-ref-36)
35. Jingsong Huang,\* Bobby G. Sumpter, and Vincent Meunier, *Angew. Chem. Int. Ed*., **47** (2008), 520 –524. [↑](#endnote-ref-37)
36. Jingsong Huang,\* Bobby G. Sumpter, and Vincent Meunier; A; *Chem. Eur. J*., **14** (2008), 6614 – 6626. [↑](#endnote-ref-38)
37. Chmiola, J.; Yushin, G.; Dash, R.; Gogotsi, Y., *Journal of Power Sources*, **158** (2006), 1, 765-772. [↑](#endnote-ref-39)
38. Viljar Palmre, Daniel Brandell, Uno Mäeorg, Olga Volobujeva, Andres Punning, Urmas Johanson, Maarja Kruusmaa and Alvo Aabloo, *Smart Mater. Struct,* in print. [↑](#endnote-ref-40)
39. B.J. Akle, M.D. Bennett, D.J. Leo, K.B. Wiles and J.E. McGrath, *J. Mater. Sci.,* **42** (2007) 7031-7041. [↑](#endnote-ref-41)
40. . Akle, S. Nawshin and D. Leo, *Smart Mater. Struct.* 16 (**2007**) S256-S261. [↑](#endnote-ref-42)
41. Hahn, M., Barbieri, O., Campana, F.P., Kötz, R., Gallay, R., *Appl. Phys*. (2006), 633-638. [↑](#endnote-ref-43)
42. Patent application: Actuator and its preparation; Owner: University of Tartu; Authors: Viljar Palmre, Urmas Johanson, Maarja Kruusmaa, Alvo Aabloo; Priority number: EE200800011; Priority date: 29.02.2008 [↑](#endnote-ref-44)
43. Patent application: Actuator; Owner: Tartu Technologies Ltd., University of Tartu; Authors: Jaan Leis, Mati Arulepp, Janno Torop, Urmas Johanson, Alvo Aabloo; Priority number: P200800039; Priority date: 30.05.2008 [↑](#endnote-ref-45)
44. Janno Torop, Mati Arulepp, Jaan Leis, Andres Punning, Urmas Johanson, Alvo Aabloo;, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) SPIE **7287 (**2009). [↑](#endnote-ref-46)