

Plasmapuhdistus

Kandidaatin tutkinto
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Oiva Kupiainen
Tarkastaja:
FT Sari Granroth

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Kupiainen, Oiva Plasmapuhdistus

Kandidaatin tutkinto, 17 s., 0 liites.

Fysiikka

Huhtikuu 2025

Plasmapuhdistus on erilaisten pintojen puhdistukseen käytettävä menetelmä, joka perustuu plasman hiukkasten vuorovaikutukseen puhdistettavan pinnan kanssa. Tämän tutkielman tarkoituksena on antaa yleiskuva plasmapuhdistuksesta pintapuhdistusmenetelmänä ja kertoa joistakin sen sovelluksista eri aloilla.

Tutkielmassa edetään plasman määritelmästä ja karakterisoinnista sen käyttöön puhdistusmenetelmänä. Tarkastelussa esitellään plasman keskeiset vaikutusmekanismit ja tuottomenetelmät. Lisäksi kuvataan plasmapuhdistuksen sovelluksia esimerkkien avulla ja arvioidaan menetelmän etuja sekä rajoitteita.

Asiasanat: Plasmapuhdistus, plasma, pintapuhdistus, mikropiirit, sterilointi, konservointi

Sisällys

Johdanto	1
1 Plasma	1
1.1 Plasmaa määrittelevät parametrit	2
1.1.1 Lämpötila	3
1.1.2 Tiheys	3
2 Pintapuhdistuksesta	3
3 Plasmapuhdistus	4
3.1 Toimintaperiaate	4
3.2 Plasman tuotto	6
3.2.1 Tasavirtapurkaus	7
3.2.2 Matalataajuinen purkaus	7
3.2.3 RF-purkaus	9
3.2.4 Mikroaalto	9
3.2.5 Plasman tuottoon liittyviä parametreja	10
3.3 Plasmapuhdistuksen edut	11
4 Sovellukset	11
4.1 Mikropiirien valmistus	11
4.2 Sterilointi	12
4.3 Konservointi	14
5 Plasmapuhdistuksen rajoitteet ja tulevaisuus	14
6 Yhteenveto	16

Johdanto

Termiä "plasma" käytti ensimmäisenä Irwing Langmuir vuonna 1926 kuvaamaan sähköpurkauksen sisäaluetta, mistä määritelmä on laajentunut kuvaamaan merkittäviltä osin ionisoitunutta ainetta [1]. Vaikka plasmaa ei maapallon normaalioloissa synny, koostuu ylivoimaisesti suurin osa universumin näkyvästä aineesta plasmasta. Hyvä esimerkki plasman esiintymisestä ovat tähdet, jotka koostuvat suuritiheyksisestä plasmasta. [2]

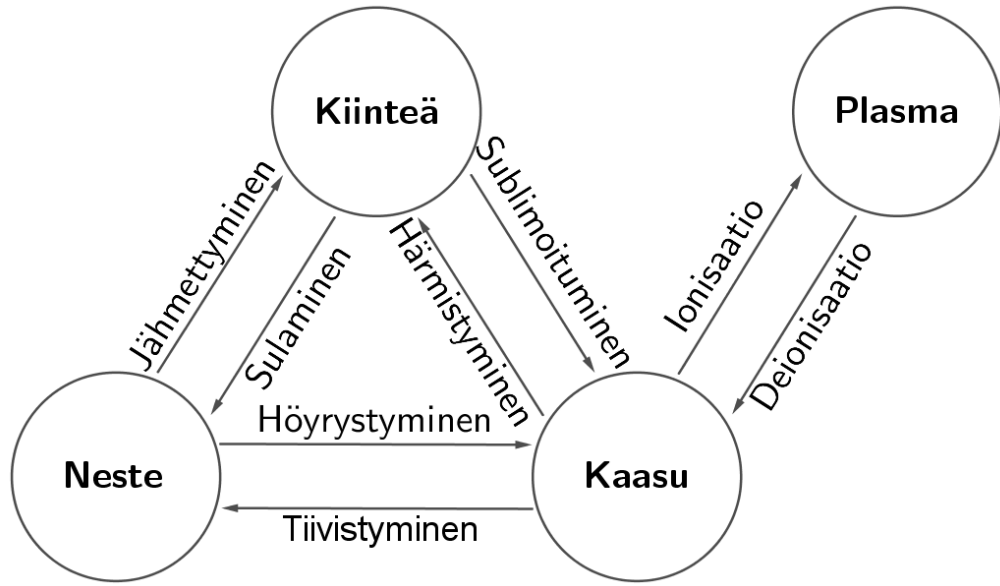
Plasmaan perustuvia menetelmiä on käytetty materiaalien pintojen muokkaamiseen jo 1980-luvulta asti, ja ne ovat saavuttaneet teknologisesti ja taloudellisesti tärkeän aseman. Menetelmiä käytetään laajasti esimerkiksi puhdistukseen, etsaukseen ja pinnoitukseen. [2] Tässä tutkielmassa perehdytään plasman käyttöön pintapuhdistuksessa.

Plasmapuhdistus on plasman reaktiivisia radikaaleja ja ioneja hyödyntävä prosessi, jolla voidaan poistaa ei-toivottuja epäpuhtauksia aineen pinnalta. Se on laajasti käytössä eri pintapuhdistusta vaativissa sovelluksissa, kuten biomateriaali- ja puolijohdeteollisuudessa. [2]

Tutkielmassa on hyödynnetty tekoälyä tekstin kääntämiseen ja muotoiluun.

1 Plasma

Plasmalle löytyy paljon hieman toisistaan eroavia määritelmiä ja erityisesti määritelmien laajuuksissa on suuria eroja. Plasma voidaan karkeasti määritellä positiivisista ja negatiivisista varauksenkuljettajista koostuvaksi sähköisesti neutraaliksi systeemiksi. Tämän määritelmän alle mahtuu ominaisuuksiltaan hyvin paljon toisistaan eroavia aineita. Yhteistä plasmoille on kuitenkin niiden kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien eroaminen normaalioloista. Tästä syystä plasmaa kutsutaan usein aineen neljänneksi olomuodoksi. [1] Plasmaa neljäntenä olomuotona on havainnol-



Kuva 1: Aineen olomuodonmuutokset. Mukana plasma neljäntenä olomuotona.

listettu kuvassa 1.

Plasmaa voi syntyä luonnossa tavallisen aineen lämmitessä yli 10 000 C°:n lämpötilaan [3], mutta yleisesti plasmoja voidaan tuottaa syöttämällä energiaa neutraaliin kaasuun. Tämä aiheuttaa törmäysten seurauksena neutraalin kaasun ionisaatiota, jolloin kaasuun syntyy elektroneja ja ioneja. Energiansyöttöön on paljon eri tapoja, kuten lämpöenergian syöttö ja sähkökentän kohdistaminen kaasuun. [4]

Plasmoille on ominaista niiden jopa hyviä johteita parempi sähkönjohtokyky ja herkkyys sähkö- ja magneettikenttien vaikutuksille. [1] Plasmassa esiintyy myös varauksenkuljettajien välisiä pitkän kantaman Coulomb-vuorovaikutuksia. Nämä ominaisuudet yhdessä tekevät plasmasta monimutkaisen systeemin. [3]

1.1 Plasmaa määrittelevät parametrit

Plasman karakterisointiin käytetään useita parametreja, joista tärkeimpiä ovat lämpötila ja tiheys. Plasman ominaisuudet ja käyttötarkoitukset vaihtelevat näistä parametreista riippuen paljon. [5]

1.1.1 Lämpötila

Plasman lämpötilaa kuvataan aineen eri hiukkasten lämpötilojen avulla. Lämpötila on hiukkasten lämpöenergian – keskiarvoisen kineettisen energian – mitta, jonka yksikkönä käytetään yleisesti elektronivoltteja. Elektronien ja raskaampien hiukkasten lämpötilojen perusteella plasmat voidaan jakaa termisiin ja ei-termisiin plasmoihin. [6]

Termisessä plasmassa elektronilämpötila T_e on yhtä suuri ionilämpötilan T_i kanssa ja hiukkasten lämpötilat ovat 10^4 K:n luokkaa [6]. Termiset plasmat ovat tyypillisesti täysin ionisoituneita [2]. Ei-termisessä plasmassa elektronilämpötila on suuri ionilämpötilan ollessa useita kertaluokkia matalampi, ja ei-termistä plasmaa kutsutaankin usein myös kylmäksi plasmaksi. Yleensä plasmapuhdistuksessa käytetään kylmää plasmaa, sillä se ei kuumenna puhdistettavaa materiaalia, ja näin minimoi vaurioiden riskin. [6]

1.1.2 Tiheys

Varattujen hiukkasten jakauma vaikuttaa plasman käyttäytymiseen, ja sen määrittelyyn käytetään varattujen hiukkasten lukumäärätiheyttä, eli hiukkasten lukumäärää tilavuusyksikköä kohden. Koska plasma on makroskooppisesti neutraalia, ovat elektronien ja ionien lukumäärätiheydet yhtä suuret, ja plasman tiheyden määrittelyyn käytetään elektronien lukumäärätiheyttä n_e . [5] Varattujen hiukkasten tiheys määrittää myös plasman ionisaatioasteen, joka voi vaihdella täydellisestä osittaiseen ionisaatioon. [2]

2 Pintapuhdistuksesta

Kiinteään kappaleen pinta koostuu usein kerroksista erilaisia materiaaleja, joiden paksuus ja rakenteellinen monimutkaisuus vaihtelee kappaleen materiaalin ja historian

mukaan. Usein pintakerrokset eivät ole toivottuja, ja niiden poisto on välttämätöntä. Kuten muidenkin pintapuhdistus prosessien, plasmapuhdistuksen tarkoituksena on poistaa näitä epäpuhtauksia aineen pinnalta. Näin saadaan parannettua pinnan ominaisuuksia, kuten hydrofilisuutta ja pinnoitusten kiinnittyvyyttä. [7]

Epäpuhtaudet voivat olla alkuperältään luonnollisia, jolloin ne syntyvät ympäristön ilmalle altistumisesta. Nämä epäpuhtaudet koostuvat lähinnä happi-, hiili- ja vety-yhdisteistä. Esimerkkejä alkuperältään luonnollisista epäpuhtauksista ovat erilaiset orgaaniset yhdisteet, oksidit sekä adsorboitunut vesi. Toisaalta epäpuhtaudet voivat olla alkuperältään myös teknisiä, jolloin ne ovat muodostuneet pinnan aiemman käsittelyn tai prosessoinnin seurauksena. Tällaisia ovat muun muassa voiteluöljyt sekä märkäpuhdistuksen rasvajäämät. Monet pinnan käsittely- ja valmisteluprosessit vaativat pinnan puhdistusta esivaiheena toimiakseen. [7]

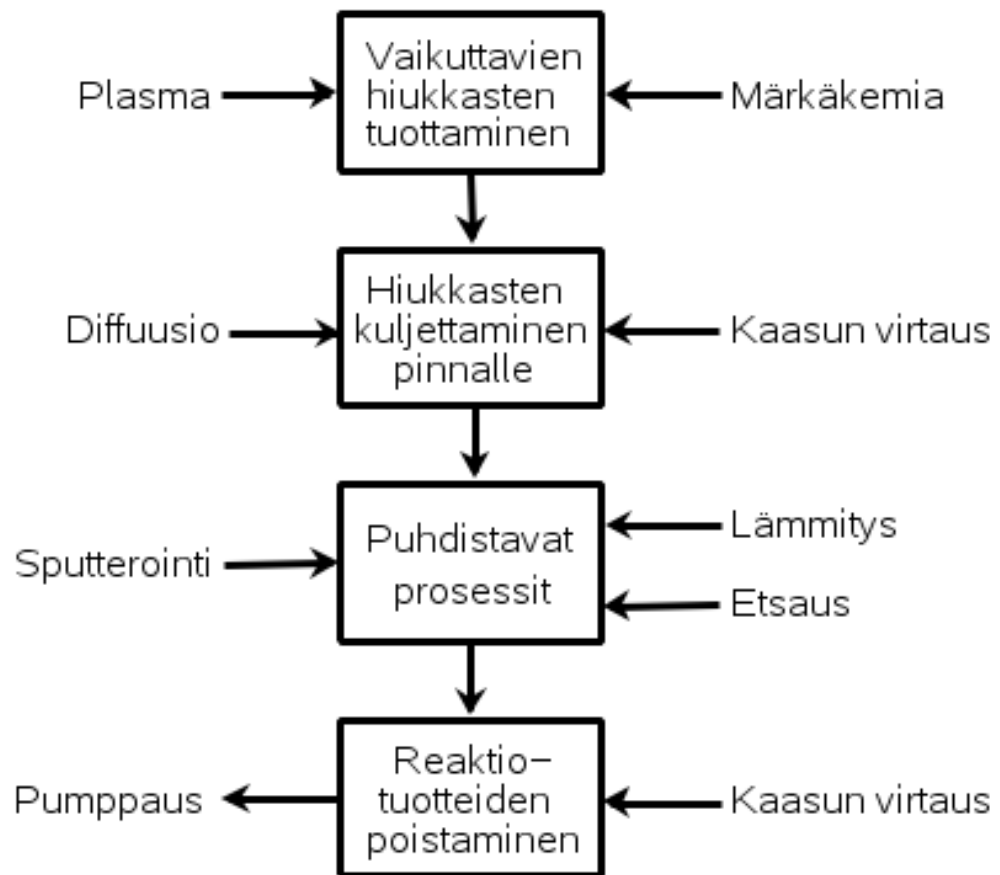
Kaikki pintapuhdistusmenetelmät perustuvat nelivaiheiseen prosessiin, jota on havainnollistettu kuvassa 2. Vaiheet ovat puhdistukseen käytettävien vaikuttavien hiukkasten tuottaminen, hiukkasten kuljettaminen puhdistettavalle pinnalle, hiukkasten ja pinnan vuorovaikutus jonkinlaisen reaktion kautta ja reaktiotuotteiden poisto pinnalta. [7]

3 Plasmapuhdistus

3.1 Toimintaperiaate

Plasmassa syntyvät elektronit, ionit sekä radikaalit vaikuttavat puhdistettavaan pintaan lähinnä kolmen prosessin kautta: lämmityksen, sputteroinnin ja etsauksen. Nämä prosessit vaikuttavat pintaan eri tavoin ja haluttu lopputulos saavutetaan näiden sopivalla yhdistelmällä. [7]

Yksinkertaisin näistä vaikutusmekanismeista on lämmitys, jossa plasman kanssa kosketuksissa oleva materiaali lämpenee elektronien ja ionien törmätessä sen pin-



Kuva 2: Pintapuhdistusprosessin vaiheet.

taan sekä plasman säteilyn kautta. Pinnan liiallinen lämpeneminen voi kuitenkin johtaa ei-toivottuihin vaikutuksiin, minkä vuoksi lämmön määrää joudutaan rajoittamaan. Tämä johtaa epätäydelliseen puhdistustulokseen, sillä rajoitettu lämpötila riittää vain fysikaalisesti adsorboituneiden hiukkasten irrottamiseen, ja kemiallinen adsorptio on huomattavasti tätä vahvempaa. Plasman käyttö pinnan lämmittämiseen on tehokasta verrattuna perinteisiin lämmitysprosesseihin, sillä lämpö kohdistuu suoraan puhdistettavaan pintaan, eikä muun kappaleen lämmittämiseen kulu energiaa. [7]

Sputteroinnissa plasman ja puhdistettavan pinnan välille kytketään jännite, joka käynnistää sputteroinnin. Sputteroinnilla on mahdollista irrottaa kaikkia atomeja, mutta irrotettujen atomien määrä riippuu pinnasta ja epäpuhtauksista. Etenkin puhdistusprosessin loppupuolella sputterointi voi myös poistaa puhdistettavan pinnan pohjamateriaalia ja tuottaa rakennevirheitä. Kaikissa prosesseissa lämmitys ja etsaus eivät kuitenkaan riitä halutun tuloksen saavuttamiseen ja tällöin myös sputterointia tarvitaan. [7]

Etsaus perustuu plasman hiukkasten ja puhdistettavan pinnan välisiin kemiallisiin reaktioihin. Hiukkaset adsorboituvat aineen pintaan, jossa ne voivat reagoida pinnan atomien ja molekyylien kanssa, muodostaen uusia reaktiotuotteita. Tämän jälkeen reaktiotuotteet desorboituvat pinnasta ja ne voidaan poistaa pumppaamalla. On myös mahdollista, että hiukkaset desorboituvat ennen pinnan kanssa reagoimista. Hiukkasten desorptio on lämpötilariippuvaista. [7]

3.2 Plasman tuotto

Kuten aiemmin todettiin, plasmaa voidaan tuottaa keinotekoisesti monilla menetelmillä, joista yleisin on sähköpurkaukseen perustuva ionisaatio. Tämä menetelmä voidaan jakaa käytettävän taajuuden mukaan neljään tyyppiin: tasavirta, matalataajuus, radiotaajuus ja mikroaalto. Kaikki nämä toimivat matalassa paineessa, jo-

ten menetelmiin tarvitaan tyhjiökammio ja -pumppu sekä kaasunsyöttöjärjestelmä. [8] Sähköpurkaukseen perustuvat plasmantuottomenetelmät havainnekuvineen on esitetty kuvassa 3.

3.2.1 Tasavirtapurkaus

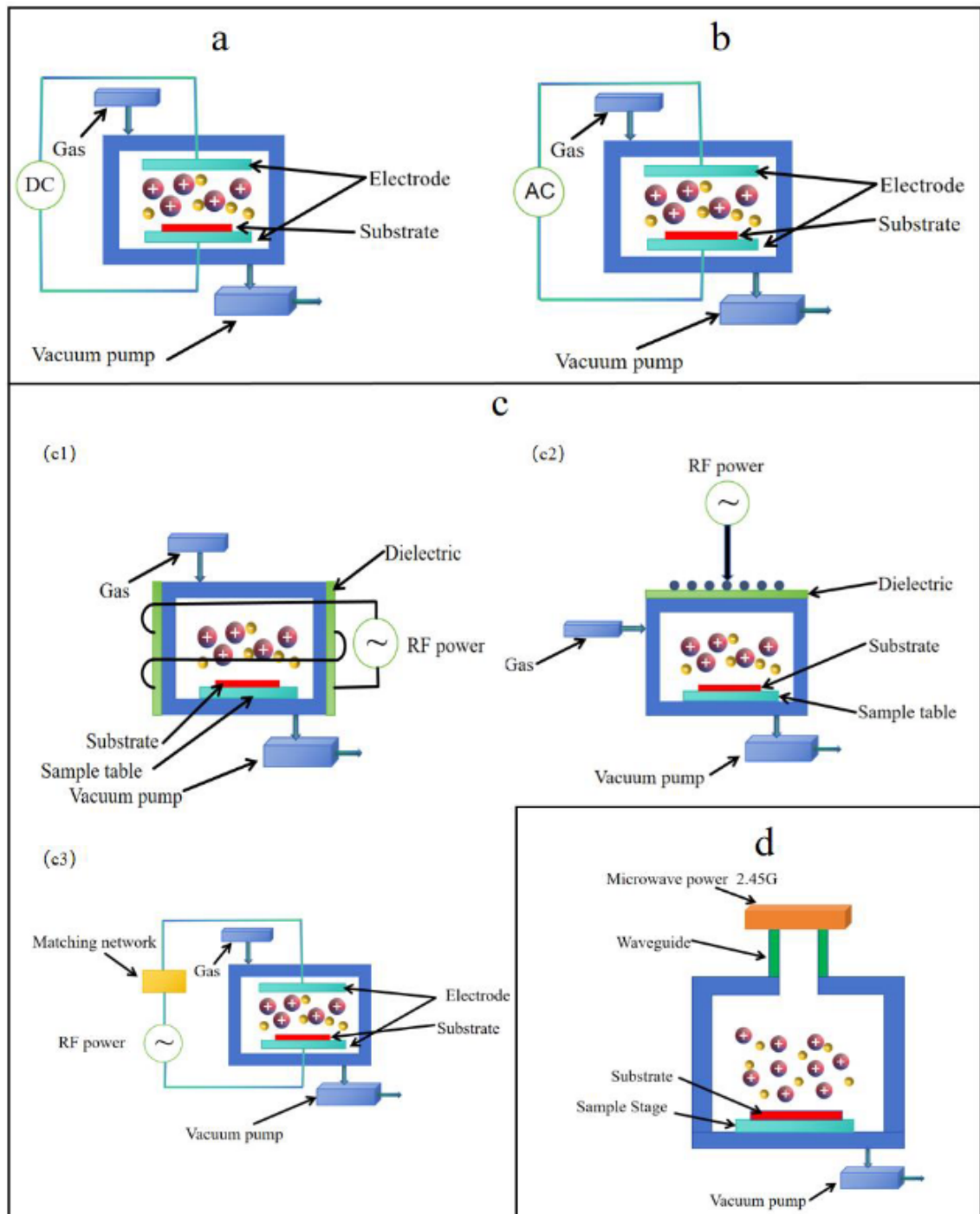
Tasavirtapurkaukseen perustuvan plasmapuhdistuksen laitteisto koostuu kahdesta elektrodilevystä, jotka on yhdistetty tasavirtalähteeseen. Prosessi alkaa tyhjiökamion saattamisesta haluttuun paineeseen ja käytettävän kaasun syöttämisestä kamioon. Tämän jälkeen elektrodien välille muodostetaan sähköpurkaus, joka tuottaa sähkökentän. Kaasu absorboi energiaa ionisoituen ja muodostaen plasmaa. Tämän lisäksi kaasumolekyyleistä irronneet elektronit kiihtyvät sähkökentässä ja törmäyksillään ionisoivat kaasua edelleen. Purkausta jatkettaessa systeemi saavuttaa tasapainotilan, jossa hiukkasia syntyy ja häviää samaa vauhtia. [8]

Puhdistettava esine sijoitetaan toiselle elektrodille, jossa plasman hiukkaset vuorovaikuttavat pinnan epäpuhtauksien kanssa johtaen niiden irtoamiseen tai muuntumiseen epävakain yhdisteiksi, jotka voidaan poistaa tyhjiöpumpulla. Tasavirta tuottaa korkealämpöistä plasmaa ja menetelmä on kustannustehokas sekä helppo käyttää. [8]

3.2.2 Matalataajuinen purkaus

Matalataajuiseen purkaukseen perustuvassa plasmapuhdistuksessa on samanlainen järjestely, kuin tasavirralla, mutta tasavirran sijasta käytetään matalataajuisia 0–300 kHz taajuusalueella toimivaa vaihtovirtaa. Plasman muodostuminen tapahtuu myös samalla periaatteella, mutta ionisaation aiheuttaa muuttuva sähkökenttä. [8]

Toimintaperiaatteen ollessa hyvin samanlainen tasavirtaa käyttävän kanssa, eroaa tuotettu plasma huomattavasti. Tämä menetelmä tuottaa matalalämpöistä plasmaa, joten se soveltuu käytettäväksi lämpöherkkien materiaalien puhdistukseen.



Kuva 3: Havainnekuvia eri plasmantuottomenetelmistä. Tasavirtapurkaus (a), matalataajuinen purkaus (b), RF-purkaus (c): Induktiivisesti kytketty sylinterimäinen käämi (c1), Induktiivisesti kytketty tasokäämi (c2), kapasitiivisesti kytketty (c3) ja mikroaalto (d). [8]

Plasma on myös tasalaatuisempaa ja tiheämpää ja sopii paremmin geometrisesti monimutkaisten kappaleiden puhdistukseen. [8]

3.2.3 RF-purkaus

Radiotaajuinen (RF, engl. *Radio frequency*) purkaus toimii matalataajuiseen nähden korkeammalla 300 kHz–300 MHz taajuusalueella ja jakautuu induktiivisesti ja kapasitiivisesti kytkettyihin tyyppeihin. Kapasitiivisesti kytketty puhdistuslaitteisto koostuu kahdesta vastakkaisesta elektrodilevystä, joihin on kytketty radiotaajuuksilla toimiva vaihtovirtalähde. Induktiivisesti kytketyssä puhdistuskammion ympärillä on sylinterimäinen käämi, johon kytketty vaihtovirta aiheuttaa muuttuvan magneettikentän. Magneettikenttä indusoi kaasuun virran, joka yhdessä magneettikentän kanssa ionisoi kaasun. Samalla periaatteella toimii myös menetelmä, jossa käytetään litteää tasokäämiä. [8]

Kapasitiivisesti kytketyt RF-plasmalähteet ovat yksinkertaisia ja helppoja valmistaa ja hoitaa, jonka lisäksi ne voidaan mukauttaa moniin eri sovelluksiin elektrodin parametreja muuttamalla [8]. Menetelmää käytetään muun muassa lääketieteellisten instrumenttien desinfiointiin [7]. Induktiivisesti kytketyt RF-lähteet tuottavat tiheämpää ja tasaisemmin jakautunutta plasmaa. RF-purkaus tuottaa matalammilla taajuuksilla toimiviin menetelmiin nähden tehokkaammin puhdistavaa plasmaa, pystyy tuottamaan sekä korke- että matalalämpöistä plasmaa ja toimii laajalla painealueella. Nämä ominaisuudet tekevät siitä yhden yleisimmistä plasmantuotto-menetelmistä puhdistustarkoituksiin. [8]

3.2.4 Mikroaalto

Mikroaaltoihin perustuvassa plasmapuhdistuksessa käytetään taajuusalueen 300 MHz–300 GHz sähkömagneettisia aaltoja. Aaltoputken avulla kohdistetut mikroaallot syöttävät energiaa kaasumolekyyleihin, mikä virittää ja ionisoi molekyylejä tuottaen

reaktiivista plasmaa. Kaasun ionisaatio perustuu eri mekanismeihin riippuen systeemin paineesta. Korkeapaineisessa kaasussa mikroaaltojen energia muuntuu suurilta osin hiukkasten lämpöenergiaksi ja kaasu ionisoituu törmäysten johdosta. Matalassa paineessa törmäyksiä ei tapahdu ja kaasu ionisoituu erilaisten statististen ilmiöiden kautta. [8]

Tasa- ja vaihtovirtapurkauksilla tuotettuun plasmaan verrattuna mikroaaltoplasma on reaktiivisempaa ja ionisoituneempaa ja näin puhdistaa tehokkaammin. Koska menetelmä ei myöskään perustu elektrodien väliseen purkaukseen, säästytään elektrodien etsaukselta ja sivutuotteiden kertymiseltä pinnoille. Tämä pidentää huoltojen välisiä käyttöjaksoja ja parantaa laitteiden käyttöikä. [8]

3.2.5 Plasman tuottoon liittyviä parametreja

Plasmapuhdistus on toimintamekanismeiltaan monimutkainen prosessi, johon vaikuttavat useat parametrit. Näistä merkittävimpiä ovat paine, kaasu, teho, puhdistusaika ja toimintaetäisyys [8]. Paineen ja käytettävän kaasun merkityksestä on kerrottu enemmän tässä osiossa.

Etenkin plasmapuhdistuksessa tärkeä muuttuja on paine, jossa plasma tuotetaan. Plasmantuottomenetelmät ja prosessit voidaan jakaa paineen perusteella karkeasti ilmanpaineessa ja matalassa paineessa toimiviin. Molempiin tyyppeihin liittyy niille ominaisia piirteitä, jotka tekevät niistä sopivia eri plasmapuhdistuksen sovelluksiin. [2]

Matalapaineiset plasmaprosessit soveltuvat etenkin orgaanisten ohutkalvojen poistoon ja niillä voidaan saavuttaa paras pinnan puhtaus [9]. Näitä käytetään lähinnä puolijohteiden ja mikropiirien tuotannossa sekä materiaalien prosessoinnissa [2]. Ilmanpaineessa tapahtuvat prosessit eivät vaadi tyhjiölaitteistoa, mutta prosessiin sisältyy omat ongelmansa. Hyvään lopputulokseen pääseminen vaatii puhtaiden kaasujen käyttöä ja reaktiotuotteiden täydellistä poistoa pinnalta. [7]

Myös käytettävällä kaasulla on suuri vaikutus menetelmän tehokkuuteen ja sopivan kaasun valinta on yksi menetelmän haasteista. Kaasut jakautuvat reaktiivisiin ja ei-reaktiivisiin kaasuihin, joiden käyttökohteet eroavat toisistaan. Reaktiivisia kaasuja ovat muun muassa vety ja happi ja ei-reaktiivisiä kaasuja ksenon, helium ja typpi. Joidenkin epäpuhtauksien tapauksessa yhdellä kaasulla ei saavuteta haluttua lopputulosta, jolloin käytetään usean kaasun seosta tai eri kaasuja vaiheittain. [8]

3.3 Plasmapuhdistuksen edut

Plasmapuhdistus tarjoaa monia etuja muihin pinnanpuhdistusmenetelmiin nähden. Näihin sisältyy sekä käytettävyyteen että pintaan kohdistuviin vaikutuksiin liittyviä seikkoja.

Yksi käyttöön liittyvä etu on plasmapuhdistuksen hinta ja käytön helppous muihin menetelmiin verrattuna. Plasmapuhdistuksessa ei käytetä kemikaaleja tai liuotimia, mikä laskee käyttökustannuksia. Tämä vähentää myös haitallisten aineiden säilöntään ja hävittämiseen kuluvia resursseja ja parantaa ympäristöystävällisyyttä. [2]

Plasmapuhdistus on luotettava, joustava ja helposti toistettava prosessi, joka soveltuu käytettäväksi monille materiaaleille (metallit, muovit, lasi, keramiikka). Menetelmällä voidaan saavuttaa hiukkastason puhtaus vaikuttamatta pääasiallisen materiaalin ominaisuuksiin ja ilman puhdistuksesta johtuvia jäämiä. Lisäksi se skaalautuu hyvin suurempiin teollisuuden sovelluksiin. [2]

4 Sovellukset

4.1 Mikropiirien valmistus

Mikropiirien valmistus on monivaiheinen prosessi, jonka jokaisessa vaiheessa on tärkeää poistaa tai minimoida valmistusvirheet, kemialliset epäpuhtaudet ja pienhiuk-

kaset muuttamatta substraatin pintaa. Tämä mahdollistaa piirien hyvän suorituskyvyn ja luotettavuuden, mikä vaikuttaa piirien tuottavuuteen. [2] Erilaiset pintapuhdistusmenetelmät ovat tärkeä osa mikropiirien valmistusprosesseja ja noin 15–20 % mikropiirin valmistusvaiheista onkin puhdistukseen liittyviä, joista noin kolmasosa plasmaprosesseja. [10]

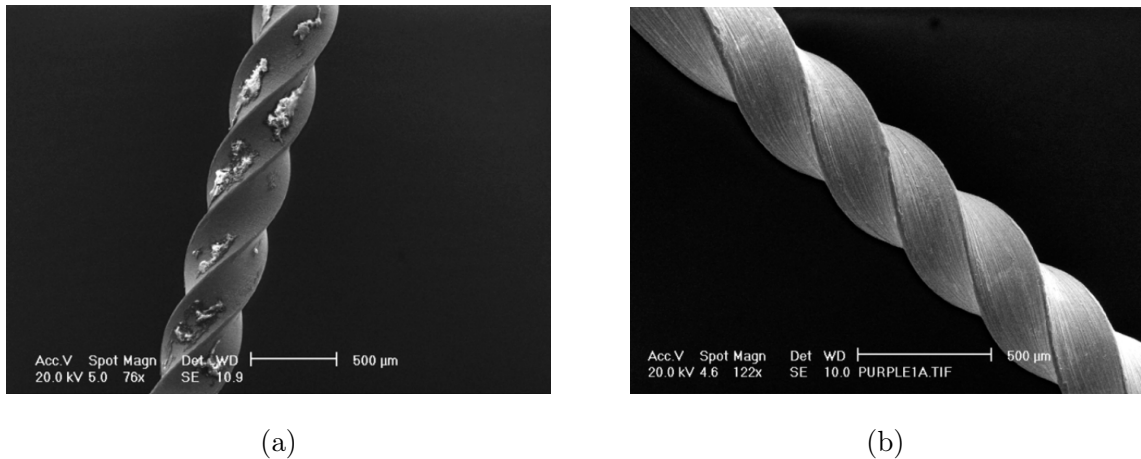
Prosessorien koon pienentyessä myös epäpuhtauksien hiukkasten sallittu koko ja tiheys on pienentynyt. Hiukkaset voivat peittää sirun piikiekon prosessoinnin vaiheissa, jolloin ne tarttuvat pintaan ja voivat jäädä ohutkalvon kasvatuksessa kalvon sisälle. Tämä voi aiheuttaa aukkoja, säröjä ja muita rakennevirheitä, jotka voivat tehdä piiristä viallisen. [2] Puhdistusmenetelmältä vaaditaan tarkkuutta, jota monet perinteiset menetelmät eivät saavuta vahingoittamatta herkkiä materiaaleja. Tästä syystä plasmapuhdistus on yleisesti käytössä kemiallisten menetelmien ohessa. [8]

Suuren puhdistuksen tarpeen vuoksi erilaisia plasmaa hyödyntäviä prosesseja on mikropiirien valmistuksessa useita. Yksi esimerkki on optisessa litografiassa käytetyn valoresistin poisto plasman avulla.

Puhdistusvaiheen tavoitteena on poistaa valoresisti pinnalta vahingoittamatta sen alla olevaa substraattia tai kalvoja. Tyypillisesti prosessiin käytetään mikroaalloilla tai induktiivisesti kytketyllä RF-purkauksella tuotettavaa happiplasmaa, jolla minimoidaan säteilystä syntyvät vahingot. Prosessi tapahtuu matalassa paineessa ja korkeassa lämpötilassa. [10]

4.2 Sterilointi

Lääketieteessä plasmapuhdistusta voidaan käyttää muun muassa hammashoidon instrumenttien puhdistuksessa, ja sitä on tutkittu uutena sterilointimenetelmänä etenkin prionien – eräänlaisten tauteja aiheuttavien proteiinien – tuhoamiseksi. Prionien on havaittu kestävän perinteisiä sterilointimenetelmiä, jolloin ne voivat aiheuttaa tartuntoja kirurgisten ja hammashoidon instrumenttien kautta. [11]



Kuva 4: Hammasviila ennen (a) ja jälkeen (b) plasmapuhdistuksen kuvattuna SE-Millä. Ensimmäisessä kuvassa näkyvät epäpuhtaudet koostuvat todennäköisesti proteiineista ja hammasluun jäämistä. [11]

Tutkimuksessa puhdistettiin käytettyjä hammasviiloja kapasitiivisesti kytketyllä RF-plasmapuhdistuslaitteella. Kaasuna prosessissa käytettiin hapen ja argonin sekoitusta alle yhden torrin paineessa ja tuotettu plasma oli ei-termistä, jolloin puhdistettavien viilojen lämpötila pysyi matalana (noin 30 °C). Puhdistettavien viilojen puhtautta arvioitiin ennen ja jälkeen puhdistuksen visuaalisesti pyyhkäisyelektronimikroskoopin (SEM) avulla ja pinnan kemiallinen koostumus tutkittiin röntgenfluoresenssilla. [11]

Plasmapuhdistuksen todettiin poistaneen lähes kaiken näkyvän epäpuhtauden viiloista. Puhdistuksesta selvinneiden vähäisten epäpuhtauksien oletettiin kemiallisen koostumuksen perusteella olevan jäämiä hammasluusta. Näytteissä ennen puhdistusta havaittuja tyyppiä sisältäviä yhdisteitä ei enää havaittu, mikä kertoo oletettujen proteiinien häviämisestä. Puhdistettujen viilojen pintoihin ei visuaalisesti havaittu syntyneen vahinkoja puhdistusprosessissa. [11] Kuvissa 4a ja 4b on esitetty tutkittu viila ennen ja jälkeen plasmapuhdistuksen.

4.3 Konservointi

Historiallisesti ja kulttuurillisesti merkittävien esineiden säilyttäminen ja kunnossapito on tärkeää historian tutkimuksen kannalta. Löydetyt esineet ovat usein ruosteisia tai muuten saastuneita, ja vaativat käsittelyä alkuperäisen ulkomuodon palauttamiseksi. Perinteiset puhdistusmenetelmät, kuten vesipesu, kemiallinen pesu ja pyyhkiminen, eivät aina onnistu puhdistamaan kaikkia saasteita ja voivat aiheuttaa vahinkoa esineelle. Plasmapuhdistus on tarkoitukseen toimiva menetelmä, sillä se pystyy perusteelliseen puhdistukseen koskettamatta ja vahingoittamatta näytettä. [8]

Plasmapuhdistusta on käytetty muun muassa keskiaikaisten hopeakolikoiden puhdistukseen. Ennen puhdistusta kolikoissa oli havaittavissa korroosiota ja likaa, jonka poistaminen oli välttämätöntä vaurioitumisen estämiseksi. Puhdistukseen käytettiin matalapaineessa tuotettua happi ja typpi RF-plasmaa. Kolikon liiallisen kuumentamisen estämiseksi puhdistus tapahtui 20–30 minuutin vaiheissa, joissa lämpötila nousi korkeimmillaan 60 °C:n lämpötilaan. [12] Kuvassa 5 on esitetty puhdistettu kolikko ennen ja jälkeen plasmapuhdistuksen.

5 Plasmapuhdistuksen rajoitteet ja tulevaisuus

Plasmapuhdistus on monikäyttöinen ja monessa tapauksessa erittäin tehokas pintapuhdistusmenetelmä. Sen käyttöön liittyy kuitenkin rajoitteita, eikä se ole aina toimiva vaihtoehto. Epäpuhtauskerroksen paksuus on yksi menetelmän käytön rajoitteista, sillä kerroksen ollessa yli 10 μm paksu, tulee märkäpuhdistusmenetelmien käytöstä välttämätöntä [7].

Etenkin puolijohdeteollisuudessa ongelmaksi nousee plasmaprosesseista johtuvat ionien ja UV-säteilyn aiheuttamat vahingot. Plasman ionit voivat altistettuun pintaan törmätessään siirtää siihen varausta, ja näin muuttaa sen sähköisiä ominai-



Kuva 5: Keskiaikainen hopeakolikko ennen (a) ja jälkeen (b) plasmapuhdistuksen. [12]

suuksia. Erityisen ongelmallista tämä on dielektrisissä aineissa, joissa syntyvä sähkökenttä voi aiheuttaa läpilyönnin. Substraatissa ylimääräiset varaukset voivat vaikuttaa puolijohteen varauksenkuljettajien rekombinaatioaikaan ja näin huonontaa komponentin ominaisuuksia. [10]

Joissakin tilanteissa plasmapuhdistus voi myös rajoittaa saavutettavaa puhtautta. Metallipintoja puhdistettaessa plasmapuhdistus voi tuottaa hiiliyhdisteistä muodostuvan kalvon, jota ei saada poistettua edes pitkitetyllä puhdistusajalla. Tämä on kuitenkin hyvin olosuhderiippuvainen ilmiö ja samanlaista kalvon muodostumista ei havaita esimerkiksi puolijohdepinnoilla. [13]

Plasmapuhdistusta on käytetty jo pitkään viimeisenä vaiheena kemiallisten puhdistusmenetelmien jälkeen, mutta teknologian kehitys voi mahdollistaa sen käytön pääasiallisena menetelmänä. Kemiallisten menetelmien tuottama jäte, niiden haitallisuus ympäristölle ja kemikaalijäätävät tekevät plasmaan perustuvista prosesseista houkuttelevan vaihtoehdon. Vaikka plasman parametrien optimoinnista tiedetään

paljon, vaatii menetelmän käytön laajentaminen vielä paljon uutta ymmärrystä toimintamekanismeista. [2]

6 Yhteenveto

Plasmapuhdistus on monissa pinnanpuhdistusta vaativissa sovelluksissa vakiintunut menetelmä, jolla voidaan poistaa epäpuhtaudet lähes täydellisesti, vahingoittamatta kappaleen perusmateriaalia. Se perustuu plasman reaktiivisten hiukkasten vuorovaikutukseen puhdistettavan pinnan kanssa.

Tutkielmassa aihetta käsiteltiin tutustumalla ensin plasman määritelmään ja ominaisuuksiin, jonka jälkeen esiteltiin pintapuhdistusmenetelmien toiminnan vaiheet ja käyttökohteet. Plasman tärkeimpien vaikutusmekanismien kautta siirryttiin yleisimpiin plasmantuottomenetelmiin ja näihin vaikuttaviin parametreihin. Lopussa tutustuttiin erilaisiin plasmapuhdistuksen sovelluksiin ja menetelmän rajoitteisiin.

Viitteet

- [1] H. Boenig, *Plasma Science and Technology* (Cornell University Press, 1982), pp. 13–18.
- [2] D. P. Thanu, E. S. Srinadhu, M. Zhao, N. V. Dole ja M. Keswani, *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques* (Elsevier, 2019), pp. 289–353.
- [3] National Research Council (US) Panel on Opportunities in Plasma Science and Technology, *Plasma science: from fundamental research to technological applications*, 1st ed. ed. (National Academy Press, 1995), p. 7.
- [4] H. Conrads ja M. Schmidt, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 441 (2000).
- [5] E. Yiğit, kirjassa *Atmospheric and Space Sciences: Ionospheres and Plasma Environments: Volume 2* (Springer International Publishing Cham, 2018), pp. 1–19.
- [6] F. Wang ja J. Wu, *Modern Ion Plating Technology* (Elsevier, 2023), pp. 29–89.
- [7] A. Belkind ja S. Gershman, *Vac. Technol. Coat.* **9**, 46 (2008).
- [8] J. Sun, Y. Yu, J. Tang, Y. Zeng ja J. Chen, *IEEE Access* **13**, 37221 (2025).
- [9] W. Petasch, B. Kegel, H. Schmid, K. Lendenmann ja H. U. Keller, *Surface and Coatings Technology* **97**, 176 (1997).
- [10] K. Reinhardt ja W. Kern, *Handbook of silicon wafer cleaning technology*, third edition. ed. (William Andrew, 2018), pp. 379–455.
- [11] A. Whittaker, E. Graham, R. Baxter, A. Jones, P. Richardson, G. Meek, G. Campbell, A. Aitken ja H. Baxter, *Journal of Hospital Infection* **56**, 37 (2004).
- [12] E. G. Ioanid, A. Ioanid, D. E. Rusu ja F. Doroftei, *Journal of Cultural Heritage* **12**, 220 (2011).
- [13] B. Dong, M. S. Driver, I. Emesh, R. Shaviv ja J. A. Kelber, *Applied Surface Science* **384**, 294 (2016).