

# FIB-tekniikoiden sovellukset

Kandidaatintutkielma, 27.6.2019

Tekijä:

AARO LANKINEN

Ohjaaja:

ILARI MAASILTA



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
FYSIKAN LAITOS

© 2019 Aaro Lankinen

Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty. This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

## Tiivistelmä

Lankinen, Aaro

FIB-tekniikoiden sovellukset

LuK-tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2019, 47 sivua

Ionimikroskopia (FIB) on pyyhkäisyelektronimikroskopiaa muistuttava nanoskaalan kuvantamis- ja työstämismenetelmä, joka käyttää kevyiden elektronien sijasta massiivisia ioneja. Käsittelen tässä tutkielmassa FIB-laitteistojen kehityskaaren ensimmäisen sukupolven Ga-FIB:stä, toisen sukupolven FIB/SEM-hybridiin ja kolmannen sukupolven selektiiviseen ionilähteeseen. Lisäksi tarkastelen FIB:n moninaisia sovelluksia laboratorio- ja teollisuusympäristössä, nyt ja tulevaisuudessa. Tämä tutkielma on kirjallisuuskatsaus ja se on tarkoitettu avuksi syvemmän tutkimuksen valmisteluun aiheesta kiinnostuneille.

FIB:n pääasiallisia käyttökohteita ovat TEM-näytteenvalmistus ja mikropiirien virheanalyysi ja takaisinmallinnus. Toisen sukupolven kaksipylväslaitteistojen myötä voidaan samalla laitteella kuvantaa elektronisuihkulla ja työstää ionisuihkulla näytettä samanaikaisesti. Tulevaisuudessa FIB:n uskotaan pystyvän yksittäisten atomien istutukseen ja sillä tulee olemaan yhä enemmän sovelluksia nano-optiikan ja -magnetismin, sekä spinelektronikan aloilla. Uusien kasvatus- ja jyrshintäprotokollien myötä FIB:llä voidaan kehittää nanoelektromekaanisten järjestelmien (NEMS) prototyyppisiä yhä nopeammin. FIB on viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana vakiinnuttanut paikkansa niin tutkimus- kuin teollisessa käytössä ja parhaillaan käyttöön otettavien selektiivisten ionilähteiden myötä sen käyttökohteet kasvavat entisestään.

Avainsanat: ionimikroskopia, FIB, sulametalli-ionilähde, LMIS, kaasukenttäionilähde, GFIS, jyrshintä, kasvatus



## Abstract

Lankinen, Aaro

Applications for FIB-techniques

Bachelor's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2019, 47 pages.

Focused ion beam (FIB) is nanoscale imaging and fabrication technique that is similar in operation to scanning electron microscopy, except that it uses massive ions instead of light electrons. In this thesis, I will discuss the development of the FIB from first generation Ga-FIB to second generation FIB-SEM hybrids and third generation selective ion sources. I will also examine its various present and future applications in both laboratory and industrial settings. This thesis is a literature review and it is intended to aid in further research preparation for those interested in the subject.

FIB is primarily used in TEM sample preparation and microcircuit error analysis and reverse engineering. With the advent of second generation dual beam systems, the same instrument can image and fabricate a sample simultaneously using electron and ion beams respectively. In the future, the FIB is believed to be able to implant single atoms and it will have yet more applications in the fields of nano-optics, -magnetism and spintronics. With emerging deposition and milling procedures, the FIB will be able to develop prototypes for nanoelectromechanical systems (NEMS) even faster. During the last twenty years, FIB has solidified its place in both research and industrial use and its potential uses grow ever wider with the recent introduction of selective ion sources.

Keywords: focused ion beam, FIB, liquid metal ion source, LMIS, gas field ion source, GFIS, milling, deposition



## Lyhenteet

CAD	computer-aided design tietokoneavusteinen suunnittelu
EPD	endpoint detection
FIB	focused ion beam ionimikroskopia
GFIS	gas field ion source kaasukenttäionilähde
HIM	helium ion microscopy heliumionimikroskopia
LMAIS	liquid metal alloy ion source sulametalliseosionilähde
LMIS	liquid metal ion source sulametalli-ionilähde
MEMS	microelectromechanical system mikroelektromekaaninen järjestelmä
NEMS	nanoelectromechanical system nanoelektromekaaninen järjestelmä
SEM	scanning electron microscopy pyyhkäisyelektronimikroskopia
STEM	scanning transmission electron microscopy pyyhkäisy-läpivalaisuelektronimikroskopia
TEM	transmission electron microscopy läpäisyelektronimikroskopia





# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>11</b>
<b>2 Teoreettinen tausta</b>	<b>13</b>
2.1 Ioni-kiinteä -vuorovaikutukset . . . . .	13
2.2 FIB-laitteiston osat . . . . .	15
2.2.1 Sulametalli-ionilähde . . . . .	15
2.2.2 Kaasukenttäionilähde . . . . .	18
2.2.3 Linssijärjestelmä . . . . .	20
2.2.4 Näytekammio . . . . .	22
2.2.5 Jäähdytysjärjestelmä . . . . .	22
2.2.6 Ilmaisimet . . . . .	23
2.2.7 Kaasuinjektorit . . . . .	23
<b>3 FIB-laitesukupolvet</b>	<b>25</b>
3.1 Ga-FIB . . . . .	25
3.1.1 JEOL JIB-4000PLUS . . . . .	25
3.1.2 Thermo Fisher Scientific V400ACE . . . . .	26
3.2 FIB/SEM-hybridi . . . . .	26
3.2.1 ZEISS Crossbeam 550 . . . . .	26
3.3 Heliumionimikroskooppi . . . . .	27
3.3.1 ZEISS ORION NanoFab . . . . .	27
3.4 Selektiiviset ionilähteet . . . . .	28
3.4.1 Raith VELION . . . . .	28
<b>4 FIB-laitteiston käyttökohteet</b>	<b>29</b>
4.1 Kuvantaminen . . . . .	29

4.1.1	3D-kuvantaminen . . . . .	30
4.2	Jyrsintä . . . . .	31
4.3	Kasvatus . . . . .	32
4.4	Mikropiirien ja litograafisten maskien virheanalyysi . . . . .	32
4.5	TEM-näytteenvalmistus . . . . .	33
4.6	Ionilitografia . . . . .	34
4.7	Mikro- ja nanovalmistus . . . . .	35
<b>5</b>	<b>FIB-laitteistot tulevaisuudessa</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Päätäntö</b>	<b>41</b>

# 1 Johdanto

Ionimikroskopia (engl. focused ion beam, tai FIB) on pyyhkäisyelektronimikroskopiaa (engl. scanning electron microscopy, tai SEM) muistuttava nanoskaalan kohteiden kuvantamis- ja valmistusmenetelmä, joka käyttää elektronien sijasta keskitettyä ionisuihkua näytteen työstämiseen. Menetelmä on yleistynyt viime aikoina erityisesti puolijohdeteollisuudessa varteenotettavana vaihtoehtona perinteisille elektronisuihkuun perustuville valmistusmenetelmille. [1]

FIB-tekniikan käytön voidaan katsoa alkaneen vuonna 1975, kun Argonnen Kansallisessa Laboratoriossa Yhdysvalloissa tuotettiin ensimmäistä kertaa korkean intensiteetin ionisuihku gallium-sulametalli-ionilähteellä. Gallium-ionisuihkua käytettiin sitten Hughesin Tutkimuslaboratoriossa ohutkalvon työstämiseen 100 nm:n tarkkuudella. Tekniikka otettiin lopulta puolijohdeteollisuuden käyttöön 1980-luvun puolivälissä, kun ionisuihkuun resoluutio oli optiikan kehityksen ansiosta saatu 10 nm:iin ja FIB pystyi siten kilpailemaan elektronimikroskopian kanssa. 1990-luvulta eteenpäin FIB:llä on tuotettu laboratorioissa yhä enemmän mikro- ja nanoelektromekaanisia järjestelmiä (engl. micro- ja nanoelectromechanical systems, tai MEMS ja NEMS) tutkimustarpeisiin [2]. [3]

Ionisuihkua voidaan käyttää joko näytteen kuvantamiseen pienillä tai jyrksintään (engl. milling) suurilla ionivirroilla. Kuvantamisprosessi perustuu siihen, että pienellä ionivirralla näytettä skannattaessa siitä siroaa sekundäärisiä elektroneja ja ioneja, jotka vievät pinnalta irrotessaan informaatiota sen topografiasta ilmaisimille. Jyrksintä puolestaan irrottaa suurilla ionivirroilla näytteen pinnasta kokonaisia atomeja sputterointi-prosessilla (engl. sputtering) [4]. Menetelmällä voidaan luoda myös kolmiulotteisia muotoja skannaamalla samoja alueita useaan kertaan, jolloin syntyvän laakson syvyyden määrittää pyyhkäisyjen määrä. [5]

Toinen tapa työstää näytettä FIB-laitteistolla on niin kutsuttu kasvatus (engl. deposition). Tässä menetelmässä näyttekammioon injektoidaan kaasua, joka ionisuihkuun pyyhkäistessä hajoaa reaktiivisiksi ja inerteiksi molekyyleiksi. Inertit molekyylit jäävät sitten näytteen pinnalle kerrostumana. Kerrostamista voidaan käyttää niin metallien, kuin eristeiden kanssa valitsemalla oikeanlainen kaasu. [6]

Koska ionit ovat keskimäärin 2000 kertaa massiivisempia kuin elektronit, on ionisuihkun sironna (engl. dispersion) näytteessä pieni verrattuna elektronisuihkuun. Tämä mahdollistaa tarkan kaksi ja kolmiulotteisen kuvantamisen, sillä ilmaisimille päätyvistä sekundaarisista elektroneista suurin osa on lähtöisin itse skannattavan alueen atomeista, eikä sitä ympäröivästä pinnasta. Toinen ionisuihkun vahvuus elektroneihin nähden on se, että FIB:llä voidaan jyrsiä näytettä suoraan ilman maskia ja valmistaa hiomalla alle 100 nm:n paksuisia ohutleikkeitä. Menetelmän heikkoidet ovat niin ikään seurausta ionien suuresta massasta, ensinnäkin FIB-kuvantaminen on sputteroinnin vuoksi aina tuhoisaa näytteelle vaikkakin kuvattua pintaa voidaan jälkikäteen paikata matalaenergisellä argonsuihkulla. Vaikka kuvantaessa käytetään pienempiä ionivirtoja, niin jokainen skannauskerta jättää näytteen pinnalle myös osan käytetyistä ioneista neutraaleina atomeina ja muuttaa pinnan siten amorfiseksi, mikä taas vääristää seuraavia kuvia [2]. [1]

Ensimmäisen sukupolven FIB-järjestelmät toimivat Ga-sulametalli-ionilähteillä ja olivat siinä mielessä rajoittuneita, että ionisuihkua voitiin käyttää joko näytteen kuvantamiseen tai työstämiseen mutta ei kumpaankin samanaikaisesti. Tätä varten yhdistettiin toisen sukupolven laitteistoissa ionipylväs pyyhkäisyelektronimikroskooppiin (engl. scanning electron microscope, tai SEM) ja syntyi FIB/SEM-hybridi, jossa elektronipylväs kuvantaa reaaliajassa ionipylväällä työstettävää aluetta. Elektroni- ja ionisuihkut voivat toimia samassa tilassa, koska niiden energiat ovat riittävän erilaiset. Myös kaasukenttäionilähteellä (engl. gas field ion source, tai GFIS) toimiva heliumionimikroskooppi on esimerkki toisen sukupolven FIB-laitteistosta [7]. Viimeisimmän, eli kolmannen sukupolven FIB-laitteistoissa on ionipylväässä selektiivinen ionilähde, josta käytettävä ionisuihku voidaan valita Wien-suodattimella tarpeen mukaan. Täten samalla laitteistolla voidaan työstää useaa erilaista näytettä toinen toisensa perään vaihtamatta laitteiston osia tai pinnoittamatta näytettä [8]. [9]

Tarkastelen tässä tutkielmassa FIB-tekniikan soveltuvuutta nanoskaalan näytteen valmistukseen ja kuvantamiseen, erityisesti sen hyviä ja huonoja puolia verrattuna elektronimikroskopiaan. Käyn läpi FIB-laitteistojen kehityskaaren kolmen laitesukupolven ajalta ja pyrin ennustamaan tekniikan mahdollista kehityssuuntaa lähitulevaisuudessa.

## 2 Teoreettinen tausta

### 2.1 Ioni-kiinteä -vuorovaikutukset

Näytteen pintaan osuessaan ioni voi vuorovaikuttaa usealla eri tapaa, riippuen sen kineettisestä- ja pinnan atomien sidosenergiasta. Mahdollisia prosesseja ovat muun muassa sputterointi, kiinnittyminen (engl. implantation) ja takaisinsironna (engl. backscattering), kuten kuviossa 1.

Pommitettavassa materiaalissa ioneita hidastavat prosessit voidaan jakaa karkeasti ydinten ja elektronien aiheuttamiin energiahäviöihin. Ydinten energiahäviöt tarkoittavat liikemäärän siirtoa ionilta kohdeatomille elastisissa törmäyksissä. Elektronien energiahäviöt taas ovat seurausta ionin ja atomin elektronien epäelastisesta sironnasta. Tyypillisissä FIB-laitteistossa käytetyillä suihkun energioilla (5 keV-50 keV) elektronien energiahäviöt ovat hallitsevia. [5]

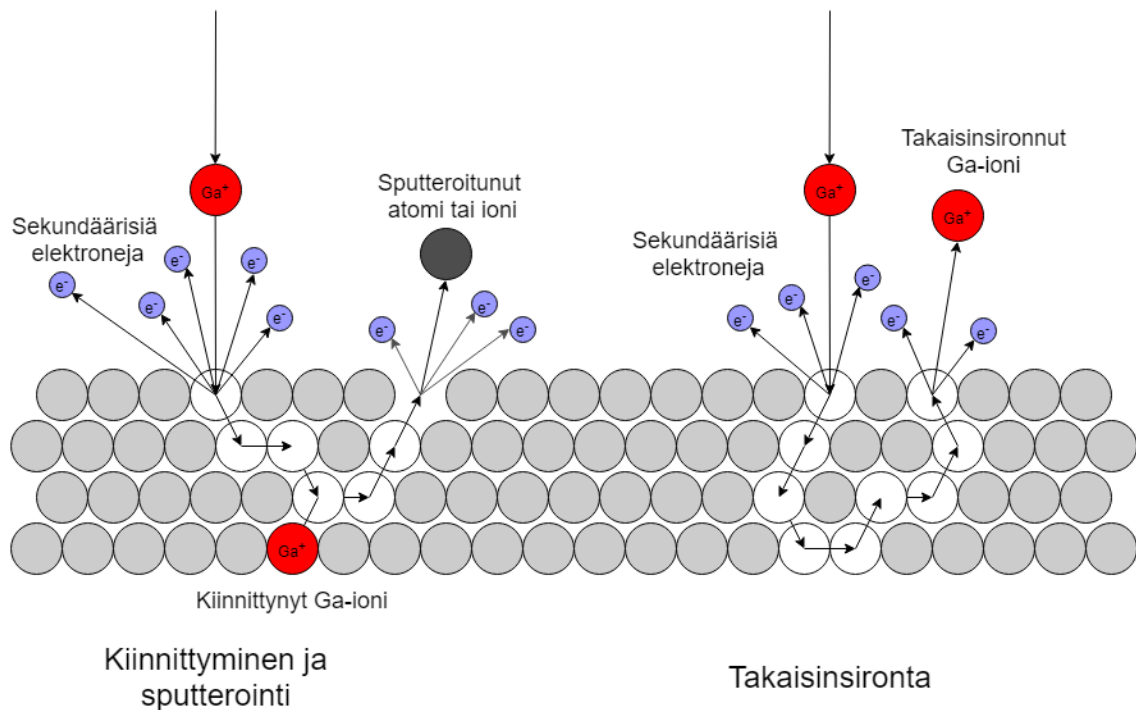
Yksittäisen ionin keskimääräinen tunkeutumissyvyys kiinteässä aineessa on

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{dE/dx} = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{N \frac{dE/dx}{N}} = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{NS(E)}, \quad (1)$$

missä  $E_0$  on ionin energia ennen ensimmäistä törmäystä,  $dE/dx$  on energiahäviö kuljettua matkaa kohti,  $N$  on atomien tiheys kohdeaineessa ja  $S$  on pysäyttävä poikkileikkaus, eli energiahäviö sirontakeskusta kohti [4].

Törmäyskaskadi on ionipommituksen seurauksena kohteeseen muodostuva vapaasti liikkuvien atomien massa, johon jokainen törmäyksen irrottama atomi voi liittyä. Törmäyskaskadin leveydellä ei ole vaikutusta sputteroinnin määrään, niin kauan kuin ionisuihku tulee pinnalle kohtisuorassa. Törmäyskaskadin käyttäytymistä on mallinnettu Monte-Carlo-simulaatioilla ja valtaosa sputteroiduista atomeista on peräisin 1 nm<sup>3</sup>:n kokoisesta poikkileikkauksesta törmäyspisteen ympärillä. [5]

Jos pinnan atomin ionilta saama kineettinen energia ylittää sen sidosenergian, niin atomi sputteroituu erilleen näytteestä, kuten kuviossa 1. Sputterointi on liikemäärän siirron ansiosta puhtaasti mekaaninen prosessi ja FIB:n toiminnan kannalta tärkein ioni-kiinteä -vuorovaikutus. [5], [10], [11]



**Kuvio 1.** Mahdollisia ioni-kiinteä -vuorovaikutuksia.

Sputterintisaanto on näytteestä irronneiden atomien määrä yhtä absorboitua ionia kohden. Se riippuu käytettyjen ionien ja kohteen atomien massaista, ionivirran suuruudesta, ionien kineettisestä energiasta ja saapumiskulmasta, sekä kohteen lämpötilasta. Sputterointisaanto on aluksi lineaarisesti riippuva ionien energiasta, mutta tasoittuu kun ionit uppoavat yhä syvemmälle näytteeseen, eivätkä enää välit sputterointiin tarvittavaa energiaa pinnan atomeille. Tässä vaiheessa kiinnittymisestä tulee hallitseva vuorovaikutus, kun ionit jäävät kohteen sisään jumiin. Sputterointiin sopiva energia ioneille on tyypillisesti välillä 10 keV-100 keV [11]. Jokaiselle materiaalille on myös määritettävissä ns. kriittinen energia (tyypillisesti 10 eV-30 eV) jota pienemmillä energioilla sputterointia ei näytteessä tapahdu. [4]. Sputterointisaanto vaihtelee tyypillisesti välillä 0,1-20 [12], [13]. [5]

Kiihdytysjännite ja osumiskulma ovat näytteen materiaalin ohella tärkeimmät sputteroinnin määrään vaikuttavat tekijät. Tyypillisessä FIB-järjestelmässä korkeampi kiihdytysjännite lisää sputterointia välillä 5 keV-30 keV ja suurempi saapumiskulma pinnan normaaliin nähden pitää törmäyskaskadin lähempänä pintaa ja lisää siten sputterointia. Jos ioni saapuu hyvin järjestyneeseen kristallirakenteeseen hila-akselin myötäisesti, niin se pääsee tunkeutumaan syvälle näytteeseen kanavointi-prosessilla ja luovuttaa pinnan atomeille siksi pienemmän osan kineettisestä energiastaan. Sput-

terointi on siis kristalleissa voimakkaimmillaan kun saapumiskulma asetetaan kohtisuoraksi rakenteen hila-akseliin nähden. Tämä ilmiö aiheuttaa myös heterogeenisessä näytteessä samalla ionivirralla epätasaista jälkeä, kun ionit tunkeutuvat helpommin niihin osiin näytteestä missä niiden nopeus on yhdensuuntainen hila-akselin kanssa. [5], [14]

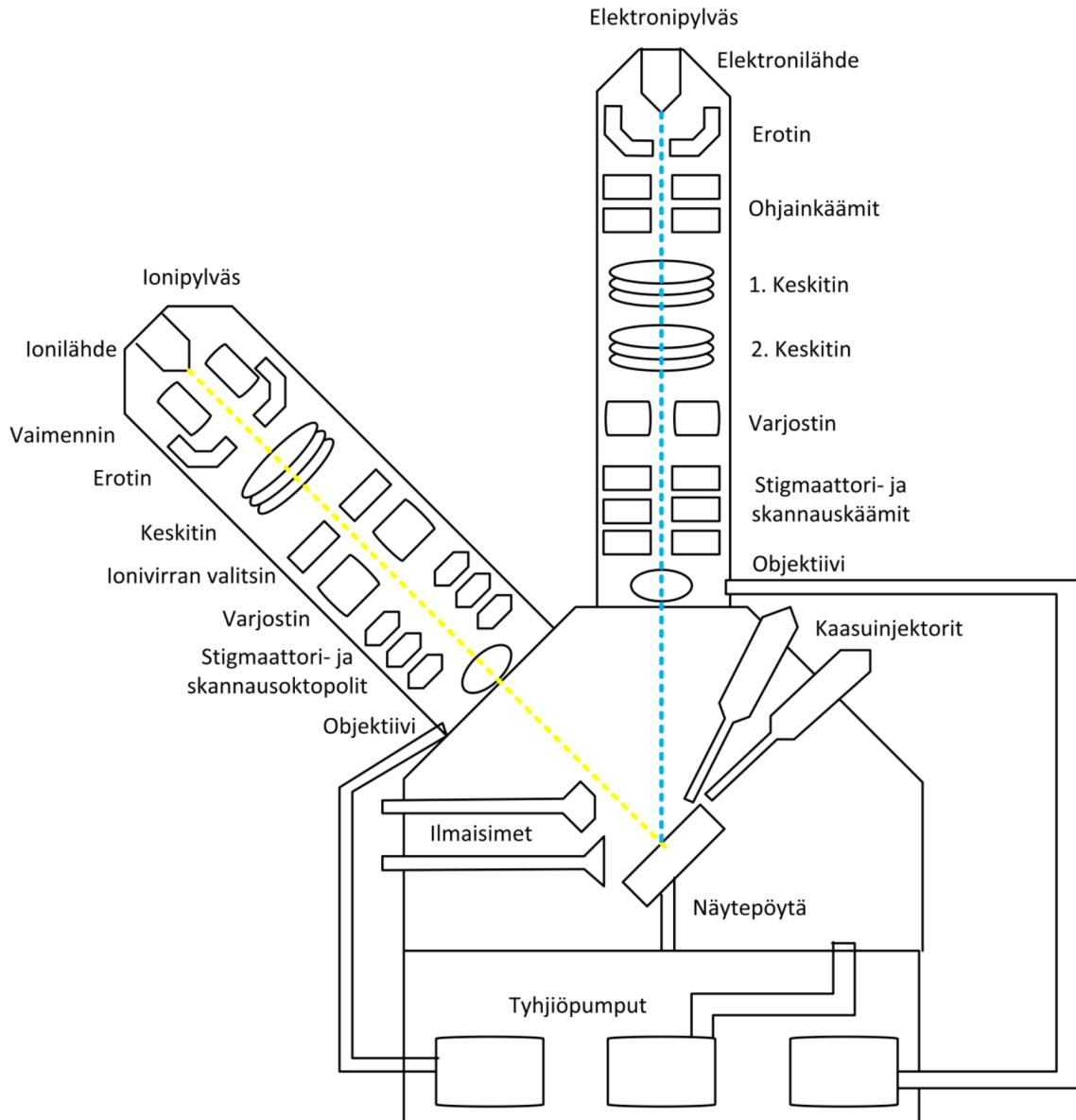
## 2.2 FIB-laitteiston osat

Toimintaperiaatteeltaan tyypillinen FIB-laitteisto muistuttaa pyyhkäisyelektronimikroskooppia, mutta elektronisuihkun sijasta näytteen kuvantamiseen, tai työstämiseen käytetään massiivisempia ioneja. Jokaisesta FIB-laitteistosta on tunnistettavissa seuraavat osat: ionilähde, linsijärjestelmä, näytepöytä, ilmaisimet, kaasuinjektorit ja tyhjiökammio. Ionilähteitä on monta erilaista ja FIB-laitteistot voidaan jakaa niiden avulla kolmeen laitesukupolveen: ensimmäisen sukupolven sulametalli-ionilähde (engl. liquid metal ion source, tai LMIS), toisen sukupolven kaasukenttäionilähde (engl. gas field ion source, tai GFIS) ja kolmannen sukupolven selektiiviset ionilähteet. Ionipylvään lisäksi FIB-laitteistossa voi olla myös perinteinen elektronipylväs kuvantamista varten. Tyypillisen FIB/SEM-kaksipylväslaitteiston osat on eritelty kuviossa 2.

### 2.2.1 Sulametalli-ionilähde

LMIS koostuu tylppäpäisestä wolfram-neulasta jonka yläpäässä on säiliö ionisoitavaa materiaalia. Ga-LMIS oli ensimmäinen ja edelleen yleisin käytetty ionilähde niin yksipylväs-, kuin hybridilaitteistoissa. Koska galliumin ja wolframin sulamislämpötilat ovat verrattain kaukana toisistaan ja galliumin höyrystyminen sulamispisteessään on vähäistä, ei metallisäiliön ja neulan välillä tapahdu huomattavaa materiaalien sekoittumista ja ionilähde on siksi pitkäikäinen. Toisaalta sulalla galliumilla on pieni pintaenergia ja höyrönpaine, joten se tarttuu hyvin neulan pintaan puhtaassa muodossaan, eikä lähteessä siksi tarvitse käyttää useamman metallin seosta. [2], [5]

Sulametalli-ionilähde toimii seuraavalla prosessilla: kiinteä metalli lämmitetään ensin sähköisesti sulamispisteeseen, minkä jälkeen se valuu painovoiman ja pintajännityksen yhteisvaikutuksella wolframneulan päähän, joka on tyypillisesti halkaisijaltaan noin 5  $\mu\text{m}$ -10  $\mu\text{m}$ . Erottimeen kytketään sitten suuri jännite ( $\sim 10^8 \text{ V cm}^{-1}$ ), jolloin erottimen ja neulan väliin muodostuu Taylorin kartio ulkoisen sähkökentän ja metal-



**Kuvio 2.** Tyypillisen FIB/SEM-hybridilaitteiston osat.



likalvon pintajännityksen saavutettua tasapainon. Sulamispisteeseen tuotu gallium voi pysyä sulana vielä viikkoja lämmityksen jälkeen lähes täydellisessä tyhjiössä alijäähtymisen seurauksena. [5]

Taylorin kartio muodostuu pintajännityksen tasapainottaessa ulkoisen sähkökentän Taylorin ehdon mukaan

$$\frac{1}{2}\epsilon_0 F^2 = \frac{2\gamma}{r}, \quad (2)$$

missä  $\epsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys,  $F$  on sähkökenttä,  $\gamma$  on pintajännitys ja  $r$  on kartion säde neulan päässä. Yhtälössä 2 vasemman puolen termit edustavat kartiosta ulospäin suuntautuvaa elektrostaattista painetta ja oikea puoli taas on kartion sisään suuntautuva pintajännitys. Koska Taylorin ehdon täytyy päteä kaikkialla, tulee potentiaalin olla muotoa

$$V = Ar^{1/2}P_{1/2}(\cos\theta) + V_0, \quad (3)$$

missä  $A$  on vakio,  $P_{1/2}(\cos\theta)$  on puolen asteen Legendren polynomi ja  $V_0$  on ulkoinen potentiaali [2]. Kun vaaditaan että  $V_0$  on vakio, niin  $\theta = 130,7^\circ$ . Huomataan myös, että lähellä kartion kärkeä  $r \rightarrow 0$  ja  $V \rightarrow \infty$ , eli systeemi ei pysty muodostamaan täydellistä kartiota. Sen sijaan kenttähaihtuminen poistaa materiaalia kartion kärjestä ja se onkin tasapainossa halkaisijaltaan noin 10 nm:n kokoinen puolipallo [2]. Koska Taylorin ehto formuloitiin matemaattiselle kartiolle, tulee yhtälöä 2 muokata muotoon

$$\frac{1}{2}\epsilon_0 F^2 = \frac{2\gamma}{r} + p, \quad (4)$$

missä

$$p = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (5)$$

on fluidin virtauksesta johtuva paine kartion sisään,  $\rho$  on fluidin tiheys ja  $v$  sen virtausnopeus [2]. Yhtälö ottaa nyt huomioon sulan metallin virtauksen kartion säiliöstä kartion kärkeen. [5]

Muodostuneen Taylorin kartion kärki on niin pieni (2 nm-5 nm), että erottimeen kytketty potentiaaliero voittaa siellä lokaalin pintajännityksen, ja vapaita ioneita alkaa muodostua kenttähaihtumisen ja kenttäionisoitumisen seurauksena. Kenttähaihtuminen, eli materiaalin sidosenergian lasku verrattain suuressa sähkökentässä ja siitä seuraava tehostettu haihtuminen, on pääasiallinen mekanismi matalilla ionivirroilla. Vastaavasti kenttäionisoitumista, jossa materiaalin atomit menettävät

elektroneja kvanttitunneleoitumisen kautta ja karkaavat siten neutraalista rakenteesta, havaitaan suuremmilla ionivirroilla. Taylorin kartion kärjestä emittoituneiden ionien tilalle virtaa jatkuvasti lisää sulaa metallia säiliöstä ja prosessi on siten itsesäätelevä. Parhaillaan LMIS:llä saavutetaan noin  $1 \times 10^8 \text{ A cm}^{-1}$  virtatiheys erottimen läpi. [2], [5]

Yleisesti sulametallilähteeseen soveltuvat metallit joilla on alhainen sulamispiste ja pieni reaktiivisuus [15]. Galliumin lisäksi LMIS:llä on tuotettu laaja kirjo eri ioinilajeja, kuten Al, Au, Bi, Cs, Cu, Ge, Fe, In, Li, Pb, P, Pd, Sn, U ja Zn. Sulametallilähteessä voidaan puhtaan metallin sijasta käyttää myös seosta, jolloin saadaan tuotettua erityisesti puolijohdelaitteiden pintaan istutettavaksi sopivia ioneja As, B, Be ja Si. [2]

### 2.2.2 Kaasukenttäionilähde

Kaasukenttäionilähde (engl. gas field ion source, tai GFIS) kehitettiin 1970-luvun alkupuolella. GFIS:ssä kenttä säteilijänä toimii kryogeenisesti jäähdytetty noin 100 nm:n kokoinen neula, jolle annetaan suuri positiivinen varaus muuhun laitteistoon nähden. Neula on noin senttimetrin päässä maadoitetusta elektrodista ja kun niiden väliin injektoidu kaasu (tyypillisimmin helium, neon, tai vety) ionisoituu potentiaalieron vaikutuksesta on tuloksena noin 1 nm:n kokoinen virtuaalinen ionilähde varsinaisen kenttä säteilijän takana. Koska ionien de Broglie -aallonpituus on häviävän pieni, ne säteilevät neulan päästä lähes radiaalisesti. Ionivirran suuruus on suoraan verrannollinen lähteen kirkkauteen, joka puolestaan on kääntäen verrannollinen virtuaalisen lähteen kokoon. [2]

Itse kaasuatomien ionisoituminen neulan ja vastaelektrodin välissä on kvanttimekaaninen prosessi, jossa elektroni tunneleittuu jyrkän Coulombin potentiaaliläpi. WKB-analyysin avulla voidaan määrittää, että ionien tuotantonopeus riippuu yksittäisen ionisaation todennäköisyydestä  $D$  ja ionisoitavien atomien määrästä, joista molemmat ovat suoraan riippuvaisia ulkoisesta sähkökentästä. WKB-analyysillä arvioitu ionisaation todennäköisyys on

$$D \sim e^{-c \frac{I-\phi}{F}}, \quad (6)$$

missä  $c$  on vakio,  $I$  on kaasun ionisaatiopotentiaali,  $\phi$  on kenttä säteilijän materiaalin irrotusfunktio ja  $F$  on ulkoinen sähkökenttä [2].

Ionisoitavien atomien määrä taas riippuu säteilijän lämpötilasta, kaasunpaineesta ja kaasun polarisaatiovoimista. Kaasun lokaali paine  $P$  voidaan arvioida klassisesta kineettisestä teoriasta

$$P \sim P_0 e^{\frac{1}{2}\alpha \frac{E^2}{K} T}, \quad (7)$$

missä  $P_0$  on kaasunpaine kaukana säteilijästä,  $\alpha$  on yksittäisen kaasumolekyylin polarisaatio,  $E$  on energia ja  $T$  on lämpötila [2]. Kaasumolekyyli menettää energiaa törmätessään kylmään säteilijään ja sitoutuu polarisaatiovoiman vaikutuksesta sen pintaan. Kaasumolekyylit matkaavat sitten diffuusiolla säteilijän kärkeen ja ionisouituvat. Säteilijän kryogeeninen jäähtytys on GFIS:n toiminnan kannalta välttämätöntä, koska säteilijän atomien termiset nopeudet ovat 25 meV:n luokkaa huoneenlämmössä, mutta vain 1 meV:n luokkaa nestemäisen heliumin lämpötilassa ( $\approx 4$  K). [2]

GFIS:n suorituskykyä voidaan analysoida mallintamalla systeemi pallona ortogonaalisen kartion pinnalla (engl. sphere on orthogonal cone, tai SOC), johon on olemassa tunnettu ratkaisu Laplacen muunnoksella. Säteilijän pinta voidaan siten mieltää SOC:in tuottamana tasapotentialipintana. Pallon sädettä ja kartion kulmaa muuttamalla voidaan tasapotentialiaali sovittaa hyvin lähelle fyysisen lähteen kärjen muotoa. Pinnalta emittoituneiden ionien lentoradat voidaan sitten määrittää ratkaisemalla numeerisesti Lagrangen liikeyhtälöt tasapotentialipinnalle. Ekstrapoloimalla ionien lentoradat takaisin tasapotentialipinnan sisään saadaan selville myös virtuaalisen lähteen koko. Elektronilähteeseen verrattuna ionien de Broglie-aallonpituudet ovat häviävän pieniä, joten hajautuneista varauksista johtuvat ilmiöt ovat diffraktion sijaan hallitsevassa asemassa kenttäionilähteissä. [2]

E erityisesti Schottkyn- ja kuumakenttälähteissä varaukset voivat käyttäytyä kontinuumina pisteiden, mikä on seurausta Coulombin vuorovaikutuksista yksittäisten ionien välillä suihkussa. Ilmiön seurauksena ionisuihkun energiajakauma levenee ja virtuaalisen lähteen koko kasvaa. Ionisuihkun levenemistä voidaan vähentää pienienergisellä suihkulla työskenneltäessä säätämällä linssisysteemin polttopistettä. Energiajakauman leveneminen ja virtuaalisen lähteen kasvu ovat seurausta ionien satunnaisista törmäyksistä suihkussa, eikä sitä voida vähentää tehokkaasti. [2]

### 2.2.3 Linssijärjestelmä

Ionilähteellä muodostuva ioniryöpäs kasataan ensin vaimentimella (engl. suppressor) ja vedetään sitten suurella potentiaalierolla ( $1 \times 10^8 \text{ V cm}^{-1}$ ) erottimen (engl. extractor) läpi. Keskitin (engl. condenser) tiivistää sitten ionit suihkuksi ja ionivirran valitسن (engl. ion current selector) määrittää varjostimelle (engl. blanking aperture) pääsevän ionivirran suuruuden. Varjostinlevyillä leikataan ionisuihkun muoto halutunlaiseksi ja estetään siten ei-haluttu sputterointi näytteessä. Skannausoktopoleilla (engl. scanning octopoles) suihkua poikkeuttamalla saadaan rasteroitua näytteestä käsiteltävä alue. Stigmaattorioktopoleilla (engl. stigmation octopoles) korjataan vielä hajataittoa ennen kuin objektiivi (engl. objective lens) keskittää lopulta suihkun näytteeseen. [5]

Linssijärjestelmällä on kaksi pääasiallista toimintoa, joista käytetään usein nimitystä DC- ja AC-moodit. DC-moodi tarkoittaa ionilähteen antaman ionivirran kohdistamista tiiviiksi suihkuksi ja AC-moodi puolestaan halutun kohdealueen skannausta suihkulla. Kiihdytysjännitteet vaihtelevat laitteistosta riippuen välillä 5 keV-50 keV ja järjestelmällä pystytään tuottamaan jopa 20 pA-30 pA: suuruisia ionivirtoja. Ionipylväällä työskenneltäessä objektiivi voi olla jopa 2 cm:n päässä näytteen pinnasta, joten menetelmä soveltuu topografialtaan laajasti vaihtelevien näytteiden tarkasteluun. Tyypillinen ionisuihkun energiajakauma 5 eV on suurempi kuin elektronisuihkulla, koska ionit ovat massaltaan suurempia kuin elektronit. Väriaberraatio tästä syystä pääasiallinen FIB-laitteiston resoluutiota rajoittava tekijä. [5]

Ionisuihkun halkaisija voidaan arvioida Barthin ja Krutin -menetelmällä, jossa koettimen halkaisija koostuu lähteen kuvan-, diffraktion-, palloaberraation- ja väriaberraation koosta. Ionilähteen kuvan koko on

$$d_I = \sqrt{\frac{4I_p}{B_r V \pi^2 \alpha_i^2}}, \quad (8)$$

missä  $I_p$  on ionivirta,  $B_r$  on lähteen redusoitu kirkkaus,  $V$  on kiihdytysjännite ja  $\alpha_i$  on suihkun tulokulman puolikas [7]. Diffraktion koko on

$$d_A = \frac{K_A}{\sqrt{V} \alpha_i}, \quad (9)$$

missä  $K_A$  on vakio [7]. Palloaberraation koko on

$$d_S = 0,18C_s \alpha_i^3, \quad (10)$$

missä  $C_s$  on palloaberraatiokerroin [7]. Väriaberraation koko on

$$d_C = 0,34C_c \frac{\Delta V}{V} \alpha_i, \quad (11)$$

missä  $C_c$  on väriaberraatiokerroin ja  $\Delta V$  on ionisuihkun energiajakauma [7]. Kokonaisuuudessaan suihkun halkaisija on

$$d_p \approx \sqrt{[(d_A^4 + d_S^4)^{0,325} + d_I^{1,3}]^{1,538} + d_C^2}. \quad (12)$$

Ionipylvään suurenus on

$$M = \frac{\alpha_0}{\alpha_i} \sqrt{\frac{V_e}{V_p}}, \quad (13)$$

missä  $\alpha_0$  on suihkun lähtökulman puolikas ja  $V_e$  on erottimen jännite ja  $V_p$  on suihkun osumaenergia näytteen pinnalla [7]. Yhtälöistä 12 ja 13 huomataan, että suihkun kokoa minimoidessa suurenus on kääntäen riippuvainen lähteen koosta. Pienten lähteiden järjestelmissä, kuten GFIS:ssä ( $\approx 1$  nm) paras suorituskyky saavutetaan suurella suurenoksella ja verrattain suurilla lähteillä, kuten LMIS:ssä ( $\approx 50$  nm) käytetään pienempää suurenosta. Suurempi suurenus lisää myös ionipylvään herkkyttä ulkoisille värähtelyille, joten erityisesti GFIS:iä käytettäessä tulee värähtelyt ionipylvään läheisyydessä minimoida vaimentamalla. [7], [16]

Ionisuihkun energia on tyypillisesti välillä 50 keV-250 keV ja sen puoliarvonleveys on 50 nm:n luokkaa. Puoliarvonleveyttä käytetään kuvaamaan ionisuihkun kokoa koska sen intensiteetti on lähes Gaussin käyrän muotoinen. Yhden linssin FIB-järjestelmillä tuotetaan verrattain matalaenergisiä ioneita 10 keV-50 keV. Tällaisessa järjestelmässä ei ole varsinaista objektiivilinsiä, vaan lopullinen suihkun halkaisija määrätään säädettävällä aukolla. Vaikka aukko itse säädetään kymmenistä satoihin mikrometreihin, niin sen alapuolella oleva linssi keskittää suihkun edelleen pienemmäksi. Yksilinssijärjestelmä on halvempi verrattuna kaksilinssijärjestelmään ja sillä voidaan suihkun energiaa kontrolloimalla työstää jopa 10 nm:n tarkkuudella. Yksilinssijärjestelmä on suosittu mikrovalmistusmenetelmiä tutkittaessa ja prototyyppejä valmistettaessa, kun taas kaksilinssijärjestelmä on suuremman tuotantonopeutensa ansiosta sopiva teollisuuskäyttöön ja materiaalitutkimukseen. [11]

### 2.2.4 Näytekammi

Koska itse ionipylväs on muun laitteiston suhteen staattinen tulee näytepöydän liikkua ionisuihkun alla. Tämä voidaan toteuttaa joko manuaalisilla säätöruuveilla tai moottoroidulla 5-ulotteisella liikuttimella johon kuuluu liikkuvuus x-, y- ja z-akselin suhteen, kierto, sekä kallistus. [5], [17]

Koska aktiivinen ionilähde saastuu ja korkeaenerginen ionisuihku pyrkii purkamaan varaustaan salamoiden ilmakehässä, on laitteiston toiminnan kannalta välttämätöntä luoda mahdollisimman täydellinen tyhjiö lähteen ja ionikanavan ympärille. Myös näytteestä sironneiden sekundääristen elektronien täytyy päästä ilmaisimille vuorovaikuttamatta enää kaasumolekyylien kanssa, koska tämä vääristäisi kerättyä tietoa näytteen pinnanmuodoista. Tyypillisesti lähde- ja keskityskammio vaativat noin  $1 \times 10^{-8}$  Torr:n paineen ja näissä käytetään siksi ionipumppuja [5], kun taas itse näytekammi voi olla korkeammassa paineessa ( $1 \times 10^{-6}$  Torr- $1 \times 10^{-3}$  Torr) joka saavutetaan öljy- tai kuivaesityhjiöpumpun ja turbomolekyyli-pumpun yhdistelmällä [5]. Näytteet tuodaan näytekammiin ilmalukon kautta, jotta tyhjiötä ei tarvitse luoda uudelleen näytteen vaihdon yhteydessä. [11], [17]

### 2.2.5 Jäähdytysjärjestelmä

LMIS:sta poiketen, GFIS toimii vain lämpötila-alueella 60 K-90 K. Tällöin kuvantamiseen käytetty kaasu tarttuu näytteen pinnalle herkemmin, ionilähde pysyy mekaanisesti eheänä suurista sähkökentistä huolimatta ja lämpöliikkeen vaikutus sen näennäiseen kokoon ja energiajakaumaan saadaan minimoitua. Alhainen lämpötila vähentää myös lähteelle kerääntyvien epäpuhtauksien määrää kryopumppauksen ja -salpauksen ansiosta. [7]

Vaikka GFIS:n tarvitsemat lämpötilat voidaan saavuttaa esimerkiksi Joule-Thompson -, Gifford-McMahon - ja pulssiputkijäähdyttimillä, ne eivät skaalaudu hyvin, kun tarvittava jäähdytysteho on  $>2$  W:n luokkaa. Useimmat jäähdytystekniikat ovat lisäksi osittain mekaanisia ja aiheuttavat siksi ionisuihkun eheyttä heikentävää akustista värinää laitteistoon. HIM:ssa yleisimmin käytetty jäähdytysmenetelmä on neste-, tai kaasufaasin kryonestekierto, joka on yksinkertainen, tehokas, eikä tuo liikkuvia osia ionilähteen läheisyyteen. Kryoneste absorboi järjestelmästä lämpöä faasimuunnoksen aikana, joten se ei myöskään aiheuta lämpösiirtymää. [7]

### 2.2.6 Ilmaisimet

Kuvanmuodostus tapahtuu FIB-laitteistossa pääasiassa sekundäärisiä elektroneja havaitsemalla koska niitä muodostuu keskimäärin 10-1000 kertaa enemmän kuin sekundäärisiä ioneita [18] [5]. Näytteen pinnasta sironneita sekundäärisiä elektroneja kerätään kahdella pääasiallisella menetelmällä: elektronivahvistimilla ja mikrokanavalevyillä. Elektornivahvistin toimii parhaiten noin 45°:n kulmassa näytteen normaaliin nähden, kun mikrokanavalevy taas kiinnitetään useimmiten suoraan näytepöydän ylle. Elektronivahvistimet voidaan asettaa havaitsemaan joko sekundäärisiä elektroneja tai positiivisia ioneita. Näytteen kuvantamiseen käytetään mahdollisimman pieniä ionivirtoja ( $<100\text{ pA}$ ) jotta pinnasta irtoavien ionien määrä ja siten näytteelle aiheutuva vahinko saadaan pidettyä minimissä. Kuvanmuodostuksessa sekundääriset elektronit tarjoavat parhaiten tietoa syväterävyydestä, kun taas sekundääriset ionit soveltuvat pinnan topografian tarkasteluun. [5]

Ionisuihkun käyttö eristävään materiaaliin varaa sen ja sironneet ionit kokevat siten elektrostaattisen vetovoiman takaisin näytteen pinnalle. Eristävät alueet näkyvät FIB-kuvissa tummina, koska niistä sironneet ionit eivät pääse ilmaisimille asti. Näytteen varautumista voidaan ehkäistä usealla tapaa, mutta erityisesti puolijohteiden tapauksessa riittävä maadoittaminen on välttämätöntä. Varausta voidaan myös neutraloida käyttämällä ulkoista elektronitykkiä tai elektronipylvästä FIB/SEM-hybridijärjestelmän tapauksessa.[5]

### 2.2.7 Kaasuinjektorit

FIB-järjestelmällä voidaan jyrsimisen lisäksi kasvattaa materiaaleja kaasufaasista näytteen pinnalle. Näytteen läheisyyteen tuodaan injektorilla kaasua ja ionisuihkulla piirretään haluttu muoto pinnalle. Vaikka kaasua absorboituu verrattain laajalle alueelle niin varsinaista kasvatusta tapahtuu vain niillä alueilla joiden yli ionisuihku pyyhkäisee. Kaasun molekuulit hajoavat ionisuihkun vaikutuksesta inerteiksi ja reaktiivisiksi lajeiksi joista inertit kiinnittyvät näytteen pintaan ja reaktiiviset poistuvat tyhjiöpumppujen kautta näytekammioista. Kasvatuksessa ionipylväs aiheuttaa myös pinnan atomien sputterointia, mutta tasapainossa tapahtuu kuitenkin enemmän kaasun atomien kiinnittymistä ja kokonaisuutena pinnalle muodostuu uusi kerros. Kerroksia voidaan siten kasvattaa myös toistensa päälle ja tuottaa kolmiulotteisia muotoja. [5]





## 3 FIB-laitesukupolvet

Ionimikroskopian kehityskaaresta on tunnistettavissa kolme eri laitesukupolvea. Ensimmäisen sukupolven sulametalli-Ga-FIB, toisen sukupolven FIB/SEM hybridit, kaasukenttäionilähteet ja heliumionimikroskooppi, sekä nykyisen, eli kolmannen sukupolven selektiiviset ionilähteet.

### 3.1 Ga-FIB

Gallium LMIS on edelleen yleisin FIB-laitteisto ja se soveltuu hyvin karkeampaa tarkkuutta vaativaan, nopeaan jyrshintään. Ga-ionien suuren massan vuoksi näytteen saastuminen ionien kiinnittyessä on aina huomattavaa ja ne eivät myöskään sovelu kuvantamiseen samoin kuin He- tai Ne-ionit. Ga-laitteistoja päivitetään toisen sukupolven laitteiksi lisäämällä elektronipylväs.

#### 3.1.1 JEOL JIB-4000PLUS

JEOL JIB-4000PLUS on yhden Ga-LMIS -ionipylvään laite. Järjestelmällä saavutetaan jopa 5 nm:n resoluutio ja 90 nA:n ionivirta 30 keV:n kiihdytysjännitteellä. Valmistajan mukaan laitteen pääasiallinen käyttötarkoitus on nanoskaalan näytteiden valmistelussa muita kuvantamismenetelmiä varten, kuten SEM, tai TEM. Laitteistoon on saatavilla ohjelmapakettit automaattista TEM-näytteenvalmistusta ja 3D-viipalointia varten. Lisäksi siihen voidaan liittää CAD(computer-aided design)-paketti, jolloin laitteisto soveltuu myös mikropiirien muokkaukseen. Koska laitteistossa on vain yksi ionipylväs, täytyy sillä tehdyt muutokset tarkastaa toisella kuvantamismenetelmällä iteraatiokertojen välissä. [19]

### 3.1.2 Thermo Fisher Scientific V400ACE

V400ACE on suunniteltu ensisijaisesti mikropiirien muokkaamiseen, ohuiden näytteiden valmistukseen ja 3D viipalointiin. Laitteiston kiihdytysjännite vaihtelee välillä 2 keV-30 keV ja siihen on integroitu kaasuinjektori kaasuvusteista etsausta ja -kasvatusta varten. Jyrsintänopeus voidaan siten räätälöidä työstettävän kohdan materiaalin mukaan kiihdytysjännitettä ja kaasulajia muuttamalla. Ionisuihkulla voidaan nopeasti katkoa ja yhdistää sähköä johtavia elementtejä mikropiirissä, eikä virheanalyysiä varten tarvitse valmistaa uutta erää piirejä. Mikropiirejä voidaan työstää myös nurjalta puolelta (engl. back side circuit edit) lisäämällä laitteistoon infrapunamikroskooppi. Työskentelyn aikana saadaan ilmaisimilta samanaikainen sekundäärielektronin- ja absorboitunut virta -signaali. Tällä voidaan seurata suihkun ja näytteen kontaktin vahvuutta, mutta varsinainen kuvantaminen suoritetaan toisella menetelmällä, kuten TEM, tai SEM.[20]

## 3.2 FIB/SEM-hybridi

FIB/SEM-hybrideissä yhdistetään samaan laitteeseen sekä ioni- että elektronipylväs. Tällaisessa järjestelmässä elektronisuihkulla ei ole jyrsintään tarvittavaa kineettistä energiaa, joten se ei häiritse ionipylvään toimintaa. Menetelmän etuna ionisuihkulla kuvantamiseen nähden on se, että elektronit eivät tuhoa kuvattavaa aluetta yhtä tehokkaasti kuin ionit. FIB/SEM-hybridiä on käytetty myös kappaleiden kokonaisvaltaiseen 3D-kartoitukseen jyrsimällä vuorotellen ionisuihkulla kerros ja kuvantamalla sitten elektronisuihkulla alta paljastunut topografia. [5]

### 3.2.1 ZEISS Crossbeam 550

ZEISS Crossbeam -mallissa 550 yhdistyy kenttäemissioelektronipylväs ja Ga-sulametallionipylväs. Laitteiston ionipylväs tuottaa Ga-ionivirtoja välillä 10 pA - 100 nA ja resoluutio on parhaillaan  $\approx 3$  nm. Sekundäärysten ja takaisinsironneiden elektronien havainnointi tapahtuu elektronipylvään sisällä Inlens-havaitsimilla. Valmistajan mukaan laite soveltuu erityisesti TEM-näytteenvalmistukseen ja siihen on sisällytetty automaattinen prosessi, jolla voidaan valmistaa automaattisesti kymmeniä TEM-ohutleikkeitä ennaltamääritetyistä kohdista näytettä. Näytteestä voidaan ottaa myös 3D-kuvia automaattisella prosessilla, missä elektronisuihku kuvantaa sarjassa ionisuihkulla esiin jyrsittyjä kerroksia. Lisäksi laitteistoon voidaan liittää muun muassa

SIMS(engl. secondary ion mass spectrometry)-ilmaisim, joka tarjoaa pinnanmuotojen lisäksi tiedon tutkittavan alueen atomien painosta, tyhjiökammion plasmapuhdistin, monikanavainen kaasuinjektori, elektronitykki varauksen neutralointia ja eristävien näytteiden kuvantamista varten, sekä läpäisyelektroni(engl. scanning transmission electron microscopy, tai STEM)-havaintsin näytepöydän alapuolelle. [21]

### 3.3 Heliumionimikroskooppi

Verrattuna muihin latautuneita hiukkasia käyttäviin järjestelmiin, heliumionimikroskoopin (engl. helium ion microscope, tai HIM) etuja ovat korkea resoluutio, syväterävyys ja pintaherkkyys, suuri sekundääristen ionien määrä ja uudenlaiset kontrastimenetelmät. Kuvantamisen lisäksi HIM:ia on käytetty myös näytteiden jyrksintään, nanohuokosten valmistukseen ja materiaalianalyysiin. GFIS:n vahvuuksia ovat pieni virtuaalisen lähteen koko ja siitä seuraava lähteen suuri kirkkaus, joka mahdollistaa suuren ionivirran keskittämisen pienelle kohdealueelle vaihtelevilla ionsuihkun energioilla. Toisaalta kryogeeninen jäähtyysjärjestelmä lisää laitteen kokoa ja virheherkkyyttä.[7]

#### 3.3.1 ZEISS ORION NanoFab

ZEISS ORION NanoFab:ssa on He/Ne-GFIS -ionipylväs ja elektronitykki varauksen neutralointia varten. Kuvanmuodostukseen käytettävät sekundääriset elektronit havaitaan Everhart-Thornley -ilmaisimella. He-ioneilla kuvantamalla saavutetaan jopa puolen nanometrin resoluutio. Raskaampia Ne-ioneita taas voidaan käyttää jyrksintään. Laitteella on on 5-10 kertaa parempi syväterävyys verrattuna kenttäemissioelektronipylväällä otettuihin kuviin. Laitteistoon voidaan liittää myös perinteinen Ga-LMIS -ionipylväs ja siten jyrksintänopeus voidaan valita työstettävän näytteen osan mukaan kolmesta eri ionilajista. Kaasuinjektorin lisäys mahdollistaa kaasuvuokseksen etsauksen ja -kasvatuksen. Laitetta voidaan käyttää myös ionilitografiaan ja yksiatomikerrosten, kuten grafeenin, leikkaamiseen. [22]

## 3.4 Selektiiviset ionilähteet

Selektiivisten ionilähteiden idea on ollut olemassa jo 1990-luvulta lähtien massarajoitetun plasmalähteen muodossa [23]. Metalliseoslähde säteilee useamman alkuaineen ioneita, mutta linssijärjestelmään lisätty Wien-nopeusvalitsin päästää vain tietyn massa/varaus-suhteen omaavat ionit läpi. Koska Wien-valitsimen sallimaa ionilajia voidaan muttaa helposti valitsimen jännitteen kautta, voidaan yhdellä ionipylväällä nyt työskennellä usealla eri ionilla. Yleisesti, raskaita ioneita käytetään karkeaan jyr-sintään, ja kevyitä kuvantamiseen ja suurempaa tarkkuutta vaativaan työskentelyyn.

### 3.4.1 Raith VELION

Raith VELION käyttää selektiivisen ionipylvään ja elektronipylvään yhdistelmää. Ionilähde on eutektinen usean metallin seos joka lämmitessään lähettää näiden metallien ioneja samalla prosessilla, kuin Ga-LMIS. Linssijärjestelmään integroitu massavalitsin päästää näytteelle vain yhden lajin ioneja kerrallaan ja sitä ohjataan tietokoneella. VELION:ssa on valmistajan mukaan valittavina ionilähteeseen kulta- ja pii-ionit tai muita ioneja, joille ionisuihkun halkaisija on nanometriä kokoluokkaa. Laitteella voidaan tehdä niin elektroni, kuin ionilitografiaa, TEM-ohutleikkeiden ja AFM-kärkien valmistusta jyrsimällä, 2D- ja 3D-kuvantamista ja kaasuinjektorin kanssa kaasuvusteista kasvatusta ja -etsausta. Raith:n Ag/Si- selektiivinen sulametalloseoslähde (engl. liquid metal alloy ion source, tai LMAIS) kehitettiin alunperin yhteistyössä Floridan yliopiston kanssa ja se toimi pohjana VELION:n lähteelle [24]. [25], [26]

## 4 FIB-laitteiston käyttökohteet

FIB:n suurin käyttäjä on perinteisesti ollut puolijohdeteollisuus ja suurin osa tekniikan sovelluksista onkin lähtöisin sieltä. Yleisimpiä käyttötarkoituksia ovat kuvantaminen, jyrshintä, kasvatus, mikropiirien ja litograafisten maskien virheanalyysi ja läpäisyelektronimikroskoopin (engl. transmission electron microscope, tai TEM) näytteenvalmistus.

### 4.1 Kuvantaminen

Kun ionisuihkulla pyyhkäistään näytteen yli sen pinnasta irtoaa sekundäärisiä elektroneja ja ioneja. Gallium-ionien penetraatiosyvyys vaihtelee materiaalista riippuen, mutta se on yleisesti kymmenien nanometriä luokkaa. Matalilla ionivirroilla ( $<10$  pA) näytteestä emittoituu pääasiassa sekundäärisiä elektroneja, kun taas keskisuurilla ( $10$  pA- $1000$  pA) ja suurilla ( $>1000$  pA) ionivirroilla sekundääristen ionien osuus lisääntyy. Täten kuvanmuodostus tapahtuu matalilla ionivirroilla sekundääristen elektronien ja suurilla ionivirroilla -ionien avulla. FIB:ssä sekundääriset ionit ja -elektronit emittoituvat läheltä näytteen pintaa, koska massiiviset ionit pysähtyvät näytteessä nopeasti verrattuna elektroneihin. [5]

Endpoint detection (EPD)-menetelmä on toinen tapa saada tietoa näytteen koostumuksesta sekundääristen elektronien ja -ionien havaitsemisen ohella. Jyrshintäessä näytteestä kulkee materiaalista riippuva virta maahan ja tätä mittaamalla voidaan näytteestä tunnistaa eri aineista koostuvia kerroksia. Menetelmällä on kaksi erityisvaatimusta: ensiksi se toimii luotettavasti vain johtavilla materiaaleilla, sillä eristeet vaikeuttavat virran kulkua näytteen pinnalta maahan ja toiseksi näytteestä tulee jyrsiä verrattain suuri alue, jotta saadaan käyttökelpoista dataa. [27]

#### 4.1.1 3D-kuvantaminen

Elektroniikan lisäksi toinen suuri FIB/SEM-hybridijärjestelmien käyttökohde on näytteiden sisäisen rakenteen kuvantamisessa, koska aineen makroskooppinen käyttäytyminen perustuu laajalti sen molekyyli-, ja atomitason järjestykseen. Perinteisesti aineen sisäistä rakennetta on pyritty arvoimaan 2D-kuvista ja tunnetusta teoriasta extrapoloimalla, tai ottamalla näytteestä yksittäisiä poikkileikkauksia. Kaksipylväslaitteistoilla voidaan koko kappale kuvantaa kerros-kerrokselta ottamalla vuoronperään elektronipylväällä kuva ja jyrsimällä sitten seuraava kerros esiin ionipylväällä. Nämä tasokuvat yhdistetään sitten kuvantamisohjelmistolla ja lopputuloksena on malli kuvatun alueen 3D-rakenteesta, jota voidaan tarkastella tietokoneella mistä tahansa kulmasta. Tällaiseen rakennekuvaan voidaan yhdistää myös tieto karakteristisista Röntgen-säteistä, jolloin mallista ilmenee myös alkuaineiden jakautuminen näytteessä. [28]

Tallaiset rakennekuvat ovat korvaamattomia erityisesti neurologiassa, kun yksittäisten neuronien muodostamat yhteydet voidaan erottaa leikatuihin aivoihin. Rakenneanalyysi auttaa myös fossiilisten polttoaineiden etsinnässä, sillä liuskeen huokoisuus on suoraan yhteydessä niiden mahdollisesti sisältämän maaöljyn, tai -kaasun määrään. Erityisesti paikoissa joissa joudutaan käyttämään kallista "frakkausta" tulee resurssista saatavat voitot punnita tarkaan ennen kaivuun aloittamista. Kaksipylväslaitteistolla voidaan kuvantaa esimerkkialue liuskeesta ja ekstrapoloida siitä resurssien määrää. [28], [29]

Koska uudemmat SEM:it toimivat myös silloin kun näytteen ympäristössä on pieniä määriä kaasumaisia epäpuhtauksia on kaksipylväslaitteistoista kehitetty erityinen analyysityökalu, jossa näyte valmistellaan ensin lähes täydellisessä tyhjiössä ionisuihkulla, minkä jälkeen sen aikakehitystä voidaan seurata tarkoin määriteltujen epäpuhtauksien läsnäollessa jatkuvasti elektronisuihkulla kuvantamalla. Näytettä voidaan myös manipuloida tarkastelun aikana ionisuihkulla suoraan sputteroimalla. [28]

## 4.2 Jyrsintä

Suurienergisellä ionisuihkulla voidaan poistaa näytteen pinnalta atomeja sputterointiprosessilla, jossa saapuvan ionin kineettisestä energiasta osa siirtyy pinnan atomille törmäyspaikan läheisyydessä. Sputterointia voidaan tehostaa injektoimalla skannattavan alueen läheisyyteen kaasua, jolloin puhutaan kaasuvusteisesta etsausjyrsinnästä. Jyrsintänopeuteen vaikuttaa näytteelle saapuvan ionivirran suuruus ja törmäyskulma, törmäyskaskadien päällekkäisyys, atomin emittoitumisen todennäköisyys yksittäistä törmäystä kohti, sekä emittoituneen atomin uudelleenkiinnittymisen todennäköisyys. [5]

Materiaalista riippuen, ionisuihkun saapumiskulmalla voi olla suuri tai lähes olematon vaikutus sputterointisaantoon. Esimerkiksi kullalla, kuparilla ja platinalla on luonnostaan suuri sputterointisaanto ja pieni kulmariippuvuus, kun taas pioksidilla  $\text{SiO}_2$  vain kymmenen asteen muutos törmäyskulmaan lisää saantoa 7-8-kertaiseksi. Törmäyskaskadien päällekkäisyys tehostaa osaltaan sputterointia kasvattamalla törmäysalueen poikkileikkausta, mutta tämä ominaisuus on vahvasti työstettävästä materiaalista riippuva. [4], [30]

Sputteroinnin aikana osa irronneista atomeista voi uudelleenkiinnittyä näytteen pintaan, jos niillä ei ole näytteestä päästyään tarpeeksi energiaa karatakseen ionisuihkun alta. Yksinkertaisessa jyrsinnässä atomien uudelleenkiinnittyminen rajoittaa vahvasti tuotettavien muotojen syvyyttä, koska uudelleenkiinnittyminen on sitä voimakkaampaa, mitä korkeammat seinät työskentelykohtaa ympäröivät. Lopulta saavutetaan piste, jossa jyrsitystä kanjonista ei enää emittoitu atomeja, vaikka ionisuihku pitää näytteen pinnan amorfisena. [4]

Uudelleenkiinnittymistä voidaan vähentää tuomalla jyrsittävän alueen läheisyyteen kaasua, joka reagoidessaan näytteestä emittoitujen atomien kanssa muuttaa ne reaktiivisiksi lajeiksi jotka tyhjiöpumppu puolestaan voi poistaa näyttekammioista. Kaasuvusteinen etsaus mahdollistaa materiaalien valikoivan poistamisen työskentelykohdan läheisyydestä oikeanlaisella kaasulla ja lisää siten työskentelyn nopeutta, sekä jyrsittävien muotojen maksimisyvyyttä. Kaasun käytöllä saavutettu jyrsinnän nopeutus on kääntäen verrannollinen ionivirran suuruuteen, sillä suuremmilla ionivirroilla kaikki emittoituneet atomit eivät ehdi reagoida kaasun kanssa ennen uudelleenkiinnittymistä. [4], [5]

### 4.3 Kasvatus

FIB:llä voidaan kasvattaa materiaalia näytteen pinnalle joko suoraan, tai kaasuvusteisesti. Suorassa kerrostamisessa ionipylväällä tuodaan näytteelle pienienerginen ionisuihku, josta ionit kiinnittyvät näytteen pintaan kemiallisesti. Kaasuavusteiseen kasvatukseen verrattuna suoralla menetelmällä tuotettavien kalvojen puhtaus on usein korkeampi, sillä ilman kaasuinjektiota näytekammiossa voidaan pitää lähes täydellinen tyhjiö työskentelyn aikana. Menetelmällä on kasvatettu alumiinia, galliumia, kultaa, kuparia ja niobiumia. [9]

Kaasuavusteisessa kasvatuksessa taas ionisuihku hajottaa työskentelykohdan läheisyyteen injektoidun kaasun reaktiivisiksi ja ei-reaktiivisiksi lajeiksi. Ei-reaktiivisten lajien sidosenergia pinnan atomien kanssa voittaa molekyylin hajoamisenergian ja laji kiinnittyy pintaan kemiallisesti. Reaktiivisilla lajeilla puolestaan hajoamisenergia on suurempi, kuin sidosenergia ja ne poistuvat siten työskentelykohdasta ja lopulta tyhjiöpumpun kautta näytekammioista. Kaasuavusteisella kasvatuksella voidaan näytteen pintaan kiinnittää käytettävästä kaasusta riippuen esimerkiksi alumiinia, piioksidia  $\text{SiO}_2$ , platinaa, tantaalia, tai wolframia. [5]

Ionisuihku sputteroi myös osan kiinnittyneistä atomeista pois näytteen pinnalta, mutta kokonaisuudessaan kasvatusta tapahtuu enemmän kuin sputterointia. Koska ohut kaasukerros näytteen tuntumassa hajoaa verrataan nopeasti, on kaasuvusteista kasvatusta käytettäessä skannausnopeus usein suuri, jolloin vältetään turhaa sputterointia. [10]

### 4.4 Mikropiirien ja litograafisten maskien virheanalyysi

Mikropiirien virheanalyysi perinteisin menetelmin on usein hidasta ja työlästä. Näyte täytyy ensin leikata mekaanisesti ja kiillottaa ennen kuin sitä voidaan tarkastella valomikroskoopin alla. FIB:llä leikkaaminen ja kuvantaminen voidaan hoitaa samalla laitteella. Lisäksi samasta näytteestä voidaan ottaa leikkaus useammasta kohtaa, jolloin saadaan osittainen 3D-kuva näytteen sisään. Jos näytteelle ei ole jatkokäyttöä, voidaan siitä muodostaa myös täydellinen 3D-kuva skannaamalla ja sputteroimalla se siivu kerrallaan. [1]

Tyypillisen mikropiirin ja sen valmistukseen käytetyn litograafisen maskin merkitsevät piirteet ovat alle mikrometrin luokkaa, mutta FIB:llä pystytään työstämään piirteitä luotettavasti 10 nm:n kokoluokkaan asti joten se soveltuu hyvin mikropiirien



ja maskien korjaamiseen. Mikropiireissä esiintyy virheitä sekä läpikuultavilla, että tummilla osilla. Virheet läpikuultavissa osissa korjataan kasvattamalla niiden päälle metallia, kun taas tummien osien virheet jyrsitään pois mikropiiristä. Vastaavasti maskeja korjattaessa, läpikuultavien virheiden päälle kasvatetaan UV-säteilyä absorboivaa materiaalia. FIB:llä voidaan myös korjata vaihesiirtomaskeja. [10]

Viallisten mikropiirien korjaamisen lisäksi FIB:llä voidaan muokata myös valmiin prototyypin toimintaa jälkikäteen katkaisemalla ja yhdistämällä johtimia piilevyllä tarpeen mukaan. Monitasoiselta mikropiiriltä voidaan FIB:n avulla myös poistaa haluttu määrä kerroksia jyrsimällä ja tarkastella siten syvempiä rakenteita. [10]

## 4.5 TEM-näytteenvalmistus

Toisin kuin perinteisellä argon-hionnalla, FIB:llä voidaan valmistaa nopeasti jopa  $100\ \mu\text{m}^2$ :n kokoisia ja alle  $100\ \text{nm}$ :n paksuisia ohutleikkeitä TEM:n käyttöön. Ionisuihkun energiaa muuttamalla saavutetaan myös heterogeenisille näytteille tasaisempi leikkausjälki. [9]

Kun alati kutistuvat transistorit jäivät perinteisten valomikroskooppien erotuskyvyn alapuolelle, siirryttiin puolijoheteollisuudessa käyttämään SEM:ia ja sitten kaksipylväslaitteistoja piikiekkojen virheanalyysiin. Nykyään transistorien läpimitta on jo kymmenen nanometrin luokkaa ja SEM:n sijasta kuvantamiseen täytyy käyttää TEM:ia jonka käyttöä on historiallisesti rajoittanut ohutleikkeiden valmistamisen hankaluus. Optimaalisen ohutleikkeen täytyy olla ohuempi kuin kuvannettava mikropiirin osa ja mekaaniset leikkausmenetelmät ovat laadun kannalta epäluotettavia ja aikaavieviä. FIB soveltuu erinomaisesti tähän käyttötarkoitukseen ja teollisuudessa onkin kehitetty automaattisia rutiineja joilla piikiekosta leikataan ionisuihkulla ensin tarkasteltava osa, joka sitten hiotaan useammalla skannauskerralla virtaa pienentämällä halutun paksuiseksi. [28]

Leikkeen erottelu näytteestä ja kiinnittäminen TEM-verkkoon kuvantamista varten suoritetaan pääasiassa kahdella eri tavalla. Niin kutsutussa ex-citu -poistossa näyte nostetaan leikkuukohdasta teroitettun lasineulan elektrostaattisen vetovoiman avulla ja lasketaan sitten valmiin TEM-verkon päälle valomikroskoopin alla. Tässä menetelmässä ohutleikettä ei voida enää TEM-verkolle asettamisen jälkennä hioa ohuemmaksi ja käyttäjältä vaaditaan paljon taitoa neulan käsittelyssä. In-situ -poistossa käytetään sen sijaan piezoelementeillä liikuteltavaa teroitettua wolframneulaa ohutleikkeen nostamiseen. Piezot mahdollistavat muutamien nanometrien

kokoiset liikkeet kolmessa ulottuvuudessa. Neula asetetaan ensin ohutleikkeen päälle ja ne yhdistetään sitten toisiinsa esimerkiksi platinasuihkun avulla. Ohutleike nostetaan leikkauskohdasta ja kuvannetaan samanaikaisesti joko matalaenergisellä elektroni- tai ionisuihkulla. Leike kiinnitetään sitten TEM-verkolle platinasuihkulla ja neula irrotetaan ionisuihkulla jolla leikettä voidaan vielä hioa ohuemmaksi verkolla. Näistä kahdesta menetelmästä in-situ -poisto on yleisempi. [31]

TEM-analyysin yleistyessä kasvaa myös ohutleikkeiden valmistuksen tarve ja kaksipylväslaitteistoja onkin suunniteltu integroitaviksi mikropiirituotantolinjojen kylkeen. Tällöin TEM-näytteenvalmistuksen kustanteet laskevat parhaillaan 70% ja prosessi nopeutuu. Samasta piikiekosta voidaan nyt erottaa useita näytteitä ja toimittaa ne TEM:lle automaattisesti. Tekniikka tulee olemaan tulevaisuudessa avainasemassa kutistuvien mikropiirien laadunvalvonnassa. [28]

## 4.6 Ionilitografia

FIB:llä voidaan tuottaa ionilitografian keinoin korkean resoluution rakenteita, sekä orgaanisilla, että inorgaanisilla resisteillä. Tämä on nopeampaa kuin kaasuväestöinen etsaus, sillä resisti reagoi herkemmin ionisuihkun läsnäoloon. Inorgaanisilla resisteillä ionien absorbaatio resistiin muuttaa sen etsausherkkyyttä plasmassa tai nesteessä. FIB:llä on laserlitografiaan verrattuna korkeampi resoluutio, joten sillä voidaan todennäköisesti suorittaa maskitonta kuviointia teollisessa mittakaavassa. Ionien ja näytteen välinen vuorovaikutus riippuu vahvasti pinan topografiasta, joka itsessään muuttuu FIB:llä työستettäessä, joten lopputuloksen simulointi nanoskaalassa on työlästä. [10], [32]

Orgaanisen resistin tapauksessa elektronisuihku takaisinsiroaa resistin alla olevasta substraatista, joten lopullinen paljastunut alue on huomattavasti suurempi kuin suihkun alkuperäinen halkaisija. Suurempimassaisilla ioneilla takaisinsirontaa ei tapahdu ja resististä paljastunut alue vastaa ionisuihkun halkaisijaa. Yksittäisen ionin kantama kineettinen energia siirtyy myös paremmin resistin molekyylielle joten menetelmän energiatehokkuus on parempi verrattuna elektronisuihkuun. Orgaanisten resistien FIB-litografiassa on valmistettu onnistuneesti alle mikrometrin kokoisia pisteitä. Resistin käytön ohella näytteitä voidaan doupata FIB:llä suoraan pienienergisellä ionisuihkulla. [10], [32]

## 4.7 Mikro- ja nanovalmistus

Jyrsimällä voidaan FIB:llä valmistaa koskettimia kenttäioni (engl. field ion microscope, tai FIM)- ja atomivoimamikroskooppeihin (engl. atomic force microscope, tai AFM), mikroskaalan leikkausteriä ja muotteja, sekä kenttäemissiolaitteita. Vaikka yksinkertainen jyrsintä on verrattain hidas ja soveltuu siksi parhaiten prototyyppien valmistukseen, kaasuvuusteinen etsausjyrsintä lisää menetelmän nopeutta 10-20-kertaiseksi ja sopii jo teolliseen tuotantoon. [33]

Nanoteknologian sovellukset, kuten mikro- ja nanoelektromekaaniset laitteistot, mikrofluidiset laitteet ja nanolinssit ovat yleistyneet erityisesti viimeisen vuosikymmenen aikana. Perinteisesti näitä on valmistettu suurissa erissä hyvin tunnetun ja kustannetehokkaan laserlitografian avulla. Uusia prototyyppjä kehitettäessä se on kuitenkin hidaskäyttöinen ja kallis, koska käytännössä jokaisella iteraatiokierroksella prototyypin topografia järjestellään uudelleen. FIB-SEM-hybridi on suuren resoluution ja hyvän toistettavuuden ansiosta tähän tarkoitukseen soveltuva vaihtoehto. [28]

FIB-nanovalmistusta voidaan käyttää metalleista ja epämetalleista koostuvien komposiittinäytteiden valmistuksessa, joille saavutetaan korkean resoluution lopputulos ilman maskeja. Elektronilitografiassa pienimmät ominaisuudet ovat usein kymmenien nanometriä luokkaa, mutta FIB:n korkean resoluution työstöä voidaan käyttää yhdessä laserlitografian kanssa tarkkuutta vaativien osien työstämiseen. Elektronilitografian ja kemiallisen etsauksen yhdistelmällä voidaan tuottaa 5 nm-50 nm:n kokoisia yksinkertaisia muotoja, mutta menetelmä jättää jälkeensä rosoisia reunoja satunnaisia hiutaleita, joten se ei sovellu elektronisten komponenttien valmistukseen. FIB:llä etsauksen nopeus on tyypillisesti  $0,1 \mu\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ - $1 \mu\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ . [33]



## 5 FIB-laitteistot tulevaisuudessa

FIB-laitteistojen erotuskyvyn kehityksen ohella uusien kuvantamisohjelmistojen kehitys on välttämätöntä, jotta instrumentin tuottamasta yhä suuremmasta data-määrästä saadaan vedettyä johtopäätöksiä. Yksittäisen mittauksen data koostuu usein 4D-pisteistä kun seurataan näytteen kehitystä ajan suhteen ennalta määrättyssä ympäristössä. [28]

Kun FIB-laitteistot siirtyvät laboratorioista teollisuuden käyttöön, pitää niitä pystyä käyttämään ilman laajempaa alan tuntemusta. Samalla käyttötarkoitus siirtyy yksittäisistä kokeista massatuotannon puolelle ja automaatio on yhä suuremmassa roolissa tuotteen laadun valvonnan ja tuotannon tehokkuuden osalta. Vaikka puolijohdeteollisuus on edelleen tekniikan suurin käyttäjä, niin se on levinnyt myös materiaali-, ja biotieteisiin, sekä fossiilisten polttoaineiden etsintään. Hybridilaitteistojen levitessä niiden tehokkuutta on parannettu edelleen suunnittelemalla työrutiineja ja mittaustekniikoita, jotka yksinkertaistavat laitteen käyttöä ja vähentävät henkilöstötarvetta. [28]

Vaikka FIB:llä pystytään nyt valmistamaan luotettavasti nanoskaalan rakenteita, sen pääasiallinen käyttötarkoitus on toistaiseksi ollut ionietsaus ja mikrovalmistus. Mikrotasolla FIB on jo vakiintunut luotettavana valmistusmenetelmänä sen vakaan etsausnopeuden ansiosta. Nanotasolla sputterointiherkkyys tulee pitää materiaalille vakiona ja tämän kontrolloimiseksi tarvitaan lisää tutkimusta, jotta FIB pystyy vastaamaan teollisuuden vaatimuksiin nanovalmistuksessa. [34]

Tulevaisuudessa FIB tulee olemaan yhä enemmän nopean prosessoinnin työkalu. FIB:n kyky myökata näytettä suurella resoluutiolla ilman maskin tarvetta on yksi sen vahvuuksista, mutta toistaiseksi 100 ns:n altistusaika yksittäiselle pisteelle on vielä liian hidas ollakseen kaupallisesti kilpailukykyinen vakiintuneiden valmistusmenetelmien kanssa. Esimerkiksi 300 mm:n piikiekon täyttäminen 10 nm:n ominaisuuksilla veisi FIB:ltä lähemmäs kaksi vuotta, lukuunottamatta siirtymäaikaista pistestä toiseen. [10]

Toisaalta FIB on verrattain nopea erikoistuneissa tehtävissä, kuten radioaktiivisten lähteiden istuttamisessa mikroprosessoreihin. Noin 1000 lähdeä voidaan istuttaa piikiekolle käyttämällä niin vähän radioaktiivista materiaalia, ettei siitä koidu ympäristölle merkittävää haittaa. Perinteisessä litograafisessa istutuksessa syntyy suuri määrä jätettä erityisesti nanotason prosesseissa. Jopa 90 % sputteroidusta materiaalista karkaa työskentelyalueelta, eikä siten jää näytteen pinnalle kerrostumana. Itse kerrostumasta toiset 90 % muuttuu käyttökelvottomaksi kuvioinnin aikana. [6], [8]

FIB:llä kuvioitaessa käytetään paljon pienempiä zeptolitrin kokoluokkaa olevia radioaktiivisia lähteitä ja se tuottaa kokonaisuudessaan vähemmän jätemateriaalia, joten sitä voidaan käyttää useampien materiaalien kanssa. Lisäksi järjestelmän oma tyhjiökammio suojaaa myös näytettä ja ympäristöä ristisaastumiselta, joten ympäröivän puhdashuoneen ei tarvitse olla yhtä täydellinen kuin muilla nanovalmistusmenetelmillä. [6]

Alkuvaurioita näytteelle voidaan vähentää esimerkiksi kryolitografian keinoin. Pienet rakenteet, kuten nanoputket, kuluvat FIB-kuvioinnin aikana, mutta tämä voidaan välttää päällystämällä näyte väliaikaisella suojaavalla kerroksella. Tulevaisuudessa tulee laitteistossa keskittyä erityisesti ionien aiheuttamien vaurioiden eliminointiin. Kaikkein tärkein tutkimuksen ala tulevaisuudessa tulee todennäköisesti olemaan ionien ja näytteen välisen vuorovaikutuksen ymmärtäminen yksittäisten törmäysten tasolla niin näytteen pinnalla, kuin sen sisällä. [10]

FIB:n uskotaan tulevaisuudessa pystyvän yksittäisten atomien istutukseen tietokoneen ohjaamana. Yksittäisten atomien istutus muuttaa huomattavasti 10 nm:n kanavatransistoreiden suorituskykyä huoneenlämmössä. Istutusprosessin ymmärtäminen on myös tärkeää komponenttien suojaamisessa kosmiselta säteilyltä, sillä yhdenkin atomin kokoinen virhe voi lamaannuttaa nanotason varausportin, tai muuttaa sen ulostuloa. [10]

FIB:n käyttöä yksittäisten atomien istutuksessa on toistaiseksi rajoittanut hidas työskentelynopeus, kohdistusvaiheen ei-haluttu ionien kiinnittyminen, istutettavien lajien ja istutusenergioiden vaihtelu, sekä massa-analysaattorin puuttuminen useimmista järjestelmistä. Viime aikoina useimmat näistä ongelmista on kuitenkin ratkaistu käyttämällä kaksipylyväsjärjestelmän elektronisuihkua kohdistamiseen, sekä selektiivisten ionilähteiden ja sekundääristen ionien massaspektrometrin integroinnilla uudempiin laitteisiin. [10]

Mikro- ja nanovalmistuksessa on käynnissä ikuinen kamppailu pienimmän työstettävän ominaisuuden ja tuotantomäärän välillä. Jotta FIB olisi taloudellisesti kannattava perinteisten mikrovalmistusmenetelmien ohella, tulee sen jrsintänopeus ensin saattaa elektroni- ja laserlitografian tasolle. FIB-järjestelmiin tulee lisätä suihkun leveyden valintaominaisuus, jotta liiallinen resoluutio ei rajoittaisi tuotantonopeutta karkeammilla standardeilla työskenneltäessä. Ihanteellisesti, suihkun halkaisijaa voitaisiin säätää reaaliajassa, ja samaan näytteeseen voitaisiin siten jyrsiä korkean ja matalan resoluution ominaisuuksia tarpeen mukaan. Resoluution vaihtaminen on makroskaalan valmistusmenetelmille jo jokseenkin itsestäänselvyys, joten historian miniaturisaatiotrendejä seuraten on odotettavissa, että tämä ominaisuus integroidaan FIB:iin nanovalmistuksen kysynnän kasvaessa lähitulevaisuudessa. [33]





## 6 Päätäntö

Varattujen hiukkasten optiikan, kenttäemission ja konemallinnuksen aloilla tehtyjen läpimurtojen ansiosta FIB on viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana vakiinnuttanut paikkansa osaksi modernin tutkimuslaboratorion kalustoa ja sitä käytetään laajalti TEM-näytteenvalmistuksessa. Myös puolijohdeteollisuus on menestyksekkäästi ottanut FIB:n käyttöön mikropiirien virheanalyysi- ja takaisinmallinnustyökaluna. Tulevaisuudessa FIB:llä tulee olemaan yhä enemmän sovelluskohteita nano-optiikan ja -magnetismin, sekä spinelektronikan aloilla[33]. Myös korkean resoluution kasvatus- ja jysintäprotokollat, sekä injektoitavien kaasuseosten kemian kehitys laskevat prototyypin kehityksessä vaadittavien iteraatiokierrosten määrää ja siten mahdollistavat nopeamman nanoskaalan tuotteiden kehityksen [28]. Moderni yhteiskunta on kehittyneissä maissa yhä riippuvaisempi mikroprosesoreista ja FIB voi tekniikkana kypsyessään auttaa osaltaan vastaamaan jo lähes eksponentiaalisesti kasvavaan laskentatehon kysyntään.



## Lähteet

- [1] C. A. Volkert ja A. M. Minor, ”Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining”, *MRS Bulletin*, vol. 32, s. 389–399, 2007. url: [https://www.si.edu/mci/earlyphotography/references/MRS\\_Bulletin\\_2007\\_FIB\\_machining.pdf](https://www.si.edu/mci/earlyphotography/references/MRS_Bulletin_2007_FIB_machining.pdf) (viitattu 25.06.2019).
- [2] M. U. Jon Orloff ja L. Swanson, *High Resolution Ion Beams: FIB and Its applications*. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2003, ISBN: 978-1-4613-5229-7. url: [https://books.google.fi/books?id=UCfvBwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=UCfvBwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [3] V. E. Krohn ja G. Ringo, ”Ion Source of High Brightness Using Liquid Metal”, *Applied Physics Letters*, vol. 27, s. 479–481, 1975. url: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.88540> (viitattu 25.06.2019).
- [4] J. W. M. Michael Nastasi ja J. K. Hirvonen, *Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications*. The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge CB2 1RP 40 West 20th Street, New York, NY 10011-4211 USA: Cambridge University Press, 1996, ISBN: 0-521-37376-X. url: [https://books.google.fi/books?id=P0xfvcJGNfMC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=P0xfvcJGNfMC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [5] L. A. Giannuzzi ja F. A. Stevie, *Introduction to focused ion beams: Instrumentation, theory, techniques and practice*. USA: Springer US, 2005, ISBN: 0-387-23116-1. url: [https://books.google.fi/books?id=\\_0vZVUkRRtQC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=_0vZVUkRRtQC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [6] N. Yao, *Focused Ion Beam Systems: Basics and Applications*. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK: Cambridge University Press, 2007, ISBN: 978-0-521-83199-4. url: [https://books.google.fi/books?id=XXMhAwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=XXMhAwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).

- [7] G. Hlawacek ja A. Götzhäuser, *Helium Ion Microscopy*. Sveitsi: Springer International Publishing Switzerland, 2016, ISBN: 978-3-319-41988-6. url: [https://books.google.fi/books?id=Dd4yDQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=Dd4yDQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [8] R. Hellborg, *Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications*. Alankomaat: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, ISBN: 978-3-540-23983-9. url: [https://books.google.fi/books?id=FNfbch2T3ycC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=FNfbch2T3ycC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [9] S. M. Ivo Utke ja P. Russel, *Nanofabrication Using Focused Ion and Electron Beams: Principles and Applications*. 198 Madison Avenue, New York, New York 10016: Oxford University Press, 2012, ISBN: 978-0-19-973421-4. url: [https://books.google.fi/books?id=GBVpAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=GBVpAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [10] T. Schenkel, "Fundamentals of Focused Ion Beam Nanostructural Processing: Below, At, and Above the Surface", *MRS Bulletin*, vol. 32, s. 424–432, 2007. url: <https://pdfs.semanticscholar.org/9985/2ecdb016da1b5484638bf15f7d4bbf8c98d3.pdf> (viitattu 25.06.2019).
- [11] A. A. Tseng, "Recent Developments in Micromilling Using Focused Ion Beam Technology", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, s. 15–34, 2004. url: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.464.1484&rep=rep1&type=pdf> (viitattu 25.06.2019).
- [12] D. A. d. W. J.J.L. Mulders ja W. Duinkerken, "Measurements and Calculations of FIB Milling Yield of Bulk Metals", *Microelectric Engineering*, vol. 84, s. 1540–1543, 2007. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167931707002109> (viitattu 25.06.2019).
- [13] D. S. Yuliya Stark Robert Frömtera ja H. P. Oepen, "Sputter Yields of Single- and Polycrystalline Metals for Application in Focused Ion Beam Technology", *Journal of Applied Physics*, vol. 105, s. 013–542, 2009. url: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3056161> (viitattu 25.06.2019).

- [14] D. A. de Winter, "Focused Ion Beam – Scanning Electron Microscopy Applied To Electrically Insulating Materials", väitöskirja, Utrecht University, Domplein 29, 3512 JE Utrecht, Alankomaat, 2015.
- [15] A. A. Tseng, "Recent Developments in Nanofabrication Using Focused Ion Beams", *Small*, vol. 10, s. 924–939, 2005. url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/sml1.200500113> (viitattu 25.06.2019).
- [16] M. S. Bronsgeest ym. "Probe Current, Probe Size, and the Practical Brightness for Probe Forming Systems", *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 26, s. 949–955, 2008. url: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:bf362488-549b-4715-94a8-68244d348dac/datastream/OBJ/download> (viitattu 25.06.2019).
- [17] S. S. Naik, *Optimization of Process Planning for Focused Ion Beam Machine in Nano-Manufacturing*, Centennial Hall, 300 W 12th St, Rolla, MO 65409, Yhdysvallat, 2012.
- [18] J. Orloff, *Handbook of Charged Particle Optics*. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2009. url: [https://books.google.fi/books?id=y0FF19lud5YC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=y0FF19lud5YC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [19] JEOL Ltd., *JIB-4000PLUS Focused Ion Beam Milling Imaging System*. url: <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JIB-4000PLUS.html> (viitattu 25.06.2019).
- [20] Thermo Fisher Scientific, *V400ACE Focused Ion Beam for Semiconductors*. url: <https://www.fei.com/products/fib/v400ace-focused-ion-beam-for-semiconductors/> (viitattu 25.06.2019).
- [21] Carl Zeiss Microscopy GmbH, *ZEISS Crossbeam Family*, versio 3.2, 2019. url: [https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/FCB253FF6416DBE8C1257BD00048BC58/\\$FILE/EN\\_42\\_011\\_091\\_Crossbeam\\_rel3\\_2.pdf](https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/FCB253FF6416DBE8C1257BD00048BC58/$FILE/EN_42_011_091_Crossbeam_rel3_2.pdf) (viitattu 25.06.2019).
- [22] ———, *ZEISS ORION NanoFab*, versio 2.0, 2016. url: [https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/0F2465540E1880F3C1257A7200336AEC/\\$FILE/EN\\_42\\_011\\_015\\_ORION\\_NanoFab\\_2\\_0.pdf](https://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/0F2465540E1880F3C1257A7200336AEC/$FILE/EN_42_011_015_ORION_NanoFab_2_0.pdf) (viitattu 25.06.2019).

- [23] K.-N. Leung ja C. Hercules, *Selective Ion Source*, US Patent 5,517,084, toukokuu 1996. url: <https://patentimages.storage.googleapis.com/84/2e/5f/9191c91b4ac1ee/US5517084.pdf> (viitattu 25.06.2019).
- [24] R. Jede, ”First Results From A Multi-Ion Beam Lithography And Processing System At The University Of Florida”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1336, s. 243–247, 2011. url: [https://www.researchgate.net/publication/252296787\\_First\\_Results\\_From\\_A\\_Multi-Ion\\_Beam\\_Lithography\\_And\\_Processing\\_System\\_At\\_The\\_University\\_Of\\_Florida](https://www.researchgate.net/publication/252296787_First_Results_From_A_Multi-Ion_Beam_Lithography_And_Processing_System_At_The_University_Of_Florida) (viitattu 25.06.2019).
- [25] Raith GmbH, *Raith VELION*. url: <https://www.raith.com/products/velion.html> (viitattu 25.06.2019).
- [26] —, *Raith IONselect*. url: <https://www.raith.com/products/ionline/ionselect.html> (viitattu 25.06.2019).
- [27] S. Reyntjens ja R. Puers, ”A Review of Focused Ion Beam Applications in Microsystem Technology”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 11, s. 287–300, 2001. url: <https://core.ac.uk/download/pdf/34290746.pdf> (viitattu 25.06.2019).
- [28] J. Williams, ”The Dual-Beam — Its Birth, Progress, and Future”, *Micromicroscopy Today*, vol. 22, s. 32–37, 2014. url: <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/BAD4C93E1DA931B202C9692D46C60704/S1551929514000765a.pdf/the-dual-beam-its-birth-progress-and-future.pdf> (viitattu 25.06.2019).
- [29] J. W. M. Michael Nastasi ja Y. Wang, *Ion Beam Analysis: Fundamentals and Applications*. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2015, ISBN: 978-1-4398-4638-4. url: [https://books.google.fi/books?id=2z\\_NBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=2z_NBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [30] B. Wolf, *Handbook of Ion Sources*. 2000 Corporate Blvd., N.W., Boca Raton, Florida 33431: CRC Press, 1995, ISBN: 0-8493-2502-1. url: [https://books.google.fi/books?id=DyAuDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=DyAuDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).

- [31] L. A. Giannuzzi ja F. A. Stevie, *Introduction to Focused Ione Beam Nanometrology*. 40 Oak Drive, San Rafael, CA, 94903, USA: Morgan Claypool Publishers, 2015, ISBN: 978-1-6817-4020-1. url: [https://books.google.fi/books?id=\\_PzmCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=_PzmCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [32] Z. M. Wang, *FIB Nanostructures*. Sveitsi: Springer International Publishing Switzerland, 2013, ISBN: 978-3-319-02873-6. url: [https://books.google.fi/books?id=dP03BAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=dP03BAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) (viitattu 25.06.2019).
- [33] S. S. Gunasekaran Venugopal ja S.-J. Kim, ”Focused Ion Beam Based Three-Dimensional Nano-Machining”, 2012. DOI: 10.5772/30218. url: [https://www.researchgate.net/publication/221923662\\_Focused\\_Ion\\_Beam\\_Based\\_Three-Dimensional\\_Nano-Machining](https://www.researchgate.net/publication/221923662_Focused_Ion_Beam_Based_Three-Dimensional_Nano-Machining) (viitattu 25.06.2019).
- [34] J. X. M.J. Vasile R. Nassar ja H. Guo, ”Microfabrication Techniques Using Focused Ion Beams and Emergent Applications”, *Micron*, vol. 30, s. 235–244, 1999. url: <https://www.sandia.gov/mst/pdf/Micron1999.pdf> (viitattu 25.06.2019).